



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

André Tenchini da Silva

**Modelagem numérica de elementos tracionados
em aço inoxidável com parafusos defasados**

Rio de Janeiro

2009

André Tenchini da Silva

**Modelagem numérica de elementos tracionados
em aço inoxidável com parafusos defasados**



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

Orientador: Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Coorientador (es): Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vesslasco

Prof. Dr. Sebastião Arthur Lopes de Andrade

Rio de Janeiro

2009

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

S586 Silva, André Tenchini da.
Modelagem numérica de elementos tracionados em aço inoxidável com parafusos defasados / André Tenchini da Silva. – 2009.
133f.

Orientador: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima.
Coorientador(es): Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco.
Sebastião Arthur Lopes de Andrade.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Aço – Estruturas - Teses. 2. Ligações parafusadas - Teses.
3. Resistência à tração - Teses. I. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 624.014.2

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

Assinatura

Data

André Tenchini da Silva

**Modelagem numérica de elementos tracionados
em aço inoxidável com parafusos defasados**

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

Aprovado em 18 de agosto de 2009.

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Pedro C. G. da S. Vellasco (Coorientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Sebastião A. L. de Andrade (Coorientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Eduardo de Miranda Batista
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - COPPE

Rio de Janeiro

2009

DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir mais essa vitória. Ao meu Pai, onde quer que ele esteja, sempre estará comigo, a minha família, pela paciência e carinho nestes anos e a minha querida namorada Clarissa, por compartilhar os momentos ruins.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Pedro Vellasco, Prof. Doutor Luciano Lima e Prof. Doutor Sebastião Andrade por toda a ajuda e demonstração de força de vontade, pela excelente orientação, apontando os melhores caminhos, dando estímulos para o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade demonstrada nesses anos.

Aos professores, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante a época da graduação e agora do mestrado

Aos meus amigos de trabalho pela paciência com os meus estudos.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário.

A João Santos que por meio de sua dissertação de mestrado contribuiu imensamente para as análises e comparações realizadas neste trabalho, e pela presteza em esclarecer dúvidas pertinentes aos ensaios experimentais.

A UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

A funcionária do Laboratório de Engenharia Civil – LABCIV, Sra. Alessandra, pelo ótimo convívio e pela ajuda na realização deste trabalho.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

O mistério é a coisa mais nobre de que podemos ter experiência. É a emoção que se encontra no cerne da verdadeira ciência. Aquele que não sente essa emoção e que não pode mais se maravilhar nem se espantar, é como se já estivesse morto.

Saber que aquilo que é impenetrável para nós verdadeiramente existe e se manifesta como a mais alta sabedoria e a mais radiosa beleza, que nossas formas mais primitivas, esse conhecimento, está no centro de toda verdadeira devoção.

Albert Einstein

RESUMO

Silva, André Tenchini da. **Modelagem numérica de elementos tracionados em aço inoxidável com parafusos defasados**. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Atualmente, a utilização do aço inoxidável em elementos estruturais é considerada uma solução cara para os problemas da engenharia estrutural. Todavia, mudanças de atitudes dentro da construção civil, uma transição global para um desenvolvimento sustentável e redução em impactos ambientais têm seguramente provocado um aumento na utilização do aço inoxidável. As normas de projeto de aço inoxidável atuais são, em grande parte, baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas desenvolvidas com aço carbono. Todavia, o aço inoxidável apresenta quatro curvas não-lineares tensão *versus* deformação (tensão e compressão, paralela e perpendicular a laminação do material), sem patamar de escoamento e região de encruamento claramente definidos, modificando assim, o comportamento global das estruturas que o utilizam. Em elementos estruturais submetidos a forças axiais de tração, a ruptura da seção líquida representa um dos estados limites últimos a serem verificados. Com o objetivo de se avaliar a resistência a tração de elementos estruturais aparafusados em aço inoxidável S304, este trabalho apresenta um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos através do programa Ansys (versão 11). A não-linearidade do material foi considerada através do critério de plastificação de Von Mises e curvas tensão versus deformação verdadeira. A não-linearidade geométrica foi introduzida no modelo através da Formulação de Lagrange atualizado. O modelo numérico foi calibrado com resultados experimentais obtidos em ensaios de laboratório, a partir de ligações aparafusadas alternadas rígidas, onde não se ocorre nenhuma rotação entre os membros, transferindo nenhum momento fletor, apenas esforço normal e cisalhante.

Palavras-chave: Estruturas em Aço Inoxidável. Ligações Aparafusadas. Resistência a Tração. Análise Não-Linear. Análise de Elementos Finitos.

ABSTRACT

Currently, the use of stainless steel in structural elements is considered an extravagant solution to structural engineering's problems. However, changes in attitudes within civil construction, global transition to sustainable development and environmental impacts reduction have certainly caused an increase in the use of stainless steel. Today, the codes for design of stainless steel are largely based on assumed analogies with the behavior of structures developed with carbon steel. However, stainless steel present four non-linear tension versus strain curves (tension and compression, parallel and perpendicular to the lamination material) without yielding plateau and strain hardening zones clearly defined, thus changing the overall behavior of the structures that use it. In Structural elements subjected to axial forces of tension, the net section rupture usually represents one of its controlling ultimate limit states. In order to evaluate the tensile resistance of structural components bolted stainless steel S304, this work provides a numerical model based on the finite element method using the program ANSYS (version 11). The non-linear of the material was considered by the criterion of Von Mises and stress versus strain true curves. The geometric nonlinearity was introduced into the model through the formulation of Lagrange Updated. The numerical model was calibrated based on experimental results, from rigid alternate bolted connection, which do not occur any rotation among the members, transferring any bending moment, only normal and shear internal forces.

Keywords: Stainless Steel Structures. Bolted connection. Tension strength. Non-Linear Analysis. Finite Element Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Stonecutters Bridge - China (www.nickelinstitute.org, 2008).....	21
Figura 2 – Curva tensão <i>versus</i> deformação - aço carbono e aço inoxidável, Santos (2008).....	22
Figura 1.1 – Ligação em aço inoxidável	27
Figura 1.2 – Estados limites últimos em chapa aparafusada	28
Figura 1.3 – Definição dos parâmetros L e t.....	29
Figura 1.4 – Definição dos parâmetros e1, e2, s e p.....	30
Figura 1.5 – Limitação de parâmetros geométricos (EUROCODE 3, 2003).....	30
Figura 1.6 – Limitação de parâmetros geométricos (EUROCODE 3, 2003).....	31
Figura 1.7 – Evolução de tensões normais – placa sujeita a carregamento axial ...	31
Figura 2.1 – Ensaio experimental, Kuwamura (2002).	37
Figura 2.2 – Geometria do elemento SOLID45	38
Figura 2.3 – Geometria do elemento TARGET170	39
Figura 2.4 – Geometria do elemento CONTACT173.....	39
Figura 2.5 – Método de Newton Raphson a um incremento de carga, Ansys.....	40
Figura 2.6 – Interação seguinte, Ansys	41
Figura 2.7 – Geometria das ligações, Kim & Kuwamura (2007).....	45
Figura 2.8 – Curva tensão-deformação do aço inoxidável SUS304	46
Figura 2.9 – Elementos de contato.....	48
Figura 2.10 – Discretização do parafuso M12	48
Figura 2.11 – Aplicação do carregamento.....	49
Figura 2.12 – Detalhe das condições de contorno modelos.....	50
Figura 2.13 – Detalhe da simetria, SC2-4	50
Figura 2.14 – Detalhe da espessura	51
Figura 2.15 – Discretização da chapa do modelo SA2-2	52
Figura 2.16 – Gráficos com resultados numérico SA2-2	53
Figura 2.17 – Pontos para análise de tensões e deformações.....	55
Figura 2.18 – Tensões de Von Mises, modelo SA2-2 Malha 3 (em MPa).....	56
Figura 2.19 – Discretização da chapa do modelo SB2-4	58
Figura 2.20 – Gráficos com resultados numérico SB2-4	59
Figura 2.21 – Pontos para análise de tensões e deformações.....	60

Figura 2.22 – Tensões de Von Mises, modelo SB2-4 Malha 2 (em MPa).....	61
Figura 2.23 – Discretização da chapa do modelo SC2-4	63
Figura 2.24 – Gráficos com resultados numérico SC2-4.....	64
Figura 2.25 – Pontos para análise de tensões e deformações, SC2-4	66
Figura 2.26 – Tensões de Von Mises (em MPa), modelo SC2-4 - Malha 2	66
Figura 3.1 – Esquema de ligação, Santos (2008)	68
Figura 3.2 – Esquema experimental, Santos (2008)	69
Figura 3.3 – Curva tensão <i>versus</i> deformação (Dieter, 1981).....	70
Figura 3.4 – Curva de Ramberg-Osgood (Ramberg, W., & Osgood, W. R., 1943). 72	
Figura 3.5 – Corpo-de-prova, Santos (2008).....	73
Figura 3.6 – Detalhe do parafuso ASTM A325 M12 cl. 8.8, Santos (2008).....	74
Figura 3.7 – Caminhos de ruptura possíveis para a ligação em estudo, Santos (2008).....	74
Figura 3.8 – Esquema da ligação aparafusada alternada, Santos (2008).....	75
Figura 3.9 – Detalhe do extensômetro, Santos (2008).....	75
Figura 3.10 – Posicionamento dos extensômetros - Ensaio E3_CARB_S50, Santos (2008).....	76
Figura 3.11 – Cotas dos extensômetros em milímetros - Ensaio E3_CARB_S50, Santos (2008).....	76
Figura 3.12 – Desenho geométrico do ensaio E5_INOX_S50, Santos (2008)	78
Figura 3.13 – Seqüência de ruptura do ensaio E5_INOX_S50, Santos (2008).....	79
Figura 3.14 – Corte apresentado no parafuso do ensaio E5_INOX_S50, Santos (2008).....	79
Figura 3.15 – Gráfico carga <i>versus</i> deformação - E5_INOX_S50, Santos (2008)	80
Figura 3.16 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento - E5_INOX_S50, Santos (2008) .	80
Figura 3.17 – Desenho geométrico do ensaio E7_INOX_S30, Santos (2008)	81
Figura 3.18 – Seqüência de ruptura do ensaio E7_INOX_S30, Santos (2008).....	82
Figura 3.19 – Gráfico carga <i>versus</i> deformação - E7_INOX_S30, Santos (2008)	83
Figura 3.20 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento - E7_INOX_S30, Santos (2008) .	83
Figura 3.21 – Desenho geométrico do ensaio E9_INOX_S23, Santos (2008)	84
Figura 3.22 – Seqüência de ruptura do ensaio E9_INOX_S23, Santos (2008).....	85
Figura 3.23 – Gráfico carga <i>versus</i> deformação - E9_INOX_S23, Santos (2008)	85
Figura 3.24 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento - E9_INOX_S23, Santos (2008) .	86
Figura 4.1 – Curva tensão <i>versus</i> deformação, aço inoxidável 304	88

Figura 4.2 – Curva tensão <i>versus</i> deformação, aço carbono	89
Figura 4.3 – Modelo numérico proposto	90
Figura 4.4 – Região restringida, UZ	90
Figura 4.5 – Região restringida do parafuso nas direções UY e UZ	91
Figura 4.6 – Carregamento aplicado	92
Figura 4.7 – Elementos de contato.....	93
Figura 4.8 – Discretização dos elementos.....	94
Figura 4.9 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento	95
Figura 4.10 – Discretização dos elementos, ENSAIO E5_INOX_S50.....	96
Figura 4.11 – Gráficos com resultados numérico ENSAIO E5_INOX_S50	96
Figura 4.12 – Carga <i>versus</i> deformação – SG2 e SG4.....	97
Figura 4.13 – Carga <i>versus</i> deformação – SG3 e SG8.....	98
Figura 4.14 – Carga <i>versus</i> deslocamento – modelo numérico	98
Figura 4.15 – Distribuição de tensões, Von Mises – E5_INOX_S50 (em MPa)	100
Figura 4.16 – Deformada – Numérico <i>versus</i> experimental	101
Figura 4.17 – Discretização dos elementos, ENSAIO E7_INOX_S30.....	102
Figura 4.18 – Gráficos com resultados numérico ENSAIO E7_INOX_S30	102
Figura 4.19 – Carga <i>versus</i> deformação – SG2 e SG4.....	103
Figura 4.20 – Carga <i>versus</i> deformação – SG3 e SG8.....	104
Figura 4.21 – Carga <i>versus</i> deslocamento – modelo numérico	105
Figura 4.22 – Distribuição de tensões de Von Mises – E7_INOX_S30 (em MPa) ..	106
Figura 4.23 – Deformada – Numérico <i>versus</i> experimental	107
Figura 4.24 – Discretização dos elementos, ENSAIO E9_INOX_S23.....	107
Figura 4.25 – Gráficos com resultados numérico ENSAIO E9_INOX_S23	108
Figura 4.26 – Carga <i>versus</i> deformação – SG2 e SG4.....	109
Figura 4.27 – Carga <i>versus</i> deformação – SG3 e SG8.....	109
Figura 4.28 – Carga <i>versus</i> deslocamento – modelo numérico	110
Figura 4.29 – Distribuição de tensões de Von Mises – E9_INOX_S23 (em MPa) ..	111
Figura 4.30 – Deformada – Numérico <i>versus</i> experimental	112
Figura 4.31 – Carga <i>versus</i> deslocamento – Modelos numéricos.....	114
Figura 4.32 – Deformações plásticas equivalente – Todos modelos numéricos	115
Figura 5.1 – Modelos propostos.....	118
Figura 5.2 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento	119
Figura 5.3 – Distribuição de tensões de Von Mises – todos modelos (em MPa)...	120

Figura 5.4 – Deformação plástica equivalente – Todos modelos	121
Figura 5.5 – Modelos adicionais propostos	123
Figura 5.6 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento	124
Figura 5.7 – Distribuição de tensões de Von Mises – Todos modelos (em MPa) .	125
Figura 5.8 – Deformação plástica equivalente – Todos modelos	126
Figura 5.9 – Curva carga <i>versus</i> deformação – Todos os modelos	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Legenda para o modo de falha.....	43
Tabela 3.2 – Resultados experimentais	46
Tabela 3.3 – Propriedades físicas	47
Tabela 3.4 – Resultados (Numérico X Experimental).....	54
Tabela 3.5 – Resultados (Numérico X Kim & Kuwamura).....	54
Tabela 3.6 – Comparação dos resultados - espessura	56
Tabela 3.7 – Resultados (Numérico X Experimental).....	60
Tabela 3.8 – Resultados (Numérico X Kim & Kuwamura).....	60
Tabela 3.9 – Comparação dos resultados - espessura	61
Tabela 3.10 – Resultados (Numérico X Experimental).....	65
Tabela 3.11 – Resultados (Numérico X Kim & Kuwamura).....	65
Tabela 3.12 – Comparação dos resultados - espessura	67
Tabela 4.1 – Configuração dos ensaios experimentais.....	77
Tabela 5.1 – Resumo dos resultados experimentais e numéricos	113
Tabela 6.1 – Resumo dos resultados numéricos	119
Tabela 6.2 – Configuração dos ensaios experimentais.....	122
Tabela 6.3 – Resumo dos resultados numéricos	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACESITA	Fábrica de Aço - Inox do Brasil S/A
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
EUROCODE	European Committee for Standardisation
DEC	Departamento de Engenharia Civil
ITUC	Instituto de Tecnologia da PUC

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área do parafuso
A_g	área bruta da seção transversal da chapa experimental
A_{net}	área total líquida da seção transversal da chapa experimental
d	diâmetro do parafuso
d_0	diâmetro do furo
e	deformação convencional
E	módulo de elasticidade
e_1	distância paralela a direção da força da linha de parafuso até a borda
e_2	distância perpendicular a direção da força da linha de parafuso até a borda
e_3	distância perpendicular ao furo alongado do seu centro até a borda
e_4	distância paralela ao furo alongado do seu primeiro centro até a borda
$F_{b,rd}$	resistência ao esmagamento
f_u	tensão última da placa experimental
f_{up}	tensão última do parafuso
f_{ured}	tensão última da placa inoxidável reduzida
$F_{v,rd}$	resistência ao cisalhamento por cada plano de corte
f_y	tensão limite de escoamento da placa experimental
g	distância entre linhas de parafusos no sentido transversal ao da força aplicada
k	constante que depende do tipo de material
k_r	fator de redução para o aço inoxidável
k_1	fator de correção em função do posicionamento dos parafusos
L	largura da placa
m_1	índice não linear
n	número de parafusos
$N_{pl,rd}$	força última de projeto de escoamento da seção bruta
$N_{u,rd}$	força última de projeto de ruptura da seção líquida
$N_{t,rd}$	força normal de tração de projeto da ligação
p	distancia entre linhas de parafusos no sentido perpendicular ao da força aplicada
p_1	distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força

p_2	distância entre furos de mesma linha na direção transversal a força
$p_{1,0}$	primeira distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força
$p_{1,i}$	distâncias seguidas entre furos, mesma linha e direção da força
r	número de parafusos numa seção dividido pelo número total de parafusos da ligação e o valor de u , dado por $2e_2$
s	distância entre linhas de parafusos no sentido paralelo ao da força aplicada
t	espessura da chapa experimental
u	constante usada no cálculo da ligação inoxidável, cujo valor é igual a $2e_2$
α	constante que determina deformação além do escoamento
α_b	fator de correção em função da tensão última e posicionamento dos parafusos
α_v	fator que depende da classe do aço
ε	deformação
$\varepsilon_{0,2}$	deformação a 0,2%
ε_1	deformação a 0,1%
ε_2	deformação a 1%
σ	tensão
σ_0	tensão elástica
$\sigma_{0,2}$	tensão a 0,2%
σ_1	tensão limite de escoamento para deformação de 0,1%
γ_{M0}	coeficiente de resistência
γ_{M2}	coeficiente de resistência

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	
1	LIGAÇÕES APARAFUSADAS SUBMETIDAS A TRAÇÃO	26
1.1	Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada	29
1.2	Dimensionamento de ligações aparafusados segundo a norma europeia EUROCODE 3 (EUROCODE 3, 2003)	30
1.2.1	<u>Dimensionamento de Ligações em Aço Inoxidável</u>	32
2	CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	36
2.1	Introdução	36
2.2	Observações sobre o modelo numérico	37
2.2.1	<u>Elemento finito SOLID45</u>	38
2.2.2	<u>Elemento finito de contato TARGET170 e CONTACT173</u>	39
2.2.3	<u>Análise não-linear – Ansys (versão 11)</u>	40
2.2.4	<u>Lei constitutiva do material</u>	42
2.2.5	<u>Critérios de ruína</u>	43
2.3	Resultados experimentais para calibração	45
2.4	Análise dos resultados – experimental versus numérico	47
2.4.1	<u>Elementos de contato</u>	47
2.4.2	<u>Parafusos</u>	48
2.4.3	<u>Condições de contorno</u>	49
2.4.4	<u>Modelo com um furo (SA)</u>	51
2.4.4.1	Malha de elementos finitos	52
2.4.4.2	Análise dos resultados numéricos	53
2.4.5	<u>Modelo com dois furos (SB)</u>	56
2.4.5.1	Malha de elementos finitos	57
2.4.5.2	Análise dos resultados numéricos	58
2.4.6	<u>Modelo com quatro furos (SC)</u>	62
2.4.6.1	Malha de elementos finitos	62
2.4.6.2	Análise dos resultados numéricos	63
3	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS	68
3.1	Introdução	68
3.2	Apresentação dos Ensaio de Tração	69

3.2.1	<u>Tensão limite de escoamento</u>	70
3.2.2	<u>Resultados do ensaio de tração</u>	73
3.3	Caracterização dos ensaios	73
3.3.1	<u>Preparação da célula de carga para a medida e aferição das cargas aplicadas</u>	75
3.4	Apresentação dos ensaios experimentais	77
3.4.1	<u>Ensaio E5 INOX S50</u>	78
3.4.2	<u>Ensaio E7 INOX S30</u>	81
3.4.3	<u>Ensaio E9 INOX S23</u>	84
4	MODELO NUMÉRICO PARA CHAPAS COM FURAÇÃO DEFASADA .	87
4.1	Introdução	87
4.2	Crítérios gerais utilizados na análise numérica	87
4.2.1	<u>Condições de contorno</u>	89
4.2.2	<u>Carregamento aplicado</u>	91
4.2.3	<u>Elementos de contato</u>	92
4.2.4	<u>Malha de elementos finitos</u>	93
4.3	Análise dos resultados – experimental <i>versus</i> numérico	95
4.3.1	<u>Ensaio E5 INOX S50</u>	95
4.3.2	<u>Ensaio E7 INOX S30</u>	101
4.3.3	<u>Ensaio E9 INOX S23</u>	107
4.4	Sumário dos resultados experimentais e numéricos	112
5	ANÁLISE PARAMÉTRICA	117
5.1	Introdução	117
5.2	Estudo da espessura da placa-base	117
5.2.1	<u>Análise dos resultados</u>	118
5.3	Estudo do espaçamento entre furos	121
5.3.1	<u>Análise dos resultados</u>	122
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
6.1	Introdução	128
6.2	Conclusões	129
6.3	Trabalhos futuros	130
	REFERENCIAS	131

INTRODUÇÃO

O aço inoxidável possui propriedades únicas, as quais podem ser tomadas em benefício de uma ampla variedade de aplicações na indústria da construção civil. Entre estas características pode-se citar: alta resistência à corrosão, durabilidade, resistência ao fogo, facilidade de manutenção, aparência e estética, sendo o uso na construção civil ainda limitado pelo seu alto custo (GARDNER, 2006).

Os fabricantes de elementos em aço inoxidável têm buscado desenvolver seus processos de fabricação, onde os principais objetivos são: redução de custos, diminuição de emissões de gases poluentes, redução de prazos e aumento da qualidade do produto final. Estas melhorias têm contribuído para a redução do custo do aço inoxidável, dentro dos limites estabelecidos pelas dependências de matérias-primas. Seu custo hoje é estimado na ordem do dobro do custo do aço carbono (ACESITA - Fábrica de aço - Inox do Brasil S/A), colaborando para que o estudo mais profundo do comportamento mecânico do aço inoxidável, sob os diversos aspectos, seja cada vez mais relevante.

Muitos profissionais buscam estruturas modernas e arrojadas, porém com um comportamento social diferente em relação à produção em massa e o abundante consumismo, e devido à consciência ecológica e ao desenvolvimento, o conceito de durabilidade e sustentabilidade na construção civil ganhou muito mais importância. Neste contexto, o aço inoxidável apresenta-se como um material promissor para as construções que requeiram esta característica, visto que o mesmo é reciclável. Alguns exemplos da aplicação deste material podem ser visualizados na Figura 1: Ponte de Stonecutters, localizada na cidade de Hong Kong na China - Figura 1(a) - onde foram gastos 2000 toneladas de aço austenítico S322 em chapa de 20 a 30 mm de espessura e 2880 toneladas do aço austenítico S304 em barra de 50 mm de diâmetro, com previsão de durabilidade, ou seja, de dispensa de manutenção, por um período de 120 anos; na Figura 1(b) observa-se a peça em aço inoxidável que envolve a estrutura de concreto dando-lhe mais rigidez; pode-se ver na Figura 1(c) a mesma peça pelo lado interno, mostrando os conectores de cisalhamento que garantirão a união com o concreto armado que será introduzido no seu interior.

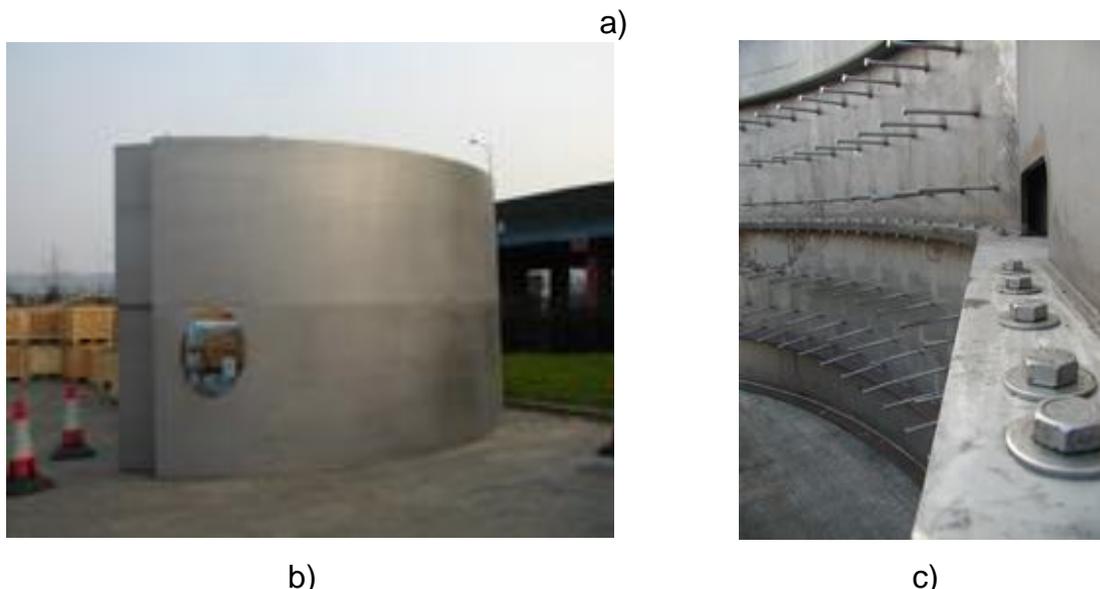


Figura 1 – Stonecutters Bridge - China (www.nickelinstitute.org, 2008)

O desenvolvimento de novos trabalhos tem ajudado na elaboração de normas e especificações para o uso do aço inoxidável, embora, antes, as normas obrigavam que, para determinados projetos estruturais, os engenheiros tivessem que fazer suas próprias investigações. No entanto, as normas atuais que fazem especificações para o uso de elementos estruturais constituídos por aço inoxidável (Eurocode 3, part 1.4, 2003) são, em grande parte, baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas de aço carbono. Porém, o comportamento do aço inoxidável diverge do aço carbono, apresentando curvas tensão *versus* deformação com características peculiares. O aço inoxidável apresenta uma curva sem patamar de escoamento e não-linear, como pode ser visto Figura 2.

Existe uma grande variedade de tipos de aço inoxidável devido à variação da composição química e ao tratamento térmico aplicado em sua fabricação. Para a engenharia estrutural existem dois grupos principais: Austenítico e Duplex. Todos estes são ligas de ferro, cromo, níquel e molibdênio em diferentes graus. A característica de resistência à corrosão dos aços inoxidáveis é dependente da quantidade de cromo usada e é reforçada pela adição de molibdênio e nitrogênio.

Neste trabalho utilizará o aço inoxidável austenítico S304¹. Estes têm propriedades diferentes do duplex, dentre as quais podem-se citar: resistência à corrosão e preço. O grupo de ligas de aço inoxidável austenítico contém níquel em um intervalo 8-20%, com vários elementos adicionais para alcançar as desejadas propriedades, tais como: dobramento, soldagem e boa resistência à corrosão. As propriedades mecânicas podem ser aumentadas com a conformação à frio.

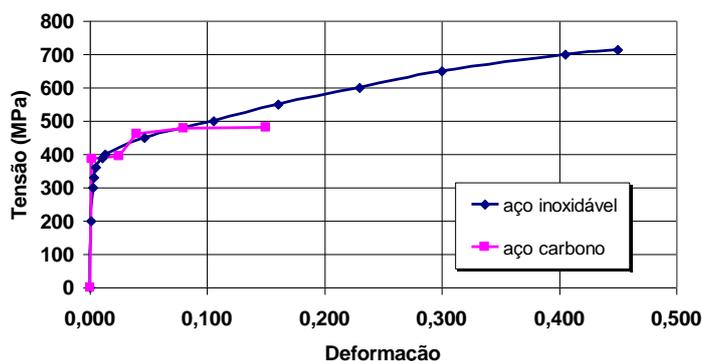


Figura 2 – Curva tensão versus deformação - aço carbono e aço inoxidável, (SANTOS, 2008)

Revisão bibliográfica

São apresentados, a seguir, resumos de trabalhos realizados ao longo dos anos, do assunto em estudo, ilustrando o desenvolvimento e a realização de temas para projetos baseados em análises do comportamento real de estruturas constituídas de aço inoxidável.

Cochrane (1922) propôs a utilização de uma fórmula ($s^2/4p$) para a avaliação da seção líquida de ligações aparafusadas com furos alternados. Esta mesma fórmula é usada em diversas normas de projetos por ser baseada em ensaios experimentais, no entanto, não está bem claro, até que ponto há o efeito do endurecimento do aço ou a relação entre a tensão última e a tensão de escoamento.

¹ www.chasealloys.co.uk/steel/austenitic/, 2008

Em 1997, Bursi; Jaspart 1997 realizaram modelagens utilizando elementos finitos para analisar a resposta de ligações T-Stub. O autor utilizou, para seu estudo, elementos tridimensionais.

Kouhi (2000); Burgan (2000); Gardner (2004) realizaram testes experimentais para validar os critérios que os códigos utilizavam para o dimensionamento de estruturas em aço inoxidável. Foram realizados ensaios para verificar a resistência à flambagem, ao momento fletor, ao esforço normal, critérios para as deformações, resistência ao fogo e à fadiga.

Van Den Berg (2000), em seu trabalho, verificou, a partir dos resultados experimentais obtidos em cinco volumes da Collected Papers of Cromio Steels Research Group, que as propriedades mecânicas indicadas no ASCE do aço inoxidável formado a frio precisam ser revistas para o dimensionamento das estruturas metálicas. A resistência do aço inoxidável aos esforços de tração e compressão encontradas nos ensaios são bem superiores aos valores preconizados no ASCE. O autor também concluiu que no dimensionamento de vigas e colunas faz-se necessário utilizar o módulo de elasticidade tangente para obter resultados mais confiáveis.

Chung (2000) desenvolveu modelos de elementos finitos utilizando elementos tridimensionais sólidos com o objetivo de investigar ligações em aço formado a frio e a quente submetidos ao cisalhamento. Foram realizados seis testes de tração em corpos-de-prova de aço galvanizado, com espessuras de 1,6 mm e 1,5 mm. As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios foram modificadas a partir do conceito de tensão e deformação verdadeiras. O autor utilizou o programa ANSYS (Versão 5.3) para uma avaliação paramétrica dos modelos, calibrando os mesmos a partir de ensaios experimentais. Em 2001, Chung estudou os critérios de ruína para uma ligação aparafusada submetida ao cisalhamento, utilizando também elementos finitos, visto que o mesmo em 2000, conseguiu calibrar o modelo com base nos resultados experimentais.

Aceti (2004) realizou em seu trabalho uma análise numérica para avaliar o comportamento de uma ligação aparafusada submetida ao cisalhamento. Verificou a importância das restrições dos nós ao redor do furo, impedindo os deslocamentos para fora do plano, simulando, assim, a presença de arruelas e cabeças dos parafusos. Desta forma, o autor concluiu que a diferença entre utilizar ou não esta metodologia é de no máximo 4%.

Kim; Kuwamura (2007) analisaram o colapso para uma ligação aparafusada em aço inoxidável submetida à tração. O autor analisou três critérios de ruína para avaliar a ruptura da ligação com chapas de um, dois ou quatro furos: ruptura da seção líquida, rasgamento da chapa e ruptura por bloco de cisalhamento. Na primeira análise numérica realizada foram utilizados elementos bidimensionais e tridimensionais do programa de elementos finitos Abaqus (versão 6.4). Para a segunda análise foram considerados elementos de contato. O autor também utilizou o conceito de tensão e deformação verdadeiras para representar a curva tensão *versus* deformação do material. O modelo numérico foi calibrando a partir de resultados experimentais obtidos por (KUWAMURA, 2002).

Santos (2008) trabalhou com o aço inoxidável S304 para realizar os ensaios experimentais, buscando avaliar o comportamento de uma chapa de 3 mm de espessura, com furação defasada submetida à tração, de modo, a analisar a carga de ruína e o modo de colapso, através de ensaios experimentais.

Motivação

No atual estado do desenvolvimento da engenharia estrutural, procura-se obter projetos que atendam às especificações do cliente e normas técnicas, mas também, que proporcione menores custos. Desta forma, uma das maneiras de se avaliar uma estrutura é obter informações corretas de suas ligações, porque desempenham um papel extremamente importante para a análise global da estrutura. Muitos trabalhos de pesquisa têm sido realizados, sendo que a principal motivação destes trabalhos tem caráter científico, com o objetivo de buscar soluções mais econômicas, métodos alternativos para análise estrutural e conhecimento das propriedades físicas e químicas de novos materiais.

Com o advento de mais ferramentas computacionais, uma avaliação por métodos numéricos ganhou importância na análise de estruturas. Junto com resultados experimentais, os programas computacionais estão cada vez mais presentes nas análises do comportamento de estruturas. A utilização de um método numérico permite uma investigação paramétrica mais ampla do comportamento de ligações devido à redução dos custos envolvidos na realização de ensaios

experimentais em laboratório. Sendo assim, estes fatos motivaram a presente investigação, que envolve o estudo de ligações aparafusadas submetidas ao cisalhamento, utilizando o método dos elementos finitos para uma avaliação paramétrica a partir da calibração do modelo com resultados experimentais obtidos por (SANTOS, 2008).

Objetivos

Este trabalho busca fazer uma avaliação entre os resultados obtidos por um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos através do programa Ansys - versão 11 (2007) e os resultados de ensaios experimentais de placas de aço inoxidável de espessura de 3 mm, submetidas a tração com furação alternada. Esta investigação visa obter uma maior confiabilidade nas análises dos resultados apresentados pelos ensaios experimentais, como carga última, modo de ruptura da área líquida e escoamento da seção bruta das chapas com furação alternada, além de verificar a validade da utilização da formulação que a norma europeia (Eurocode 3, 2005) preconiza para o dimensionamento de peças tracionadas de aço inoxidável.

Estrutura da dissertação

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, um breve resumo dos trabalhos que foram realizados ao longo dos anos e uma breve descrição do conteúdo do presente trabalho.

No capítulo dois são apresentadas algumas considerações sobre ligações aparafusadas e uma descrição detalhada do dimensionamento das ligações segundo recomendações do Eurocode 3 (EUROCODE 3, 2003).

No capítulo três faz-se uma análise da malha de elementos finitos que será utilizada na presente dissertação, calibrando a mesma através de ensaios experimentais realizados por Kuwamura (2002), e também, comparando-a através

de resultados de modelo numéricos obtidos por Kim; Kuwamura (2007) em um programa de elementos finitos distinto ao que será utilizado nesta dissertação.

No capítulo quatro são descritos os ensaios experimentais realizados por Santos (2008), no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Também é apresentado neste capítulo a caracterização mecânica e geométrica das peças utilizadas nos ensaios, além dos próprios resultados experimentais obtidos por (SANTOS, 2008).

O capítulo cinco apresenta uma descrição das características dos modelos de elementos finitos utilizados na presente análise com base na comparação com resultados experimentais de placas com furação defasada submetidas a tração alcançados em Santos (2008). Utiliza-se para esta comparação, a melhor configuração de malha resultante da análise do capítulo três.

No capítulo seis é apresentada uma análise paramétrica com o objetivo de avaliar a influência da distância horizontal entre furos bem como avaliar a variação da espessura da placa-base .

Finalmente, no capítulo sete, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

1 LIGAÇÕES APARAFUSADAS SUBMETIDAS A TRAÇÃO

A palavra ligações aplica-se a todos os detalhes construtivos que promovam a união de partes da estruturas entre si ou a sua união com elementos externos. Estas são um elo muito importante que permitem transferir cargas de um elemento para outro, e qualquer erro na concepção estrutural, mal dimensionamento, erro de

execução ou erro na fabricação das peças pode causar a ruína de uma estrutura por completo. A Figura 1.1 apresenta um exemplo típico de uma ligação aparafusada em aço inoxidável realizada no Aeroporto Sá Carneiro, na cidade do Porto, em Portugal.



Figura 1.1 – Ligação em aço inoxidável

Existem vários tipos de elementos que servem para unir elementos estruturas. Os mais comuns são: rebite, parafusos e solda. Porém, até a década de 50 os rebites eram o dispositivo mais utilizado, no entanto, na atualidade, perderam muita força para os parafusos e soldas. Os parafusos têm vantagens relevantes com relação à soldas: menores custos na execução, dispensa de escoramentos, redução do tempo de montagem, redução do consumo de energia elétrica e não precisa de mão-de-obra especializada. Contudo, as ligações aparafusadas tendem a diminuir a resistência à tração das seções, já que criam no elemento estrutural uma nova análise que deverá ser feita para a resistência transversal do elemento devido à existência de furos. A Figura 1.2 ilustra cinco possíveis modos de ruptura de ligações aparafusadas, cujo comportamento estrutural será abordado mais adiante.

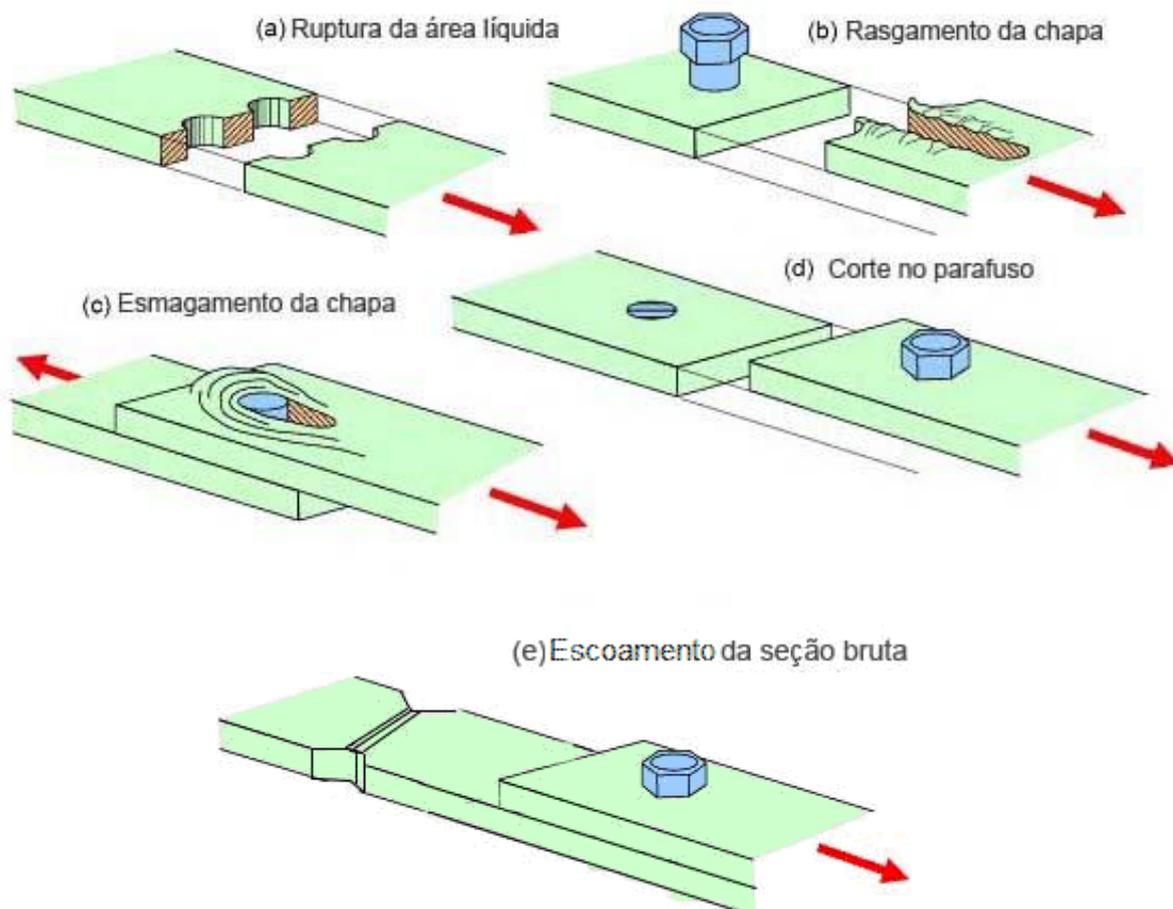


Figura 1.2 – Estados limites últimos em chapa aparafusada²

No caso (a) representado na Figura 1.2, ocorre uma ruptura da seção transversal líquida da peça, ou seja, com a existência de furos, há uma diminuição da seção transversal efetiva. Quanto mais furos estiverem presentes na seção transversal bruta da chapa, menor será a sua seção líquida e, ocasionando perda de resistência. No caso (b), ocorre uma ruptura por rasgamento da peça devido à presença do parafuso mais resistente, provocando tensões cisalhantes no metal-base da chapa. A ruptura só ocorre se, no metal-base, a distância disponível resistente ao rasgamento for insuficiente. Mais a frente, serão mostrados os parâmetros da ligação aparafusada e as suas limitações. No caso (c), ocorre uma ruptura por esmagamento da peça, também devido à presença do parafuso. Este esmagamento ocorre devido às altas tensões de compressão que se processam na

² O endereço eletrônico é: www.chasqueweb.ufrgs.br

superfície de contato do parafuso com o metal-base da chapa. No caso (d) ocorre a ruptura do parafuso por cisalhamento, caracterizada quando um número insuficiente de parafusos é adotado. Finalmente, no caso (e), ocorre a plastificação da seção bruta devido à elevada relação entre a tensão limite de escoamento e a tensão limite de ruptura.

1.1 Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada

Na Figura 1.3 são apresentados os parâmetros geométricos t e L onde representam, respectivamente, a espessura e a largura da chapa.

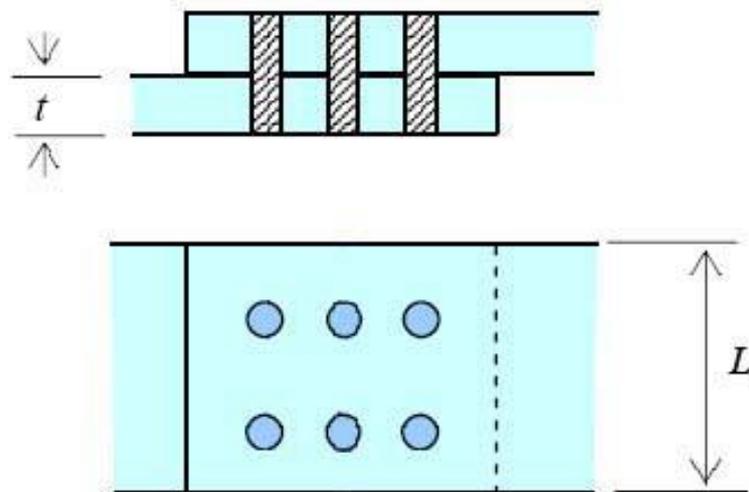


Figura 1.3 – Definição dos parâmetros L e t

Na Figura 1.4 são apresentados os parâmetros geométricos s e p e as distâncias à borda e_1 e e_2 .

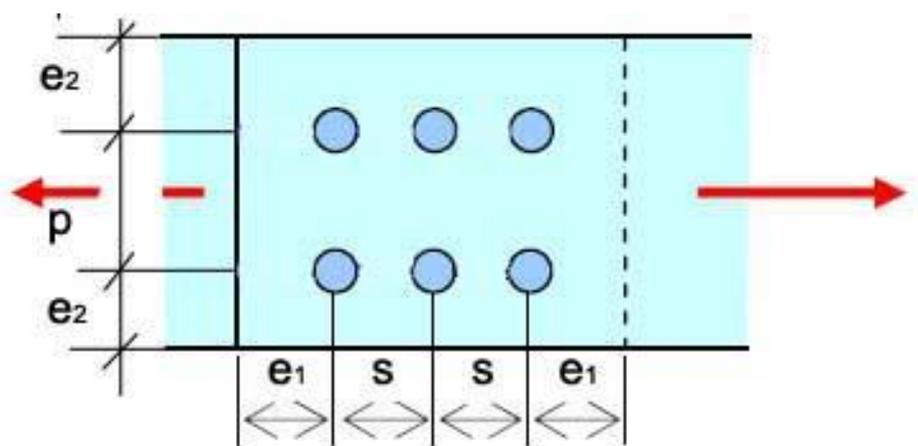


Figura 1.4 – Definição dos parâmetros e_1 , e_2 , s e p

E na Figura 1.5 e na Figura 1.6 apresentam-se os limites dos parâmetros geométricos utilizados pela Norma Europeia EUROCODE 3 Part 1-8 (EUROCODE 3, 2003).

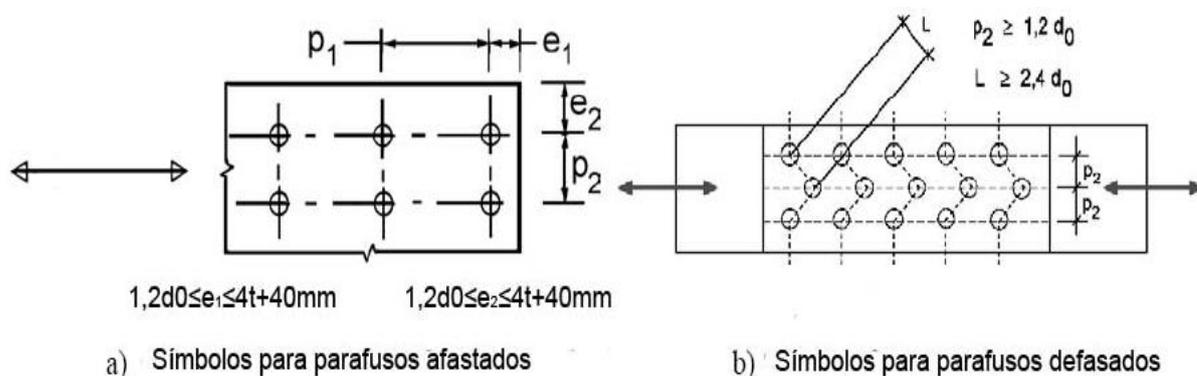


Figura 1.5 – Limitação de parâmetros geométricos (EUROCODE 3, 2003)

1.2 Dimensionamento de ligações aparafusadas segundo o EUROCODE 3

Conforme mencionado anteriormente em uma chapa com presença de furo, o colapso pode ser evidenciado quando ocorrer o escoamento da área bruta ou a

⁴ www.chasqueweb.ufrgs.br

ruptura da área líquida. Na Figura 1.7, apresenta-se o comportamento de chapas com furo sujeita a um esforço de tração devido a uma carga axial crescente monotônica.

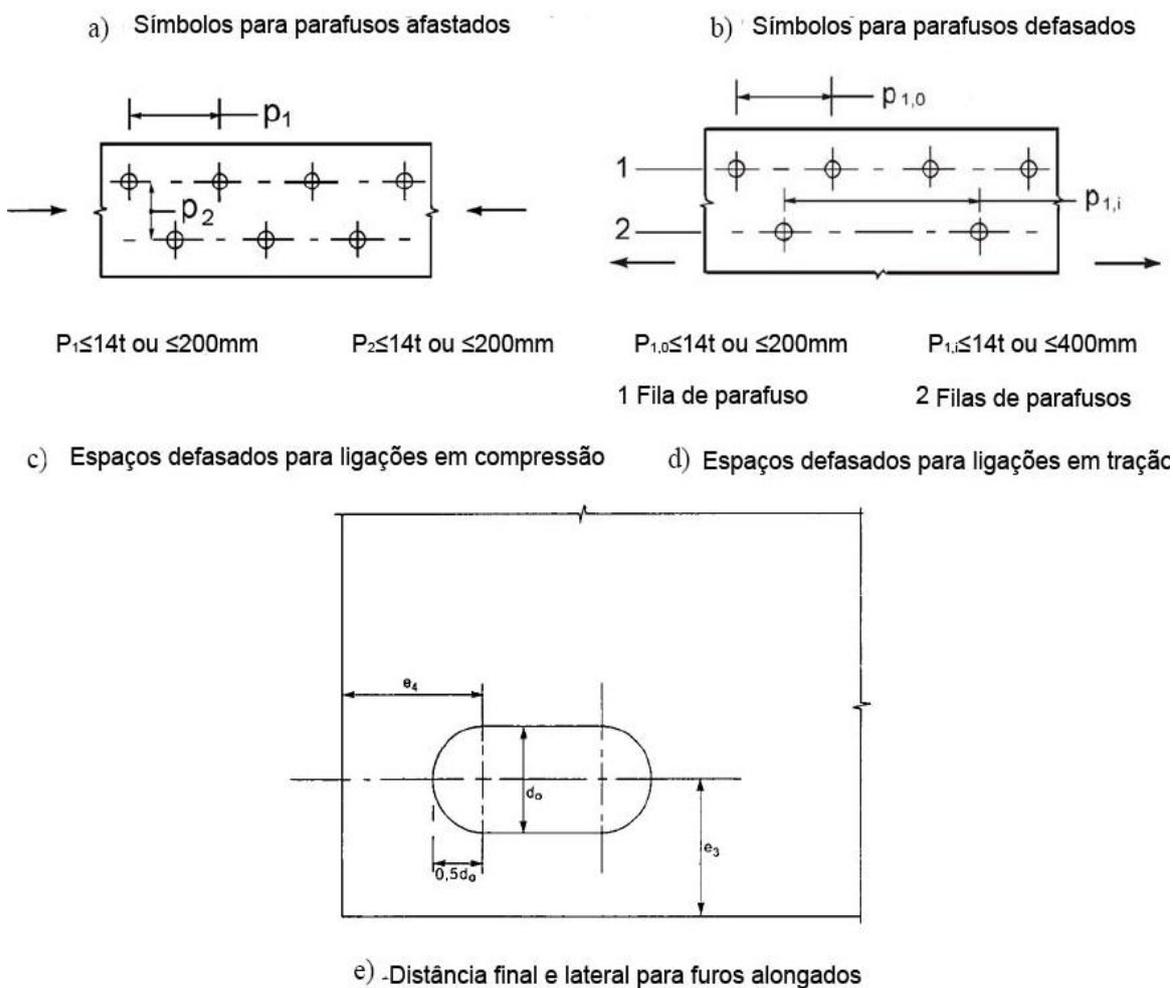


Figura 1.6 – Limitação de parâmetros geométricos (EUROCODE 3, 2003)

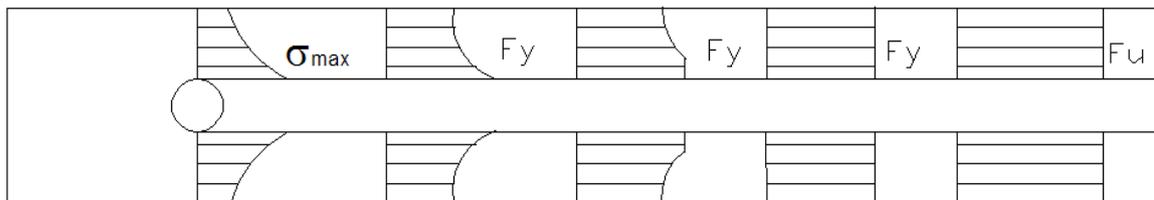


Figura 1.7 – Evolução de tensões normais – placa sujeita a carregamento axial

Com o furo, a área bruta da seção transversal diminui provocando o escoamento precoce da seção da chapa, no entanto, a carga que leva ao colapso a estrutura será a mesma. Com a presença de mais furos nesta seção, e estes com defasagem, dificulta-se a identificação da seção mais crítica da peça.

1.2.1 Dimensionamento de Ligações em Aço Inoxidável

Para o dimensionamento de ligações aparafusadas constituídas de aço inoxidável, foi utilizada a norma europeia EUROCODE 3 (2005), pois a norma brasileira NBR 8800 não apresenta o cálculo para estruturas em aço inoxidável. A norma europeia estabelece, em seu item 5.3.3, que a resistência à tração deverá ser o menor valor entre a resistência plástica da seção bruta, $N_{pl,rd}$ e a resistência última da seção líquida $N_{u,rd}$ obtidas através das equações (1.1) e (1.2), respectivamente.

$$N_{pl,rd} = \frac{A_g \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (1.1)$$

$$N_{u,rd} = \frac{k_r \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M2}} \quad (1.2)$$

$$\frac{N_{u,rd}}{N_{t,rd}} \geq 1,0 \quad \frac{N_{pl,rd}}{N_{t,rd}} \geq 1,0 \quad (1.3)$$

onde:

$N_{t,rd}$ é a força normal de tração de projeto da ligação que deverá ser menor ou igual às duas resistências: $N_{pl,rd}$ e $N_{u,rd}$;

A é a menor área bruta da seção transversal da ligação;

A_{net} é a sua área líquida;

f_y é a tensão limite de escoamento;

f_u é a tensão limite de ruptura a tração da chapa;

γ_{M0} e γ_{M2} são coeficientes de resistência.

k_r é um fator de redução.

Para obtenção da área líquida da seção transversal da ligação basta aplicar a seguinte equação:

$$A_{\text{net}} = A - n \times d \times t \quad (1.4)$$

onde:

n é quantidade de furos contidos na linha de ruptura da seção transversal;

d é o diâmetro do furo na direção perpendicular à solicitação;

t é a espessura da parte conectada em análise.

Para o caso de ligações aparafusadas com parafusos alternados, utiliza-se a fórmula desenvolvida por Crochane (1922) e ainda presente no EUROCODE 3, Part 1.1, item 6.2.2.2:

$$A_{\text{net}} = A - t \left[n \times d - \sum \left(\frac{s^2}{4 \times p} \right) \right] \quad (1.5)$$

onde:

s é a distância entre os centros dos furos na direção de aplicação da força;

p é a distância entre os centros dos furos na direção perpendicular da aplicação da força, Figura 1.4.

Para o fator de redução k_r , aplica-se a seguinte fórmula:

$$k_r = \left(1 + 3r \left(\frac{d}{u} - 0,3 \right) \right) \leq 1,0 \quad (1.6)$$

sendo que r é o número de parafusos numa seção dividido pelo número total de parafusos da ligação e o valor de u , dado por $2e_2$, que é o dobro da distância entre o centro do furo até a borda na direção perpendicular da transferência da carga, porém menor ou igual a p_2 que é a distância entre os centros dos furos na direção perpendicular da transferência da carga.

Embora a resistência ao esmagamento de uma ligação aparafusada em aço inoxidável seja normalmente governada pela necessidade de limitar o alongamento do furo quando solicitada por uma carga de trabalho, uma verificação em separado

deve ser feita para prevenir este efeito no seu estado limite último substituindo o f_u por $f_{u,red}$ dado pela equação (2.7) a seguir.

$$f_{u,red} = 0,5f_y + 0,6f_u \quad (1.7)$$

A norma europeia EUROCODE 3, Parte 1.8 (2005) para dimensionamento de ligações aparafusadas em estruturas de aço, também estabelece critérios de avaliação da menor resistência na região dos parafusos a serem observados no cálculo de ligações aparafusadas submetidas à tração.

Neste trabalho, foram utilizados os seguintes critérios para avaliar a resistência dos parafusos: resistência ao cisalhamento por cada plano de corte, equação (1.8) e resistência ao esmagamento, equação (1.9).

$$F_{v,rd} = \frac{\alpha_v \times f_{up} \times A}{\gamma_{M2}} \quad (1.8)$$

$$F_{b,rd} = \frac{\alpha_1 \times \alpha_b \times f_{u,red} \times d \times t}{\gamma_{M2}} \quad (1.9)$$

onde, na equação (1.8):

f_{up} é a tensão última do parafuso;

α_v tem seu valor definido pelo tipo de parafuso e onde ocorre o plano de corte.

Na equação (1.9):

α_b é o menor valor entre:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_d \\ f_{ub}/f_u \\ 1,0 \end{array} \right.$$

Sendo que:

α_d é analisado na direção da transferência da força:

sendo definido para os parafusos localizados na borda igual a $e_1/3d_0$;

e para os parafusos centrais igual a $p_1/3d_0-1/4$.

k_1 é analisado na direção perpendicular à transferência da força sendo definido: para os parafusos da borda:

$$2,8e_2/d_0-1,7 \text{ ou } 2,5.$$

e para os parafusos centrais:

$$1,4p_2/d_0-1,7 \text{ ou } 2,5.$$

onde o menor valor é sempre adotado.

No presente trabalho, os coeficientes de resistência foram tomados igual a 1 para dimensionar as ligações aparafusadas a serem utilizadas nos modelos numéricos e, assim, calibrar o real comportamento da ligação aparafusada nos ensaios experimentais realizados por Santos (2008). Vale ainda ressaltar que neste trabalho não foram utilizados parafusos constituídos de aço inoxidável.

Neste capítulo, foram apresentadas algumas considerações sobre o dimensionamento de ligações aparafusadas submetidas à tração, utilizando o código europeu (EUROCODE 3, Part. 1.4, 2005) para o dimensionamento de estruturas em aço inoxidável. O próximo capítulo conterà a calibração do modelo numérico proposto, utilizando resultados experimentais de Kuwamura (2002) e os resultados numéricos obtidos por Kim; Kuwamura (2007), pois o principal objetivo do presente trabalho é fazer uma análise numérica dos resultados experimentais obtidos no trabalho de (SANTOS, 2008).

2 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

2.1 Introdução

A simulação de estruturas reais em modelos computacionais representa uma ligação importante com as análises experimentais, as deduções analíticas e a implementação de formulações numéricas no atual momento da modernidade para o estudo do comportamento estrutural. Uma análise numérica permite avaliar a resposta de uma determinada estrutura, de modo a objetivar a formulação implementada, a sua extensão para outros materiais e a aplicabilidade das condições de carregamento. Os métodos numéricos são capazes de transformar estruturas contínuas em sistemas discretos, com números finitos de graus de liberdade.

Entre os métodos numéricos, o mais conhecido é o método de elementos finitos (MEF) que prevê a divisão do domínio de integração em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos, interconectadas entre si através de um número discreto de pontos nodais. Atualmente, a modelagem por este método apresenta-se como uma ferramenta indispensável para a elaboração de projetos de engenharia, e para que haja uma aproximação dos resultados reais das estruturas é necessária a escolha ideal da quantidade e tipos de elementos finitos, da forma adequada para cada tipo de problema.

Segundo Chung; Ip (2000), a primeira modelagem numérica de ligação aparafusada utilizando elementos finitos tridimensionais foi realizada e apresentada por 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.

Em Kim; Kuwamura (2007) é apresentada uma modelagem de uma ligação aparafusada em aço inoxidável austenítico SUS304, no campo bidimensional e tridimensional, simulando elementos de contato. Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com resultados experimentais obtidos por Kuwamura (2002), ver Figura 2.1.



Figura 2.1 – Ensaio experimental, (KUWAMURA, 2002)

Tendo em vista os bons resultados apresentados em Kim; Kuwamura (2007), no presente trabalho, foram realizadas simulações numéricas, fazendo uma análise não-linear geométrica e física, para reproduzir os modelos do autor de forma a calibrar a estrutura da malha proposta para posterior comparação com os ensaios experimentais de Santos (2008). Foram utilizados elementos finitos tipo sólido, para simular as placas e o parafuso. Para simular o contato entre placa e parafuso, foram utilizados elementos finitos do tipo contato. As simulações numéricas foram realizadas no programa Ansys - versão 11 (2007), elaborado com base no Método dos Elementos Finitos.

2.2 Observações sobre o modelo numérico

O Ansys - versão 11 (2007) é um programa com base no método dos elementos finitos, com uma gama de elementos, e uma diversificação de ferramentas. No trabalho de Kim; Kuwamura (2007), foi utilizado o programa Abaqus (Versão 6.4). Desta forma, para uma comparação mais confiável foram escolhidos elementos finitos com as mesmas características no Ansys. Para o presente

trabalho, foram reproduzidos apenas os modelos com elementos tridimensionais, devido ao fato de que, os elementos bidimensionais não conseguem reproduzir o efeito de contato entre o fuste do parafuso e a borda da placa.

A seguir, faz-se um breve comentário sobre os elementos finitos escolhidos para a modelagem, com as respectivas figuras, extraídas do manual de instruções do programa Ansys - versão 11 (2007), e os critérios utilizados para a modelagem.

2.2.1 Elemento finito SOLID45

O elemento finito SOLID45, ilustrado na Figura 2.2, é um elemento tridimensional que possui oito nós, com três graus de liberdade por nó, referentes às translações nas direções X, Y e Z (coordenadas globais). Possui características de plasticidade, admitindo a utilização de um diagrama multilinear para a representação do material, além de trabalhar com grandes deformações.

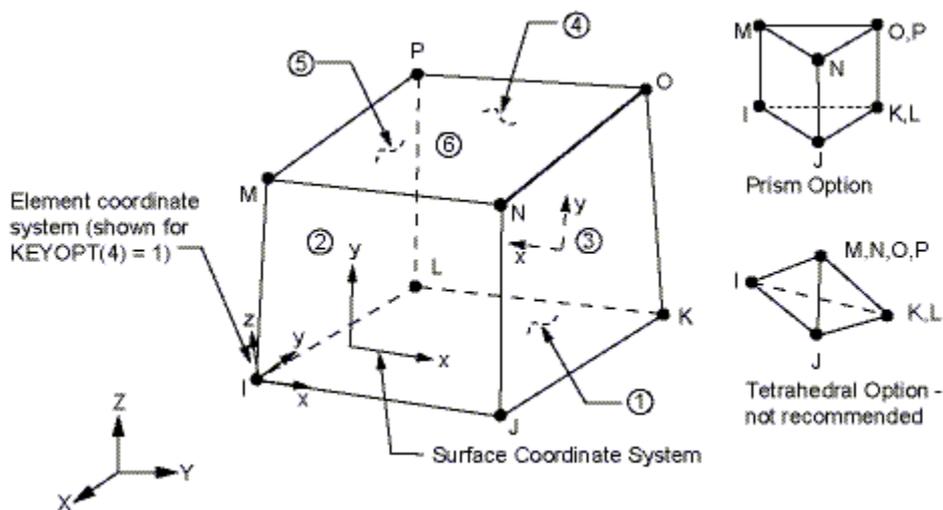


Figura 2.2 – Geometria do elemento SOLID45

2.2.2 Elemento finito de contato TARGET170 e CONTACT173

O elemento finito TARGET170, ilustrado na Figura 2.3, é usado para representar uma superfície de contato tridimensional junto com o elemento CONTACT173, ilustrado na Figura 2.4. Estes elementos possuem as mesmas características do elemento (SOLID45) a que estão associados, ou seja, possuem oito nós, com três graus de liberdade por nó, referentes às translações nas direções X, Y e Z (coordenadas globais).

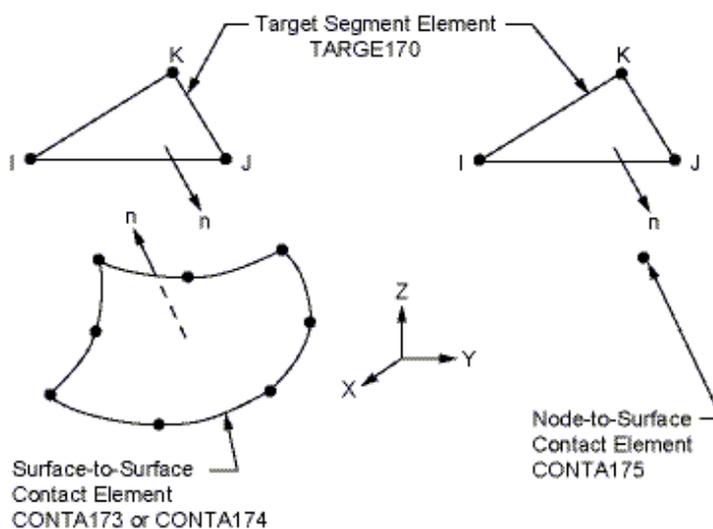


Figura 2.3 – Geometria do elemento TARGET170

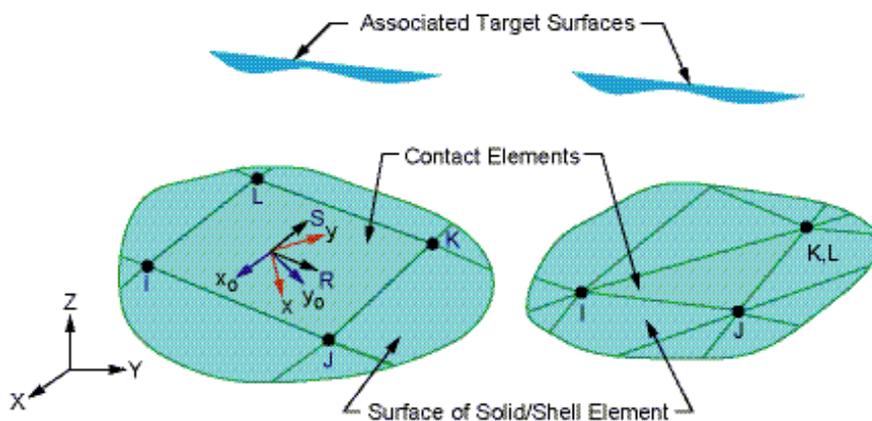


Figura 2.4 – Geometria do elemento CONTACT173

2.2.3 Análise não-linear – Ansys - versão 11 (2007)

Uma análise não-linear por elementos finitos utiliza métodos iterativos incrementais na procura da menor diferença entre as forças internas e externas. Um dos métodos que o programa Ansys - versão 11 (2007) utiliza para este fim é o Método Newton-Raphson. Este método baseia-se na implementação de incrementos de carga em várias iterações de equilíbrio, atingindo gradualmente a condição de equilíbrio com erros pequenos. A Figura 2.5, ilustra a execução iterativa deste método para um incremento de carga.

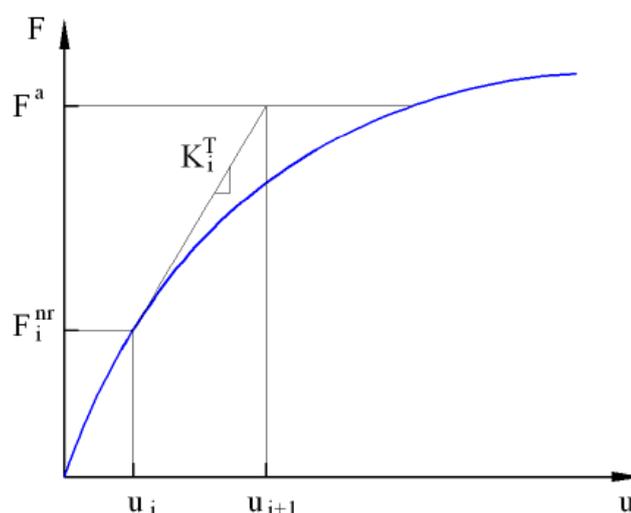


Figura 2.5 – Método de Newton Raphson para um incremento de carga, (ANSYS, 2007)

A matriz de rigidez tangencial é definida como sendo:

$$[K_i^T] \{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (2.1)$$

Onde,

- $[K_i^T]$ é a matriz de rigidez tangencial;
- $\{\Delta u_i\}$ é o incremento de deslocamento;
- $\{F^a\}$ é o vetor de carga aplicada;
- $\{F^{nr}\}$ é o vetor de força interna resultante.

Tanto $[K_i^T]$ e $\{F^{nr}\}$ são calculados com base na configuração deformada do sistema caracterizada pelo vetor $\{\Delta u_i\}$. A Figura 2.6 ilustra a iteração seguinte a exibida na Figura 2.5. Os valores F_{i+1}^{nr} e K_{i+1}^T são calculados e com isso obtêm-se novos valores para u e Δu . O problema repete-se até que o resíduo $\frac{F^a}{F} - \frac{F^{nr}}{F}$ seja desprezível segundo o critério de convergência adotado.

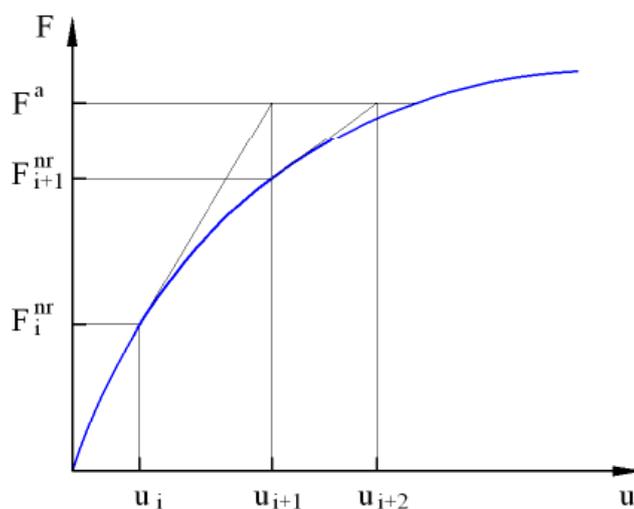


Figura 2.6 – Interação seguinte (ANSYS)

O método de Newton-Raphson possui algumas variações, como por exemplo, pode-se citar uma, onde mantém-se a matriz tangencial inicial ao longo de todo o processo, tendendo a aumentar o número de iterações requeridas.

Como o método de Newton-Raphson é um processo aproximado, é preciso estabelecer alguns critérios limitantes dos erros intrínsecos a essas aproximações. Como os sistemas avaliados possuem, de forma geral, inúmeros graus de liberdade, é necessário que a avaliação da qualidade das aproximações seja realizada a partir de normas de convergência. Com base no desbalanceamento do sistema (resíduo), a convergência será obtida quando a inequação a seguir for satisfeita:

$$\| \mathbf{R} \| = \varepsilon_R R_{ref} \quad (2.2)$$

Onde,

- $\|R\|$ é chamado de norma de convergência, sendo um escalar;
- $[R]$ é o vetor resíduo dado por $\{F_a\} - \{F_i^{nr}\}$;
- ε_R é a tolerância;
- R_{ref} é o valor de referência.

2.2.4 Lei constitutiva do material

Os resultados obtidos para a curva tensão-deformação de um teste convencional de tração não correspondem a verdadeira indicação das características de deformação de um determinado material em elevadas tensões, pois baseia-se inteiramente em dimensões originais dos corpos-de-prova. Com isto, os valores encontrados para as dimensões dos corpos-de-prova permanecem constantes depois da aplicação da carga. Sendo assim, faz-se necessário que as dimensões sejam corrigidas em cada carregamento aplicado, afetando a curva tensão *versus* deformação do material, levando a resultados distintos para tensões e deformações, que são chamadas de tensão e deformação verdadeiras. Então, para uma comparação mais confiável com o trabalho do Kim; Kuwamura (2007), foi aplicado este conceito para definir a curva tensão *versus* deformação do material. Abaixo, encontram-se as equações que foram adotadas para determinar a curva tensão *versus* deformação do material:

$$\sigma_v = \sigma_n(1 + \varepsilon_n) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (2.4)$$

Para representar o comportamento do material foi necessário utilizar uma curva multilinear. A primeira parte da curva multilinear representa o trecho elástico até o limite proporcional que corresponde ao módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$). No trabalho do Kim; Kuwamura (2007), a tensão de

escoamento foi obtida através da deformação de 0,1 %, segundo a Associação de Aço Inoxidável do Japão (SSBA).

2.2.5 Critérios de ruína

Para uma análise dos resultados dos modelos, faz-se necessário apresentar os critérios adequados para predizer os estados limites de uma ligação aparafusada, tais como: ruptura da seção líquida, esmagamento da chapa, plastificação da seção bruta e ruptura por cisalhamento no modelo de elementos finitos.

Kim; Kuwamura (2007) definiram três critérios de falha, ou estados limites últimos a serem verificados: tensões de tração ou cisalhamento (CF1), tensão equivalente (CF2) e deformação plástica equivalente (CF3). A ruptura da seção líquida (A) caracteriza-se pela ruína da seção com a presença de furos, que causa uma diminuição da área onde se desenvolvem as tensões, e a falha desenvolve-se a partir do furo da placa. O rasgamento da chapa (B) ocorre quando há grandes concentrações de tensões de cisalhamento entre o furo e a borda da chapa. A ruptura por bloco de cisalhamento (C) caracteriza-se pela ruptura ou escoamento da seção perpendicular à direção da carga e a ruptura por cisalhamento da seção paralela à direção da carga. A Tabela 2.1 mostra a nomenclatura utilizada para caracterizar o modo de ruína da ligação.

Tabela 2.1 – Legenda para o modo de falha

Legenda	Modo de falha
A	Ruptura da seção líquida
B	Rasgamento
C	Bloco de cisalhamento

A resistência última na análise corresponde a máxima carga obtida a partir do gráfico carga *versus* deslocamento. Os critérios são resumidos nas seguintes equações:

1) Critério de falha (CF1 – Tensões de tração ou cisalhamento)

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{t\max}} \geq 1,0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\tau_{ij}}{\tau_{t\max}} \geq 1,0 \quad (2.6)$$

2) Critério de falha (CF2 – Tensão equivalente)

$$\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{t\max}} \geq 1,0 \quad (2.7)$$

3) Critério de falha (CF3 – Deformação equivalente)

$$\frac{\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_{t\max}} \geq 1,0 \quad (2.8)$$

Onde,

σ_{ij} representam as tensões normais;

τ_{ij} representam as tensões cisalhantes;

$\sigma_{t\max}$ corresponde a máxima tensão normais verdadeira;

$\tau_{t\max}$ corresponde a máxima tensão cisalhante verdadeira;

σ_{eq} corresponde a máxima tensão equivalente de Von Mises;

ε_{eq}^p representa a deformação total plástica equivalente;

$\varepsilon_{t\max}$ representa a deformação última.

2.3 Resultados experimentais para calibração

O trabalho experimental realizado por Kuwamura (2002) considerou três diferentes configurações de furos, como ilustrado na Figura 2.7, caracterizado por apenas um plano de cisalhamento, constituído de chapas de aço inoxidável austenítico SUS304, com 1,5 mm e 3 mm de espessura, utilizando parafusos com diâmetro de 12 mm (A2-50; SUS parafuso comum ou 10T-SUS, parafusos de alta resistência). As duas extremidades das amostras foram fixadas através de garras em uma máquina universal de ensaios - Amsler, através da qual uma força foi aplicada gradualmente na amostra do ensaio.

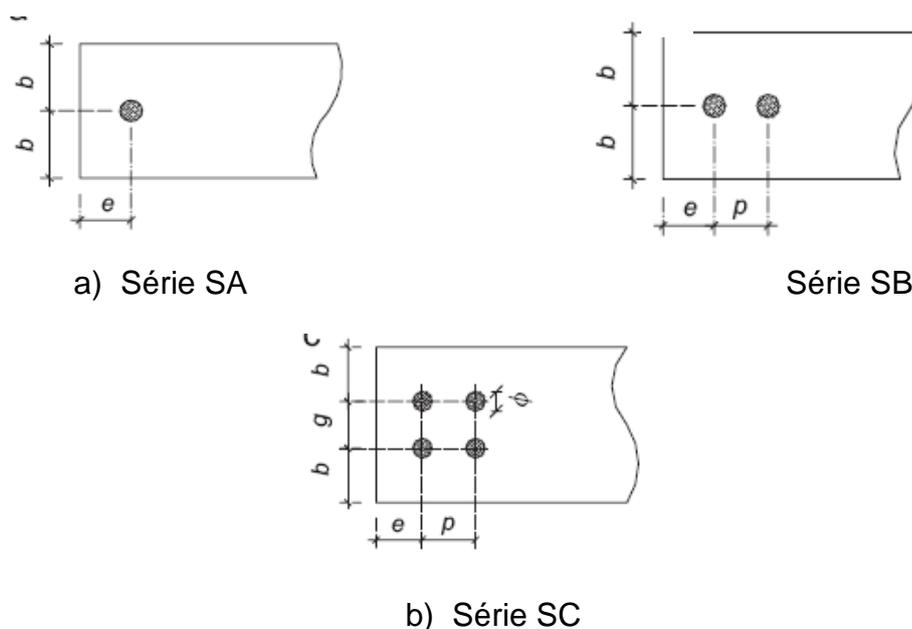


Figura 2.7 – Geometria das ligações, (KIM; KUWAMURA, 2007)

Os resultados experimentais podem ser vistos na Tabela 2.2, com as respectivas dimensões para cada ensaio e seu respectivo modo de falha.

Tabela 2.2 – Resultados experimentais

Série	Espécie	Espessura (mm)	e (mm)	b (mm)	g (mm)	p (mm)	Modo de Falha	Carga última (kN)
SA (1 furo)	SA1-1	1,5	12	25	-	-	B	12,28
	SA2-2	3,0	18	25	-	-	B	48,05
SB (2 furos)	SB1-4	1,5	60	25	-	30	A	43,34
	SB2-4	3,0	60	25	-	30	A	85,62
SC (3 furos)	SC1-4	1,5	60	55	30	30	C	79,53
	SC2-1	3,0	12	55	30	30	B-C	115,62
	SC2-3	3,0	30	55	30	30	C	162,34
	SC2-4	3,0	60	55	30	30	C	163,30

A curva tensão *versus* deformação nominal utilizada nesta modelagem para o aço inoxidável SUS304 está ilustrada na Figura 2.8, junto com a curva tensão *versus* deformação verdadeira de acordo com as expressões (3.3) e (3.4). A Tabela 2.3 apresenta as propriedades mecânicas encontradas no ensaio de tração para caracterização da lei constitutiva do material.

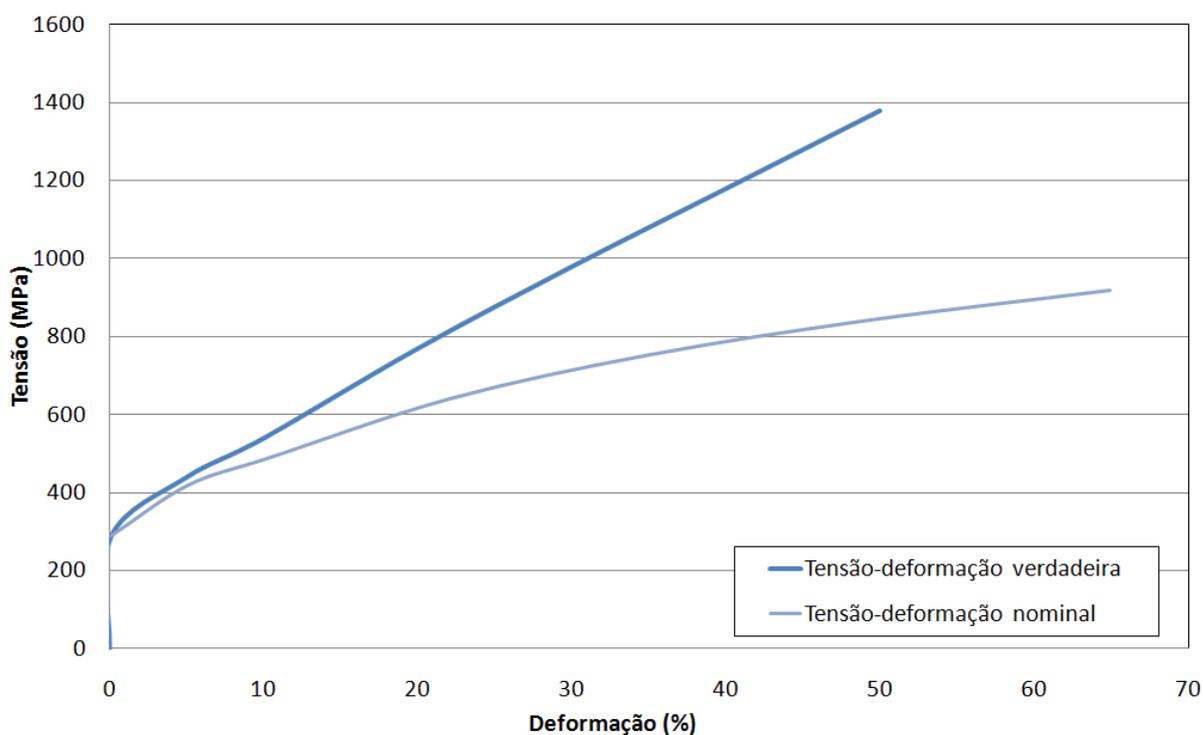


Figura 2.8 – Curva tensão-deformação do aço inoxidável SUS304

Tabela 2.3 – Propriedades físicas

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão última (MPa)	Limite de alongamento (%)
Aço inoxidável SUS304	204	288	842,35	63,0

2.4 Análise dos resultados – experimental *versus* numérico

Com o objetivo de comparar os resultados experimentais apresentados por Kuwamura (2002) e os resultados numéricos obtidos por Kim; Kuwamura (2007), serão apresentados os modelos de elementos finitos utilizados e as condições de contorno aplicadas na presente análise.

2.4.1 Elementos de contato

Os elementos de contato são utilizados para representar a interação entre a chapa e o parafuso. Conforme mencionado anteriormente, foram utilizados os elementos TARGET170 e CONTACT173, para representar as superfícies de contato. Para a reprodução de todos os modelos, foi atribuído o valor de 0,25 para o coeficiente de atrito, segundo recomenda Chung; Ip (2000). Na Figura 2.9, apresenta-se uma vista isométrica, ilustrando os elementos de contato da interface entre o fuste do parafuso e a parede do furo.

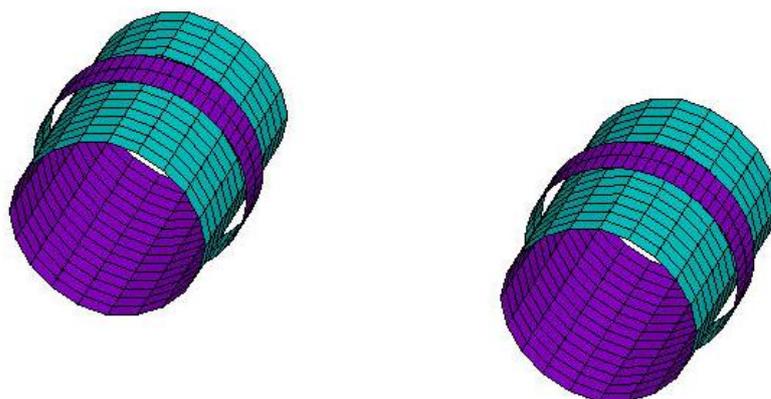


Figura 2.9 – Elementos de contato

2.4.2 Parafusos

Nesta análise numérica, o objetivo não é verificar uma possível falha do parafuso. Sendo assim, os parafusos foram reproduzidos da mesma forma que encontram-se no trabalho de Kim; Kuwamura (2007), através de uma simplificação do mesmo, como uma haste cilíndrica. A Figura 2.10 ilustra a forma geométrica do parafuso.

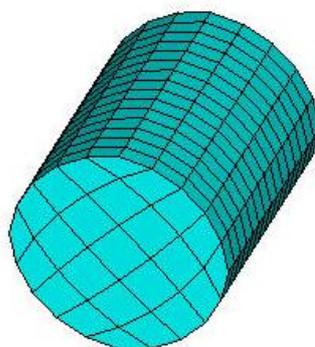


Figura 2.10 – Discretização do parafuso M12

2.4.3 Condições de contorno

Para todos os modelos desenvolvidos, as condições de contorno e de carregamento foram adotadas em concordância com o modelo experimental e com o modelo numérico do trabalho reproduzido.

A aplicação do deslocamento para os três modelos, está localizada em uma extremidade, como mostra a Figura 2.11, deixando a outra extremidade da chapa livre. Foi utilizado um artifício para que os graus de liberdade dos nós da face externa da extremidade fossem acoplados em apenas um único nó, localizado no centro da seção transversal da chapa, diminuindo assim o trabalho para a extração dos resultados.

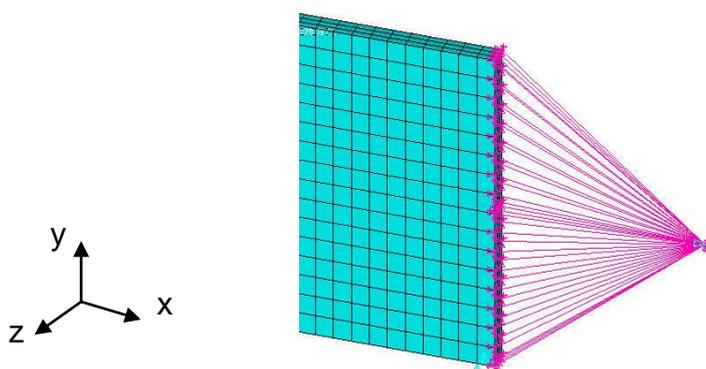


Figura 2.11 – Aplicação do carregamento

Os parafusos, nos três modelos, foram fixados em suas extremidades, impedindo deslocamentos na direção da carga (eixo y), como mostra a Figura 2.12. Foi considerada uma folga entre a chapa e o fuste do parafuso no valor de 0,5 mm, a partir do qual, o contato começa a funcionar. Como o parafuso foi produzido em um formato cilíndrico, conforme mencionado anteriormente, não foram consideradas a cabeça do parafuso, a porca e nem as arruelas. Para simular este efeito, os nós da extremidade do furo, foram impedidos de se deslocarem para fora do plano da chapa ($u_z=0$), ver Figura 2.12.

Há também restrições para os modelos com um e dois furos, no qual não há deslocamento no sentido perpendicular a aplicação da carga. Foram aplicados apoios no sentido do eixo y da chapa. Para a configuração SC, com quatro furos, o modelo foi produzido aplicando simetria no plano xz , como pode ser visto na Figura 2.13.

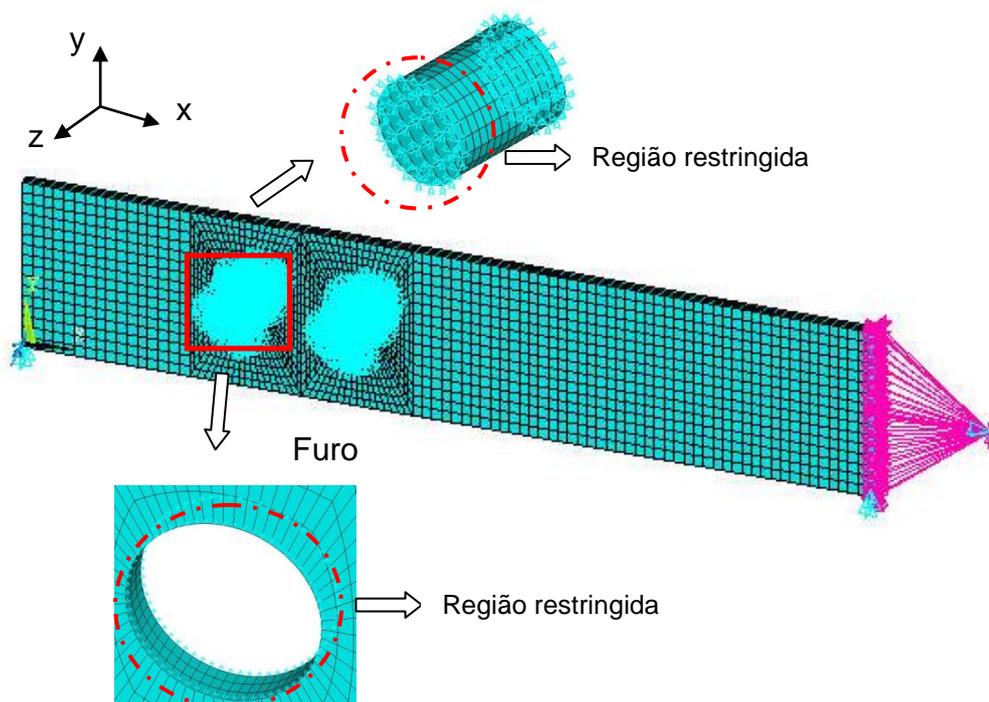


Figura 2.12 – Detalhe das condições de contorno modelos

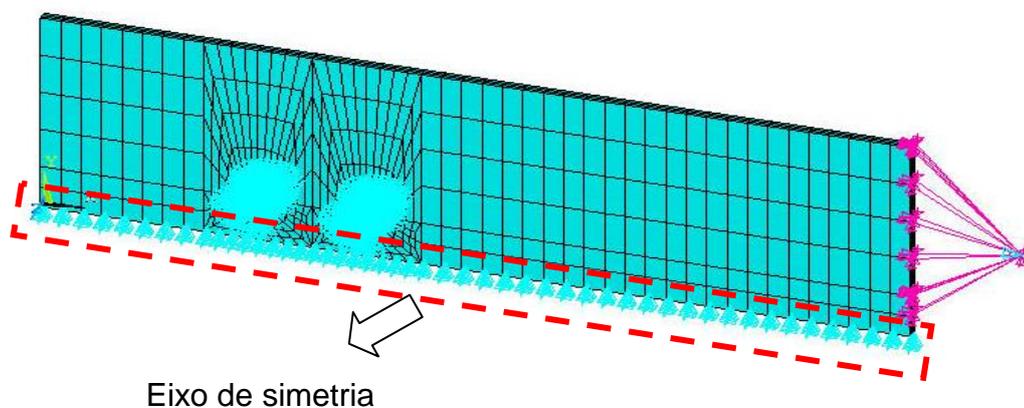


Figura 2.13 – Detalhe da simetria, SC2-4

Para uma avaliação paramétrica dos resultados obtidos, serão reproduzidos mais dois modelos, de forma a analisar a influência da quantidade de elementos ao longo da espessura. A partir da malha que apresentou um resultado mais próximo do experimental, foram gerados modelos com dois e com quatro elementos ao longo da espessura, respectivamente, conforme pode ser visualizado na Figura 2.14.

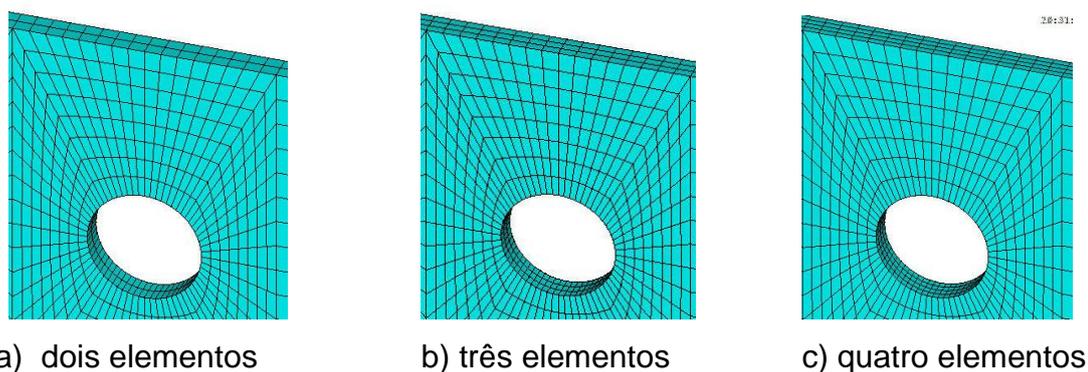


Figura 2.14 – Variação do nº de elementos ao longo da espessura

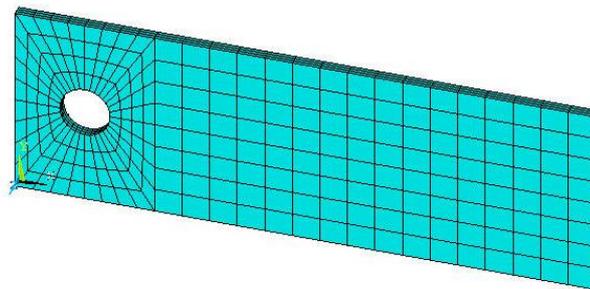
2.4.4 Modelo com um furo (SA)

Para fazer uma avaliação entre os resultados experimentais e numéricos foi escolhido o ensaio SA2-2, que apresentou uma carga última experimental no valor de 48,05 kN, e a melhor carga última obtida no modelo numérico do Kim; Kuwamura (2007) foi de 44,85 kN.

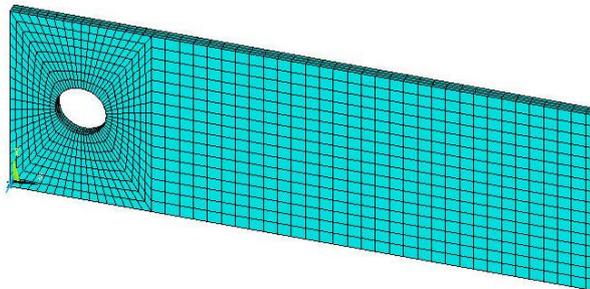
O trabalho do Kim; Kuwamura (2007), mostra que não há influência do comprimento da chapa quando adota-se um valor igual ou acima a 150mm para a análise, visto que a carga última e o modo de ruína da ligação aparafusada não se modificam com a mudança do comprimento. Desta forma, para o presente modelo, o comprimento adotado foi de 150 mm.

2.4.4.1 Malha de elementos finitos

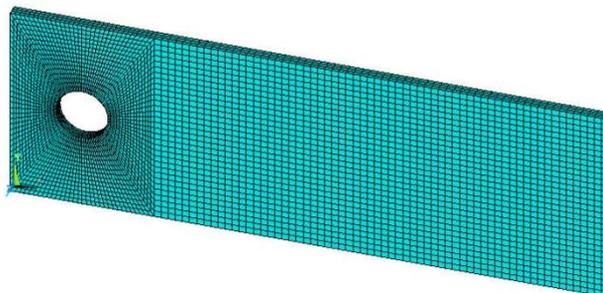
Os modelos desenvolvidos com vista à realização da análise numérica foram constituídos por elementos que formam a chapa e o parafuso, bem como o contato entre os dois, conforme descrito anteriormente. Foram produzidos três diferentes tipos de modelos, variando apenas a discretização da malha de elementos finitos. A Figura 2.15 ilustra as três formas de discretização das malhas de elementos finitos utilizadas.



a) malha 1



b) malha 2



c) malha 3

Figura 2.15 – Discretização da malha para o modelo SA2-2

2.4.4.2 Análise dos resultados numéricos

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos por meio da análise numérica, para o modelo com um furo. A análise foi realizada em duas fases: a primeira fase corresponde a escolha da malha de elementos finitos em que os resultados obtidos aproximam-se do experimental; e na segunda fase faz-se uma análise da divisão da espessura da placa com mais elementos.

A carga foi aplicada a partir de incrementos de deslocamento, sendo estes, divididos em sub-passos, e para o parâmetro de convergência de descolamento foi utilizado o valor de tolerância de 0,01, segundo recomenda (CHUNG; IP, 2000).

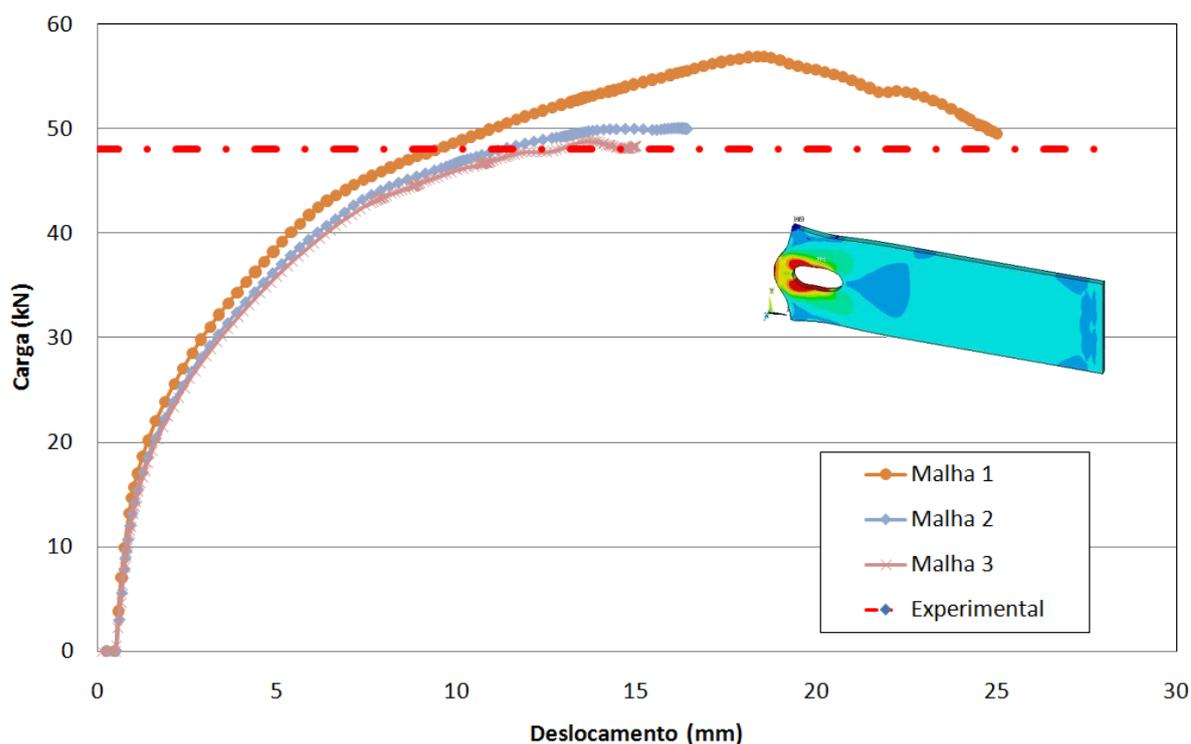


Figura 2.16 – Curvas carga *versus* deslocamento - modelo numérico SA2-2

Ao analisar o gráfico da Figura 2.16, nota-se que os modelos 2 e 3 possuem comportamentos bem próximos. O modelo 1 apresentou um comportamento semelhante aos outros dois modelos até um deslocamento de aproximadamente 5 mm. A partir deste ponto, o primeiro modelo apresentou um comportamento

diferente, resultando em uma carga última bem maior que o ensaio experimental. Este resultado pode ter sido influenciado pela discretização da malha do modelo 1 que tem elementos maiores do que os outros modelos, resultando assim, uma identificação menos precisa das zonas de grande concentração de tensão. A Tabela 2.4 e a Tabela 2.5 mostram os resultados apresentados nos modelos numéricos, e os compara com os valores encontrados no ensaio experimental e no modelo de (KIM; KUWAMURA, 2007).

Tabela 2.4 – Comparação de resultados (Numérico X Experimental)

Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última experimental (kN)	Tamanho médio elementos – furo (mm)	Elementos ao longo da espessura	Erro (%)	Modo de Falha
Malha 1	56,93	48,05	4,6 x 2,8	3	18,48	B
Malha 2	50,04	48,05	2,3 x 1,4	3	4,14	B
Malha 3	48,83	48,05	1,2 x 0,7	3	1,61	B

Tabela 2.5 – Comparação de resultados (Numérico X Kim & Kuwamura)

Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última - Kim & Kuwamura (kN)	Erro – Kim & Kuwamura (%)	Erro (%)
Malha 1	56,93	44,85	6,60	18,48
Malha 2	50,04	44,85	6,60	4,14
Malha 3	48,83	44,85	6,60	1,61

Após análise dos resultados, observa-se que o modelo que apresentou uma carga última mais próxima do ensaio experimental foi o modelo 3, ressaltando também que o modo de falha observado para este modelo foi idêntico aos resultados experimentais e numéricos citados por Kim; Kuwamura (2007). O resultado do modelo numérico proposto conseguiu alcançar um valor mais próximo do experimental, em comparação ao modelo do Kim; Kuwamura (2007). A Figura 2.18, ilustra o nível de tensão, da chapa deformada dos pontos 1, 2 e 3 da Figura

2.17 que apresenta a curva carga *versus* deslocamento para o modelo referente à malha 3.

Fazendo uma variação do número de elementos ao longo da espessura, foram obtidos os resultados da Tabela 2.6. Observa-se que o melhor resultado, em comparação com o erro apresentado, é o modelo malha 3_R1, que representa um maior número de divisões, porém, um modelo com três elementos ao longo da espessura apresenta aproximadamente um tempo de processamento menor, cerca de 30%, e a diferença entre os dois modelos é menor do que 1%.

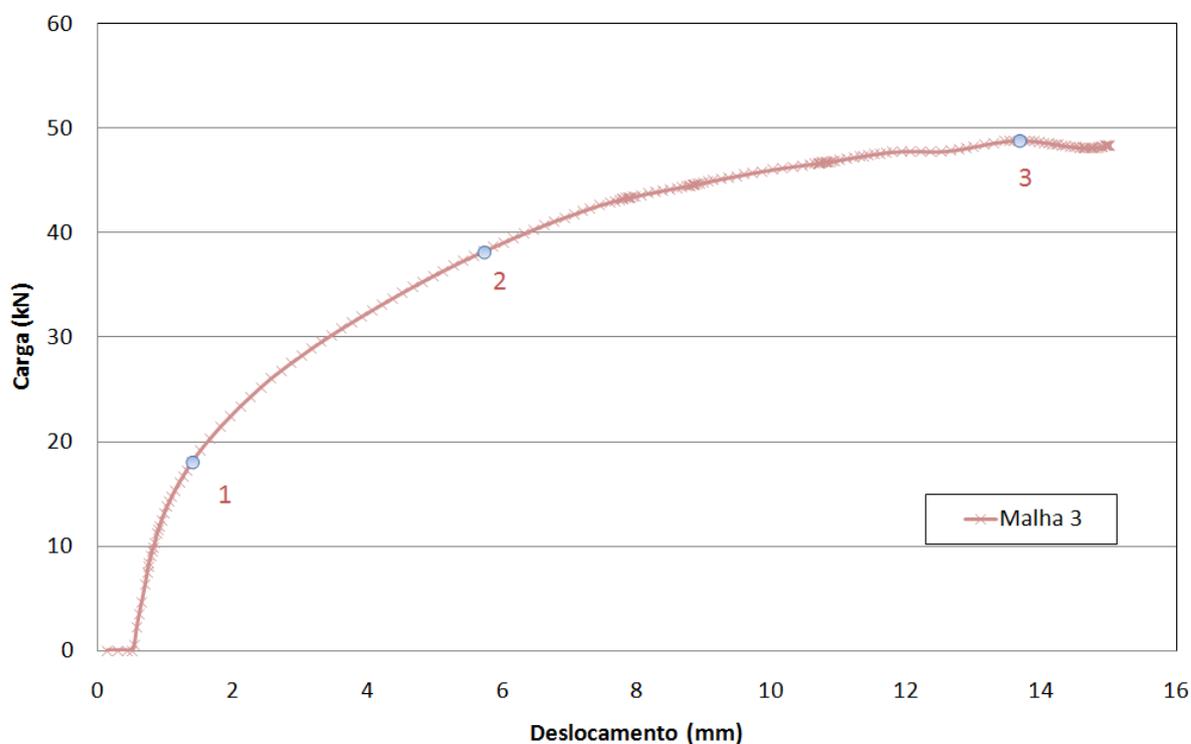


Figura 2.17 – Pontos para análise de tensões e deformações

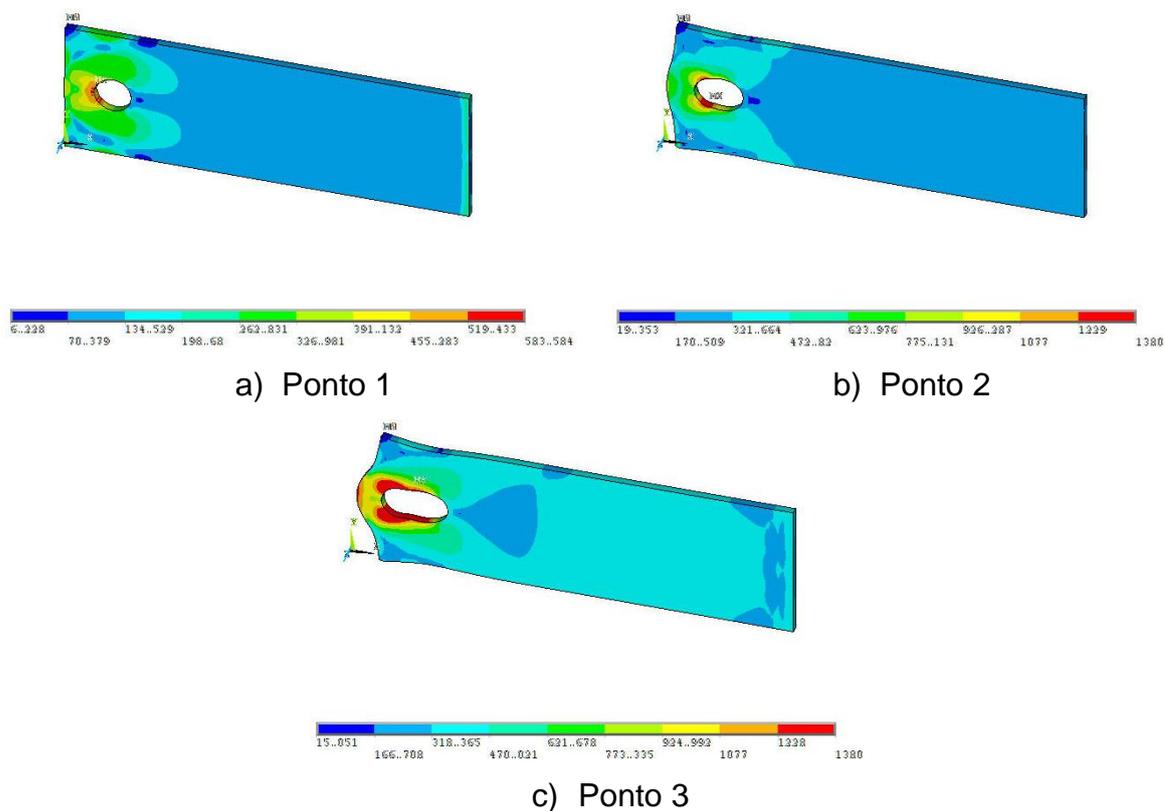


Figura 2.18 – Tensões de Von Mises, modelo SA2-2 Malha 3 (em MPa)

Tabela 2.6 – Comparação dos resultados - espessura

Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última experimental (kN)	Tamanho médio elementos – furo (mm)	Divisões da espessura	Erro (%)	Modo de Falha
Malha 3	48,83	48,05	1,2 x 0,7	3	1,61	B
Malha 3_R1	48,81	48,05	1,2 x 0,7	4	1,58	B
Malha 3_R2	49,02	48,05	1,2 x 0,7	2	2,00	B

2.4.5 Modelo com dois furos (SB)

Para a análise dos resultados experimentais e numéricos com a ligação apresentando dois furos foi escolhido o ensaio SB2-4, que apresentou como carga

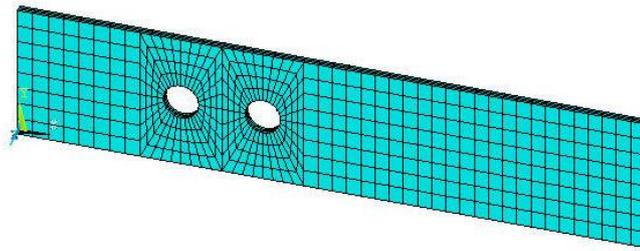
última experimental o valor de 85,62kN, sendo que a melhor carga última obtida no modelo numérico do Kim; Kuwamura (2007) foi de 86,81kN.

Novamente, o trabalho do Kim; Kuwamura (2007), mostra que não há influência do comprimento da chapa quando adota-se um valor acima de 150mm para a análise, visto que a carga última e o modo de ruína da ligação aparafusada não se modificam com a mudança do comprimento. Desta forma, para o presente modelo, o comprimento adotado foi de 230mm.

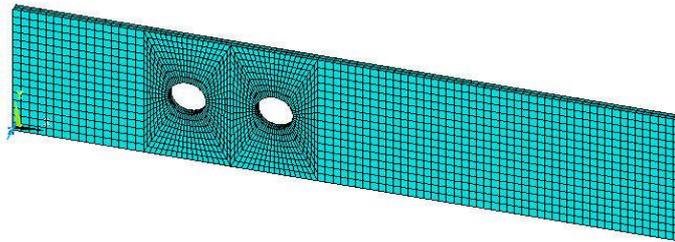
2.4.5.1 Malha de elementos finitos

Os modelos desenvolvidos com vista a realização da análise numérica são constituídos por elementos que formam a chapa e o parafuso, bem como o contato entre os dois, conforme descrito anteriormente. Foram produzidos três diferentes tipos de modelos, variando apenas a discretização da malha de elementos finitos. A Figura 2.19, ilustra as três formas de discretização de malhas de elementos finitos utilizadas.

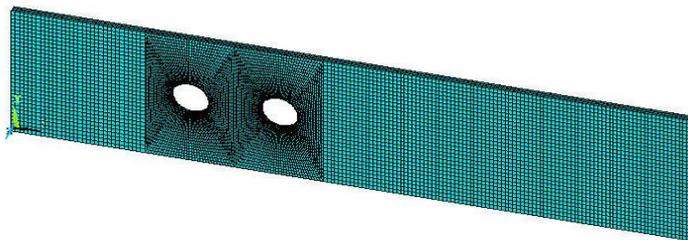
Também para o presente modelo, foram analisados os resultados obtidos para as três configurações de malhas, e para a malha que correspondeu ao melhor resultado, utilizou-se então, um modelo com dois e outro com quatro elementos ao longo da espessura, respectivamente, conforme foi visto na Figura 2.14. Os parafusos foram confeccionados da mesma forma que no modelo anterior.



a) Malha 1



b) Malha 2



c) Malha 3

Figura 2.19 – Discretização da chapa do modelo SB2-4

2.4.5.2 Análise dos resultados numéricos

Esta seção apresenta os resultados obtidos por meio da análise numérica, para o modelo com dois furos. Assim, como no modelo anterior, a análise foi realizada em duas fases.

Como dito anteriormente, o carregamento foi aplicado a partir de incrementos de deslocamento. O deslocamento foi dividido em sub-passos, e para o parâmetro de convergência de descolamento utilizou o valor de tolerância de 0,01, segundo recomenda (CHUNG; IP, 2000).

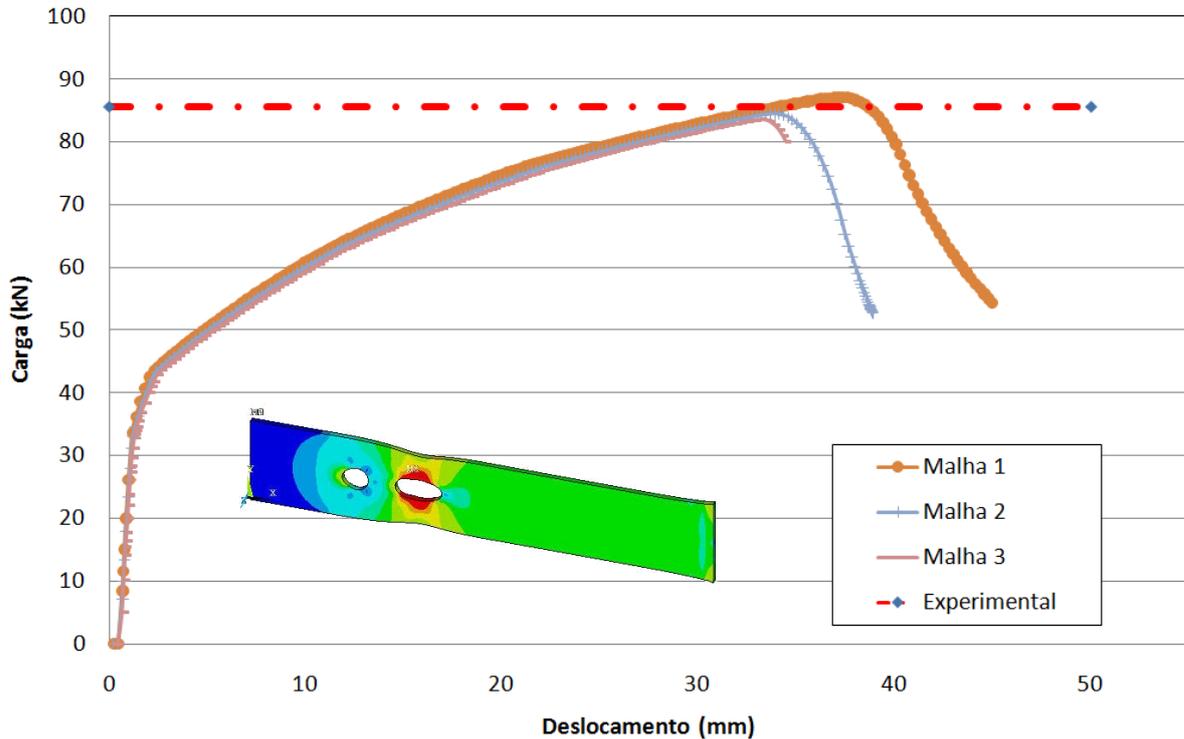


Figura 2.20 – Curvas carga *versus* deslocamento - modelo numérico SB2-4

Ao analisar o gráfico da Figura 2.20, nota-se que as curvas dos três modelos apresentaram comportamentos similares até um deslocamento igual a 30 mm, porém para o modelo 1, houve um deslocamento maior para atingir a carga última. Vale ainda ressaltar que o modelo 3 apresentou o menor deslocamento. O resultado encontrado pode ter sido influenciado pelos elementos que formam a malha de elementos finitos do modelo 1, pois estes elementos são maiores do que os outros modelos, resultando assim, uma identificação menos precisa das zonas de grande concentração de tensão. A Tabela 2.7 e a Tabela 2.8, mostram os resultados obtidos nos modelos numéricos, e a respectiva comparação com o resultado experimental e o resultado apresentado nos modelos de (KIM; KUWAMURA, 2007).

Após a análise dos resultados, observa-se que a melhor discretização da malha de elementos finitos, em termos de carga última é a da malha 2, pois apresentou o menor erro, e também o modelo conseguiu reproduzir o mesmo modo de falha dos resultados experimentais e numéricos. A Figura 2.22, irá ilustrar o nível de tensão da chapa deformada para os pontos 1, 2 e 3, da Figura 2.21 que apresenta os pontos discretizados pela malha 2.

Tabela 2.7 – Comparação de resultados (Numérico X Experimental)

Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última experimental (kN)	Tamanho médio elementos – furo (mm)	Divisões da espessura	Erro (%)	Modo de Falha
Malha 1	87,09	85,62	4,6 x 2,4	3	1,71	A
Malha 2	84,46	85,62	2,4 x 1,2	3	1,36	A
Malha 3	83,58	85,62	1,2 x 0,6	3	2,38	A

Tabela 2.8 – Comparação de resultados (Numérico X Kim & Kuwamura)

Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última - Kim & Kuwamura (kN)	Erro – Kim & Kuwamura (%)	Erro (%)
Malha 1	87,09	86,81	1,4	1,71
Malha 2	84,46	86,81	1,4	1,36
Malha 3	83,58	86,81	1,4	2,38

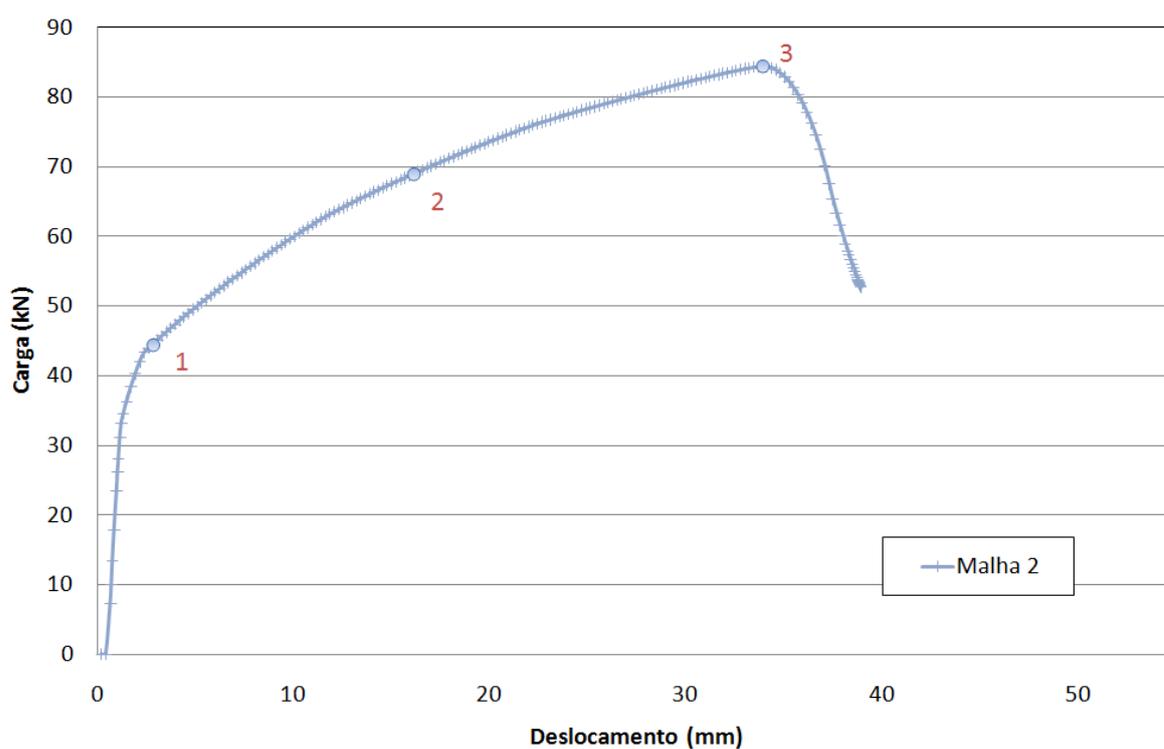


Figura 2.21 – Pontos para análise de tensões e deformações

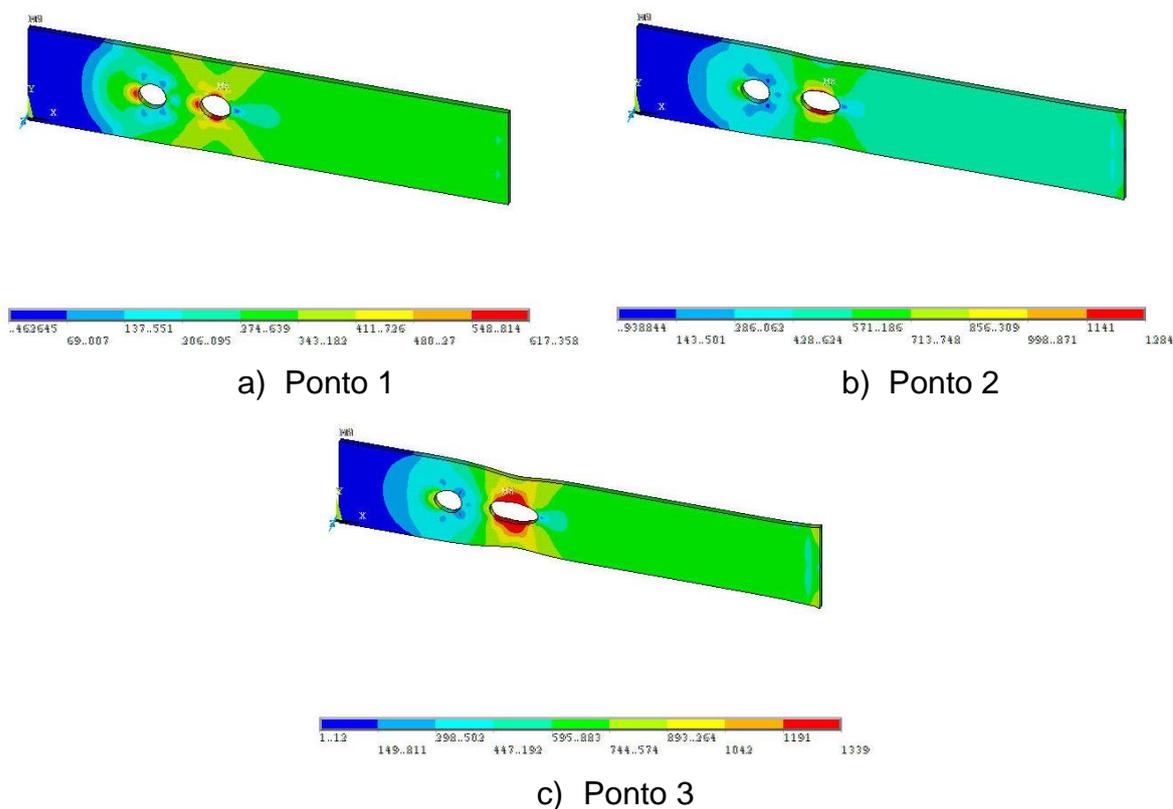


Figura 2.22 – Tensões de Von Mises, modelo SB2-4 Malha 2 (em MPa)

A Tabela 2.9 apresenta os resultados obtidos pela variação do número de elementos ao longo da espessura. Observa-se que o melhor resultado, em comparação com o erro apresentado, é o modelo malha 2_R1, que representa um maior número de divisões, porém o tempo de processamento é cerca de 35 % maior do que o modelo com três elementos ao longo da espessura.

Tabela 2.9 – Comparação dos resultados - espessura

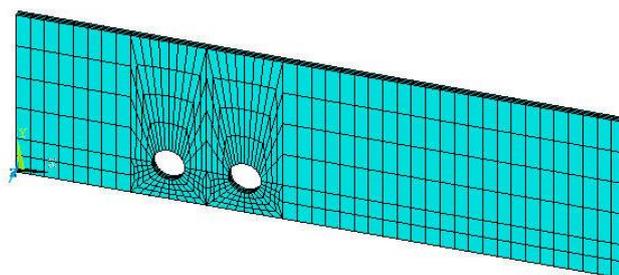
Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última experimental (kN)	Tamanho médio elementos – furo (mm)	Divisões da espessura	Erro (%)	Modo de Falha
Malha 2	84,46	85,62	2,4 x 1,2	3	1,36	A
Malha 2_R1	84,47	85,62	2,4 x 1,2	4	1,34	A
Malha 2_R2	84,32	85,62	2,4 x 1,2	2	1,51	A

2.4.6 Modelo com quatro furos (SC)

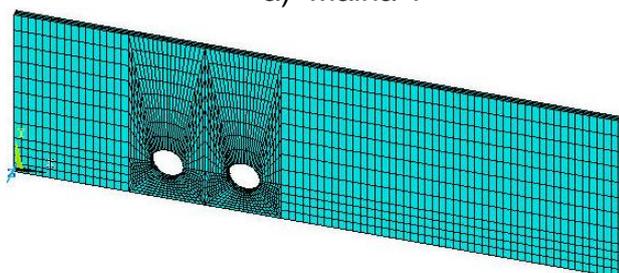
Para a análise da ligação apresentando quatro furos foi escolhido o ensaio SC2-4, que apresentou como carga última experimental de 162,32 kN, sendo o valor de carga última obtida no modelo numérico do Kim; Kuwamura (2007) de 152,79 kN. Assim, como nos dois modelos anteriores, foi utilizado um comprimento de 240 mm para a chapa, visto que no trabalho do Kim; Kuwamura (2007) este valor não invalida os resultados.

2.4.6.1 Malha de elementos finitos

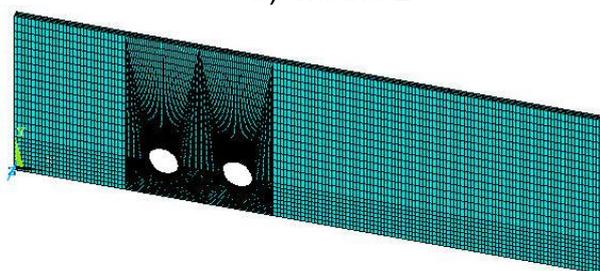
Para a presente configuração, também foram produzidos três diferentes tipos de modelos, variando apenas a discretização da malha de elementos finitos, conforme dito anteriormente. A Figura 2.23, ilustra as três formas de discretização das malhas de elementos finitos utilizadas.



a) Malha 1



b) Malha 2



c) Malha 3

Figura 2.23 – Discretização da chapa do modelo SC2-4

Da mesma forma que nos modelos anteriores, foi efetuada uma análise com os resultados obtidos nas três configurações de malhas, e para a malha que correspondeu ao melhor resultado, utilizou-se então, um modelo com dois e outro com quatro elementos ao longo da espessura, respectivamente - ver Figura 2.24. Os parafusos foram confeccionados da mesma forma que nos modelos anteriores.

2.4.6.2 Análise dos resultados numéricos

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos por meio da análise numérica, para o modelo com quatro furos.

Da mesma forma que os modelos anteriores, o carregamento do modelo foi obtido a partir de incrementos de deslocamento. O deslocamento foi dividido em sub-

passos, e para o parâmetro de convergência de deslocamento novamente utilizou o valor de 0,01, segundo recomenda (CHUNG; IP, 2000).

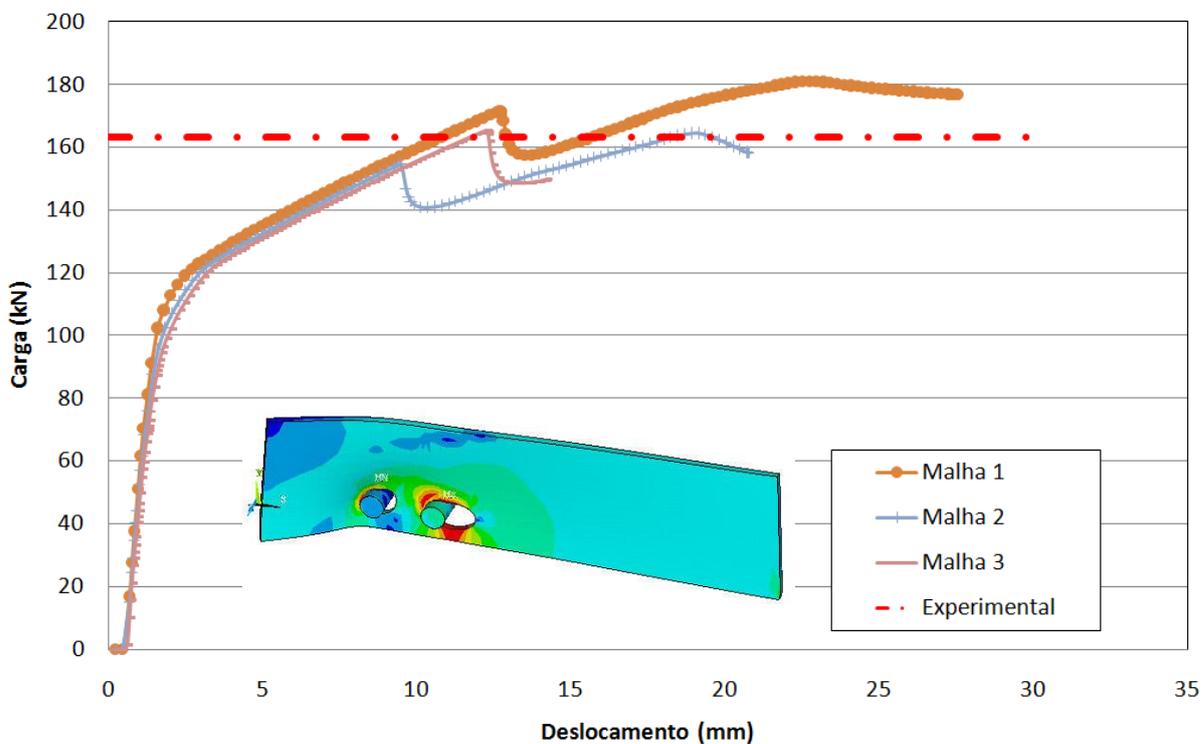


Figura 2.24 – Curvas carga *versus* deslocamento - modelo numérico SC2-4

Pode-se observar na Figura 2.24, que os três modelos apresentaram comportamentos similares até um deslocamento de 10 mm, porém o modelo malha 2 apresentou resultados mais satisfatórios que os modelos com as malhas 1 e 3, respectivamente. A Tabela 2.10 e a Tabela 2.11 mostram os resultados apresentados nos modelos numéricos, e os comparam com os valores encontrados no ensaio experimental e no modelo de (KIM; KUWAMURA. 2007).

Tabela 2.10 – Comparação de resultados (Numérico X Experimental)

Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última experimental (kN)	Tamanho médio elementos – furo (mm)	Divisões da espessura	Erro (%)	Modo de Falha
Malha 1	181,11	162,32	12,0 x 4,0	3	11,58	C
Malha 2	164,60	162,32	6,0 x 2,0	3	1,40	C
Malha 3	165,24	162,32	3,0 x 1,0	3	1,80	C

Tabela 2.11 – Comparação de resultados (Numérico X Kim & Kuwamura)

Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última - Kim & Kuwamura (kN)	Erro – Kim & Kuwamura (%)	Erro (%)
Malha 1	181,11	152,79	5,9	11,58
Malha 2	164,60	152,79	5,9	1,40
Malha 3	165,24	152,79	5,9	1,80

Após análise dos resultados, observa-se que a melhor discretização dos elementos finitos, em matéria de carga última é da malha 2, pois apresentou o menor erro, comparando com o ensaio experimental. O resultado do modelo numérico proposto conseguiu alcançar um valor mais próximo do experimental, em comparação ao modelo do Kim; Kuwamura (2007). A Figura 2.26, irá ilustrar o nível de tensão, em MPa, da chapa em sua configuração deformada dos pontos indicados no gráfico da Figura 2.25, que representa o modelo discretizado pela malha 2.

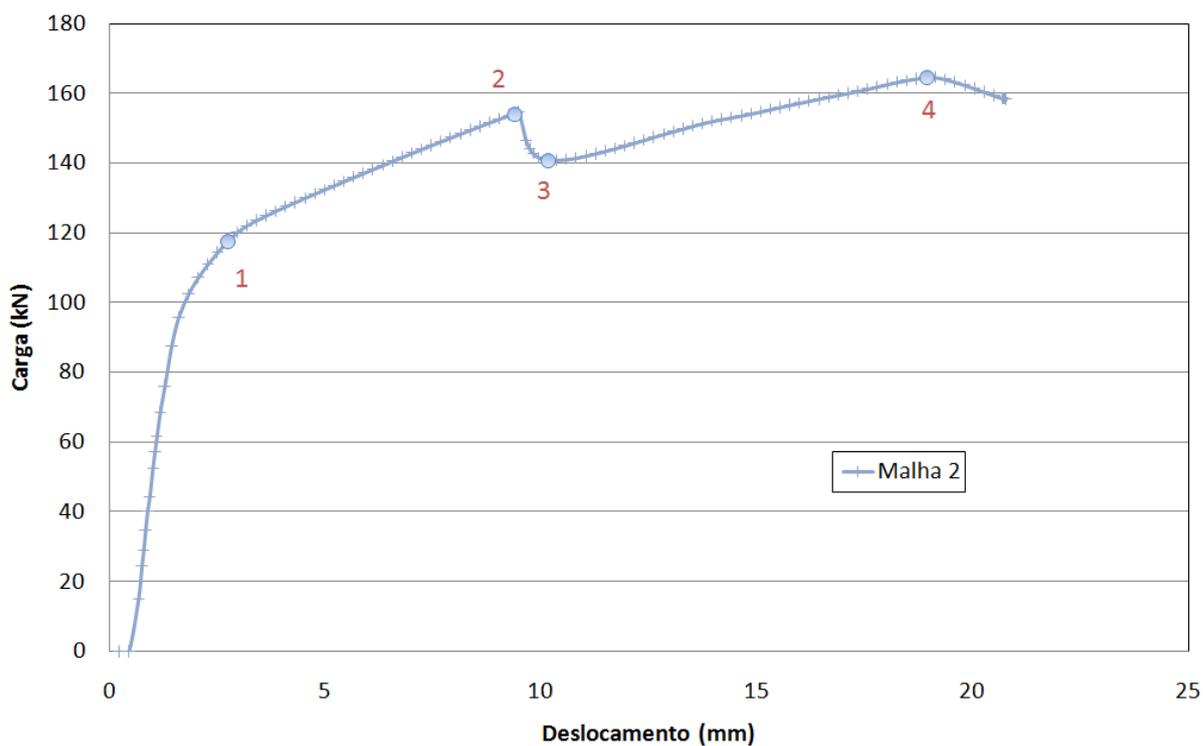


Figura 2.25 – Pontos para análise de tensões e deformações, SC2-4

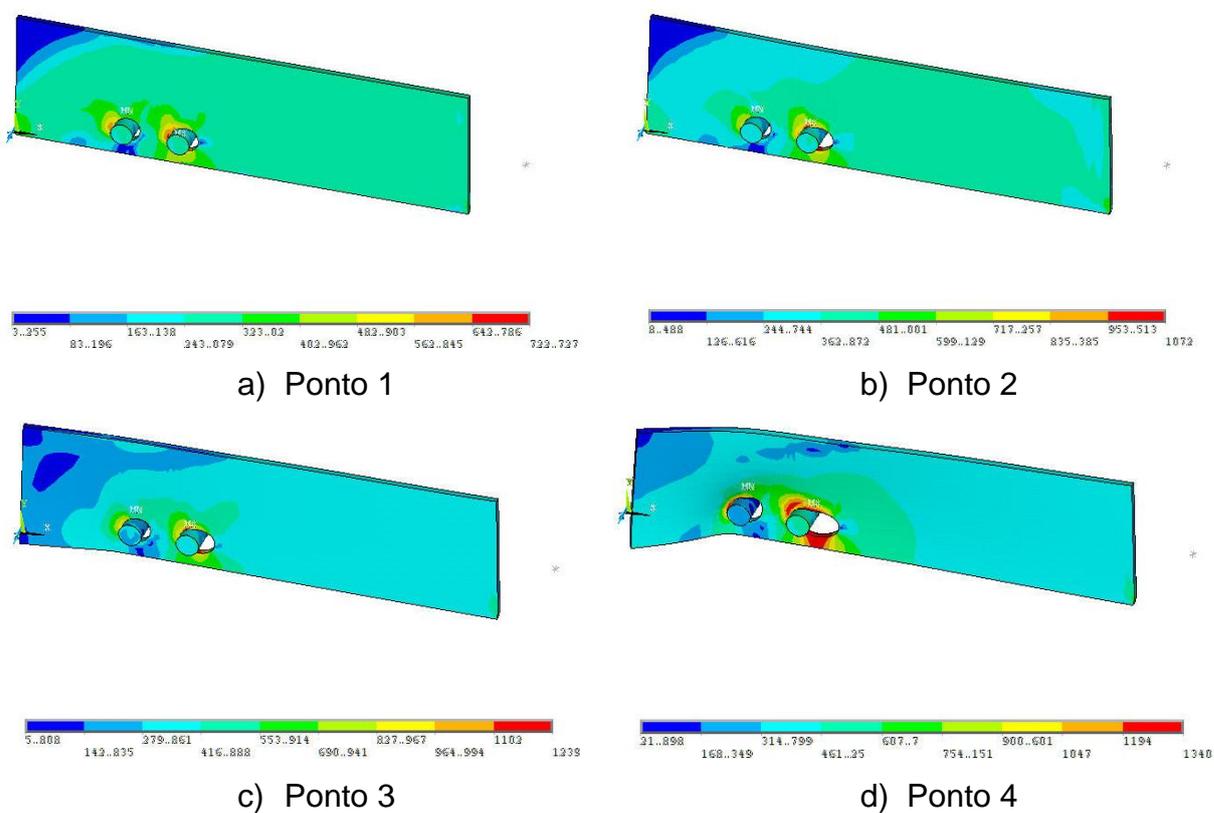


Figura 2.26 – Tensões de Von Mises (em MPa), modelo SC2-4 - Malha 2

Ao analisar o gráfico da Figura 2.25 e a deformada da chapa (Figura 2.26), verificou-se o chamado efeito “curling”, que é uma deformação da borda da chapa para fora do plano. Este efeito ocorre quando a distância entre o furo e a borda da chapa é muito grande. Analisando a carga última, observa-se que a mesma não foi afetada, pois o valor obtido ocorreu após o efeito “curling”.

Observa-se que o modelo proposto conseguiu reproduzir o modo de falha do trabalho do Kim; Kuwamura (2007) e encontrar uma carga última bem próxima a obtida no ensaio experimental. A Tabela 2.12 apresenta os resultados obtidos pela variação do número de elementos ao longo da espessura. Para esta configuração, o modelo com três elementos ao longo da espessura apresentou um resultado mais próximo do experimental.

Tabela 2.12 – Comparação dos resultados - espessura

Modelo	Carga última - numérico (kN)	Carga última experimental (kN)	Tamanho médio elementos – furo (mm)	Divisões da espessura	Erro (%)	Modo de Falha
Malha 2	164,60	162,32	6,0 x 2,0	3	1,40	C
Malha 2_R1	164,94	162,32	6,0 x 2,0	4	1,62	C
Malha 2_R2	160,03	162,32	6,0 x 2,0	2	1,41	C

Neste capítulo foram apresentados os resultados numéricos obtidos para três diferentes tipos de malha de elementos finitos, de forma a comparar entre os resultados experimentais apresentados por Kuwamura (2002) e resultados obtidos por modelagem computacional por Kim; Kuwamura (2007). No capítulo seguinte, apresentar-se-á uma breve descrição dos ensaios e resultados experimentais realizados por Santos (2008), para chapas com furação alternada submetidas à tração em aço inoxidável.

3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS

3.1 Introdução

Conforme citado em capítulos anteriores, o presente trabalho reproduziu os ensaios realizados por Santos (2008) para ligações aparafusadas submetidas à tração, em aço inoxidável austenítico 304. Este trabalho foi tema de uma dissertação de mestrado da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), onde comparou-se o comportamento do aço inoxidável com o do aço carbono. A caracterização dos resultados da resistência das ligações aparafusadas é representada, basicamente, pela curva tensão *versus* deformação ou da curva tensão *versus* deslocamento, que foram dados importantes para o projeto e análise das ligações de (SANTOS, 2008).

Santos (2008) buscou avaliar os limites e efeitos do comportamento da ligação aparafusada, para esforço axial e cisalhante. Desta forma, o autor procurou um tipo de configuração, sem nenhuma excentricidade em relação ao centro de gravidade da seção transversal. A Figura 3.1, ilustra o esquema utilizado por Santos (2008) para a ligação aparafusada alternada.

Para a realização dos ensaios das ligações, utilizou-se uma máquina universal de ensaios Lousenhausen com capacidade de 600kN, disponível no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, conforme pode ser observado na Figura 3.2(a).

A aquisição de dados (deformações, deslocamentos e carga) foi feita através do sistema NI-PXI-1050 da *National Instruments*, conforme apresentado na Figura 3.2(b).

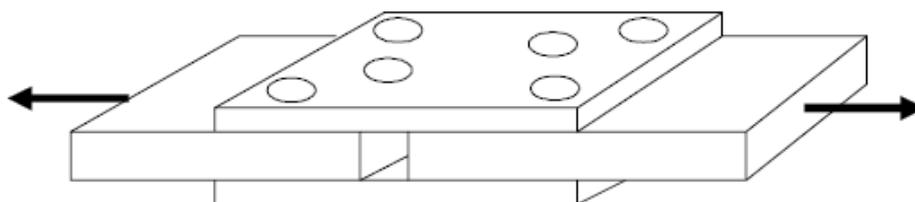
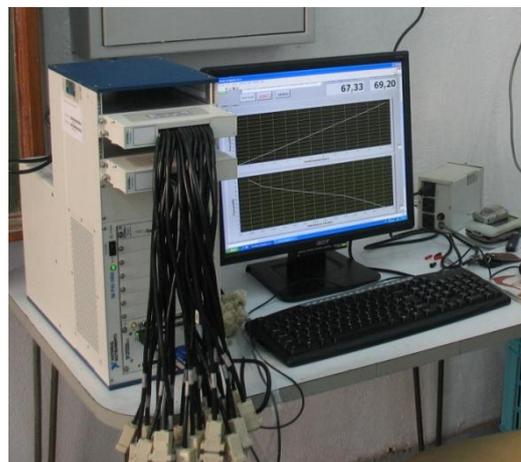


Figura 3.1 – Esquema de ligação, (SANTOS, 2008)



a) máquina universal de ensaios
Lousenhausen 600kN



b) sistema de aquisição de dados
National Instruments PXI-1050

Figura 3.2 – Esquema experimental, (SANTOS, 2008)

3.2 Apresentação dos Ensaio de Tração

Santos (2008) realizou testes de tração em corpos-de-prova constituídos de aço inoxidável e de aço carbono. O teste de tração em problemas de engenharia é amplamente usado para obtenção de informações básicas sobre a resistência dos materiais, e como um teste de controle de especificações, conforme Dieter (1981). Autores como Schaeffer (1999); Souza (1974) dizem ser o ensaio de tração, o método mais utilizado para determinação das propriedades mecânicas de chapas metálicas, sendo possível a obtenção do limite de resistência, do limite de escoamento e do módulo de elasticidade.

O resultado do ensaio de tração é o diagrama tensão *versus* deformação, conforme apresentado na Figura 3.3 que, segundo Dieter (1981), corresponde a uma curva de engenharia construída a partir das medidas de carga e do alongamento da amostra submetida ao ensaio. A tensão usada na curva é a tensão longitudinal média do corpo-de-prova, obtida pela divisão da carga pela área inicial da seção do corpo-de-prova, e a deformação usada para a curva de engenharia é a

deformação linear média, obtida pela divisão da elongação do comprimento útil do corpo-de-prova, pelo comprimento original.



Figura 3.3 – Curva tensão *versus* deformação (DIETER, 1981)

3.2.1 Tensão limite de escoamento

O aço inoxidável apresenta um comportamento diferente em comparação com o aço carbono; e a sua curva tensão *versus* deformação é não-linear o que torna difícil identificar a sua tensão limite de escoamento. A tensão limite de escoamento é definida por uma reta com a mesma inclinação do módulo de elasticidade passando por 0,2% da deformação.

A equação (4.1) de Ramberg-Osgood (1943) representa o comportamento da curva tensão *versus* deformação não-linear de aços de alta resistência apresentando grande deformação plástica, podendo ser usada para o aço inoxidável.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (3.1)$$

onde ε é a deformação, σ é a tensão, E o módulo de elasticidade ou módulo de Young e n e k constantes que dependem do tipo de material, geralmente calibrados a parte de resultados de ensaios experimentais. O primeiro termo da equação representa a parte elástica da curva enquanto o segundo representa a parte plástica.

Introduzindo a tensão limite de escoamento do material σ_0 , tem-se um novo parâmetro α proporcional a k , onde:

$$\alpha = k \left(\frac{\sigma_0}{E} \right)^{n-1} \quad (3.2)$$

A segunda parte da equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (3.3)$$

O valor de $\alpha \frac{\sigma_0}{E}$ pode ser visto como uma deformação além do limite de escoamento, sendo aceitável o valor de 0,2%, pois ao igualar a tensão σ , a tensão elástica σ_0 , obtém-se a equação (4.4):

$$\varepsilon = (1 + \alpha) \frac{\sigma_0}{E} \quad (3.4)$$

O valor de α pode ser adequado aos dados experimentais, porém para alguns materiais pode ser adotado o valor de 0,2%, ou seja:

$$\alpha \frac{\sigma_0}{E} = 0,002 \quad (3.5)$$

Desta forma, obtém-se a curva apresentada na Figura 3.4.

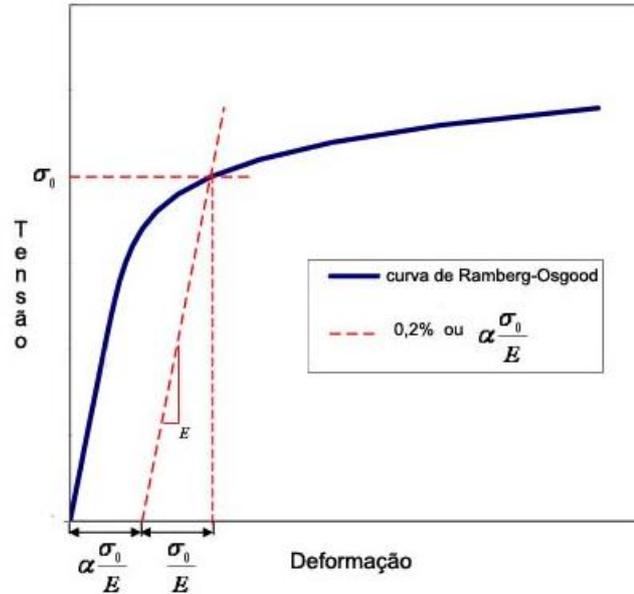


Figura 3.4 – Curva de Ramberg-Osgood (RAMBERG; OSGOOD, 1943)

Segundo Santos (2008), esta equação apresenta bons resultados para a primeira etapa da curva, porém prevê altas tensões na sua parte final. Recentemente, Gardner; Nethercot (2004) propuseram uma modificação nesta equação, baseado em 1% da prova de carga que estendeu a validade da equação de Ramberg-Osgood além do seu limite de escoamento. A formulação de Gardner; Nethercot (2004) apresenta dois estágios no modelo apresentado, conforme equação (3.6), com resultados mais apurados na resposta de níveis de tensão em estruturas

$$e = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n & \sigma \leq \sigma_{0,2} \\ \varepsilon_{0,2} + \frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{E_2} + \left[\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \frac{\sigma_1 - \sigma_{0,2}}{E_2} \right] \chi \left(\frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{\sigma_1 - \sigma_{0,2}} \right)^{m_1} & \sigma > \sigma_{0,2} \end{cases} \quad (3.6)$$

onde σ_1 é a tensão limite de escoamento correspondendo a deformação total de $\varepsilon_1 = 0,1\%$; m_1 é o índice não linear representando a curva passando através dos pontos $(\varepsilon_{0,2}, \sigma_{0,2})$ e $(\varepsilon_1, \sigma_1)$.

3.2.2 Resultados do ensaio de tração

Os ensaios de tração confeccionados por Santos (2008) foi realizado em corpos-de-prova, ver Figura 3.5, no laboratório do ITUC – Instituto de Tecnologia da PUC-Rio para a obtenção dos dados.

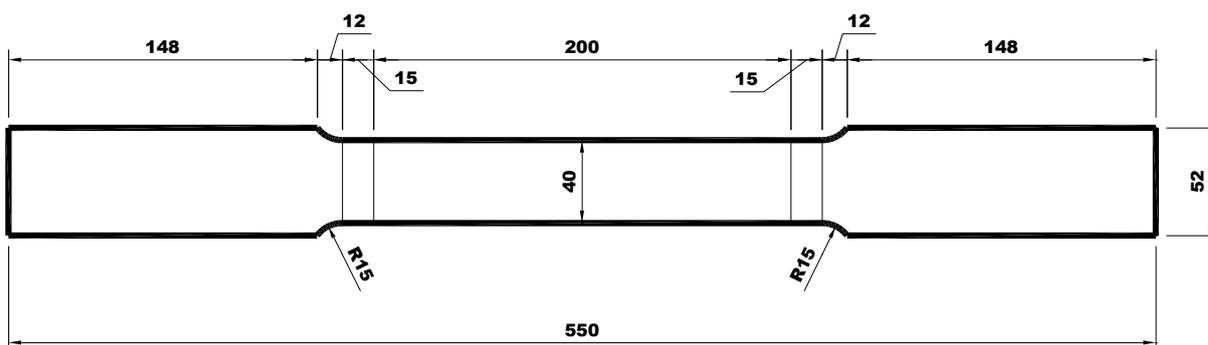


Figura 3.5 – Corpo-de-prova, (SANTOS, 2008)

Santos (2008) utilizou, para a obtenção da tensão limite de escoamento para o aço inoxidável, uma reta paralela ao trecho inicial correspondente a uma deformação de 0,2%, conforme pode ser observado na Figura 3.4.

Foram realizados, também, seis ensaios cujos valores médios para a tensão limite de escoamento e para a tensão última foram iguais a 350,62 MPa e 710,72 MPa, respectivamente.

3.3 Caracterização dos ensaios

Santos (2008), de forma a atingir os seus objetivos utilizou: parafusos de alta resistência ASTM A325 de ½ polegada com rosca em toda sua extensão, conforme Figura 3.6, e sendo garantido que sua resistência ao corte não seria ultrapassada,

de modo a poder avaliar insistentemente os efeitos das diferentes configurações de parafusos possíveis, ou seja, variando os valores de s e p , para que produzindo diferentes áreas líquidas, os caminhos A, B e C de ruptura, pudessem ser avaliados conforme Figura 3.7. Fez-se uso de chapa base super dimensionada com espessura de 15 mm, de modo a garantir uma faixa de regime elástico, posicionadas com um afastamento mínimo de 10 mm uma da outra. Não se utilizou valores específicos de torque durante aperto dos parafusos, de modo a se desprezar o efeito do atrito no resultado final das cargas de escoamento e ruptura. Foram usadas arruelas junto às porcas do parafuso, proporcionando apenas um ajuste mais suave ao leve aperto dado às mesmas.

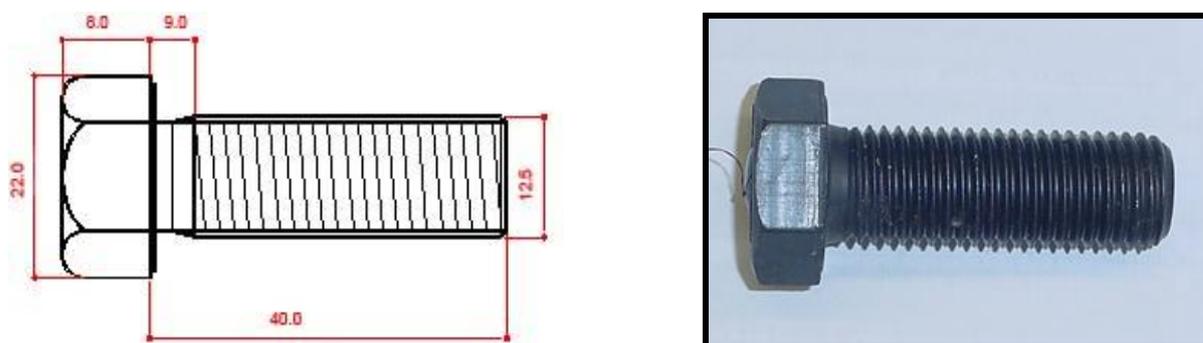


Figura 3.6 – Detalhe do parafuso ASTM A325 M12 cl. 8.8, (SANTOS, 2008)

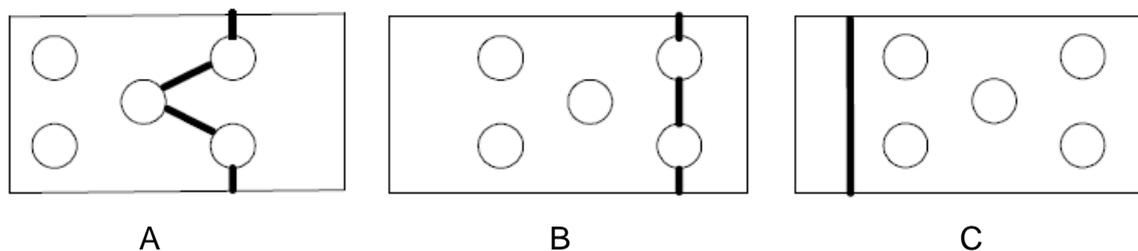
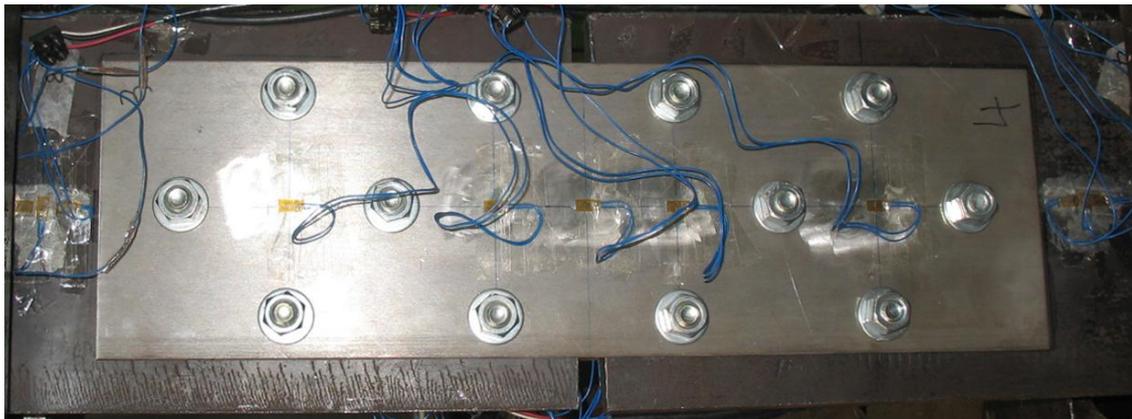
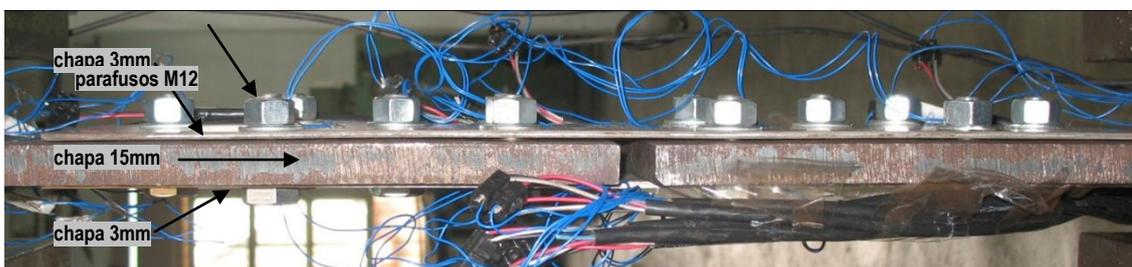


Figura 3.7 – Caminhos de ruptura possíveis para a ligação em estudo, (SANTOS, 2008)



a) vista superior

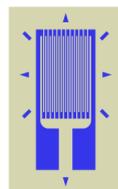


b) vista lateral

Figura 3.8 – Esquema da ligação aparafusada alternada, (SANTOS, 2008)

3.3.1 Preparação da célula de carga para a medida e aferição das cargas aplicadas

No trabalho de Santos (2008), os extensômetros, ver Figura 3.9, foram colados na chapa grossa de 15 mm de espessura, denominada corpo da célula de carga sendo inteiramente solidários à sua deformação. E para acompanhar a deformação nas placas de cada ensaio foram colados cinco extensômetros em cada placa, para averiguar a deformação em locais específicos da placa de ensaio, conforme a foto do ensaio E3_CARB_S50, mostrada na Figura 3.10.

Figura 3.9 – Detalhe do extensômetro⁵, (SANTOS, 2008)

⁵ <http://www.celuladecarga.com.br/info/definicao.htm>

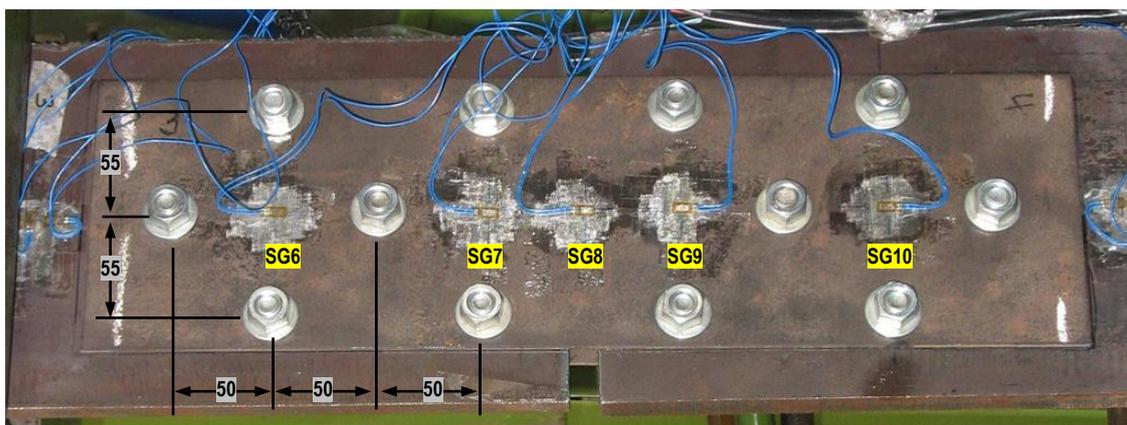


Figura 3.10 – Posicionamento dos extensômetros - Ensaio E3_CARB_S50, (SANTOS, 2008)

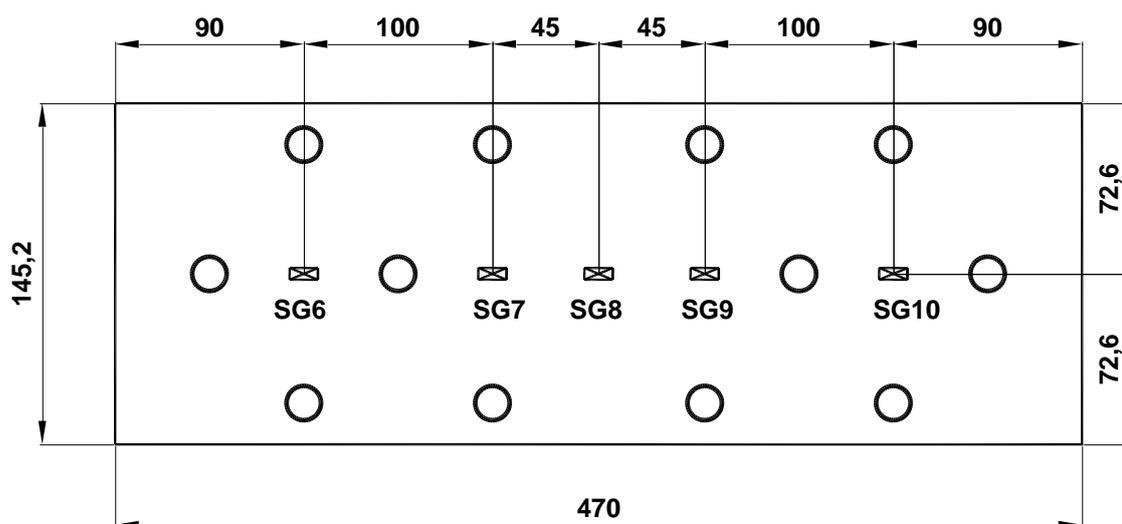


Figura 3.11 – Cotas dos extensômetros em milímetros - Ensaio E3_CARB_S50, (SANTOS, 2008)

3.4 Apresentação dos ensaios experimentais

Apresenta-se abaixo o quadro resumo dos ensaios experimentais realizados por Santos (2008), com a nomenclatura que o autor utilizou em seu trabalho:

- E – ensaio;
- 1 – número do ensaio;
- CARB – aço carbono;
- INOX – aço inoxidável;
- S50 – distância em milímetros do parâmetro s , pois o parâmetro p foi fixado em 55 mm;

Cada nomenclatura do ensaio representou as características geométricas, o tipo de aço, a placa base e os parafusos utilizados em cada lado da placa. Todas as dimensões das figuras desta dissertação estão cotadas em milímetros.

Tabela 3.1 – Configuração dos ensaios experimentais

Ordem	Identificação	s (mm)	p (mm)	e_1 (mm)	e_2 (mm)	d_0 (mm)	Tipo de aço	Espessura da placa base (mm)	Quantidade de parafusos
5	E5_INOX_S50	50	55	40	17,6	14,7	inoxidável	15	6
7	E7_INOX_S30	30	55	40	17,6	14,7	inoxidável	15	6
9	E9_INOX_S23	23	55	40	17,6	14,7	inoxidável	15	6

Abaixo, apresenta-se um breve resumo dos ensaios realizados por Santos (2008), definidos na Tabela 3.1, com as fotos e gráficos carga *versus* deformação do extensômetro mais solicitado, e curva carga *versus* deslocamento.

3.4.1 Ensaio E5 INOX S50

O resultado do trabalho de Santos (2008) apresentou ruptura na área líquida passando dois parafusos com a carga última de 480 kN. Segundo Santos (2008), a ruptura deveria ocorrer primeiro na seção bruta de chapas com a carga de 302,9 kN, seguida do corte no parafuso com a carga de 376 kN, mais a frente ter-se-ia o esmagamento da chapa na região dos parafusos com a carga de 466,9 kN e finalmente, romperia na área líquida passando por dois furos com a carga de 494,6 kN.

Santos (2008) observou no ensaio, antes da ruptura, o esmagamento da chapa mostrado através da seqüência de fotos da Figura 3.13. Os parafusos localizados na área líquida passando por dois parafusos, onde houve a ruptura, apresentaram deformações associadas ao corte acentuado, conforme apresentado na Figura 3.14.

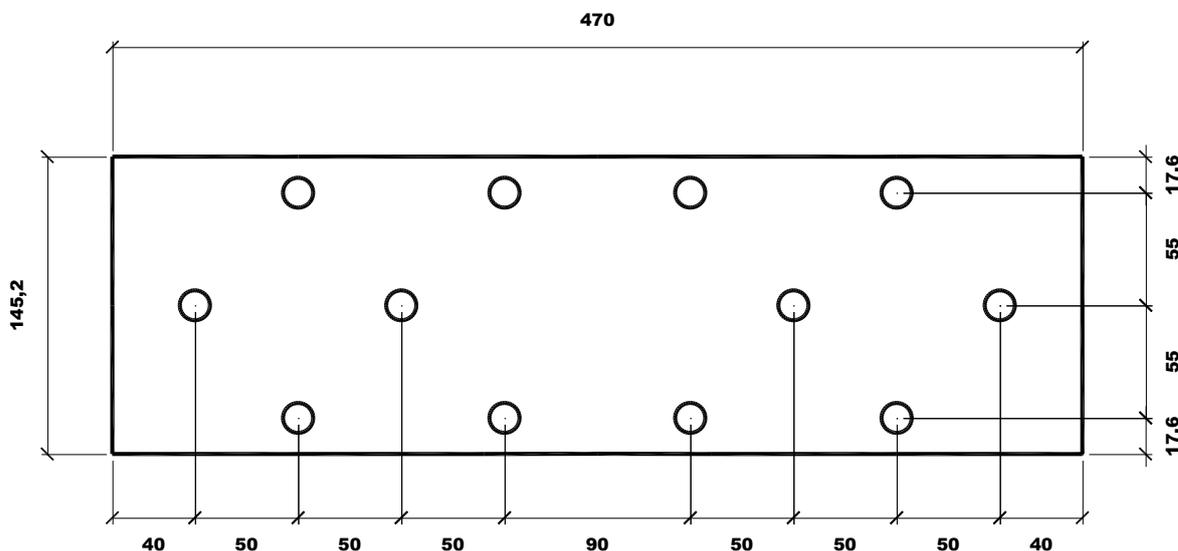


Figura 3.12 – Desenho geométrico do ensaio E5_INOX_S50, (SANTOS, 2008)

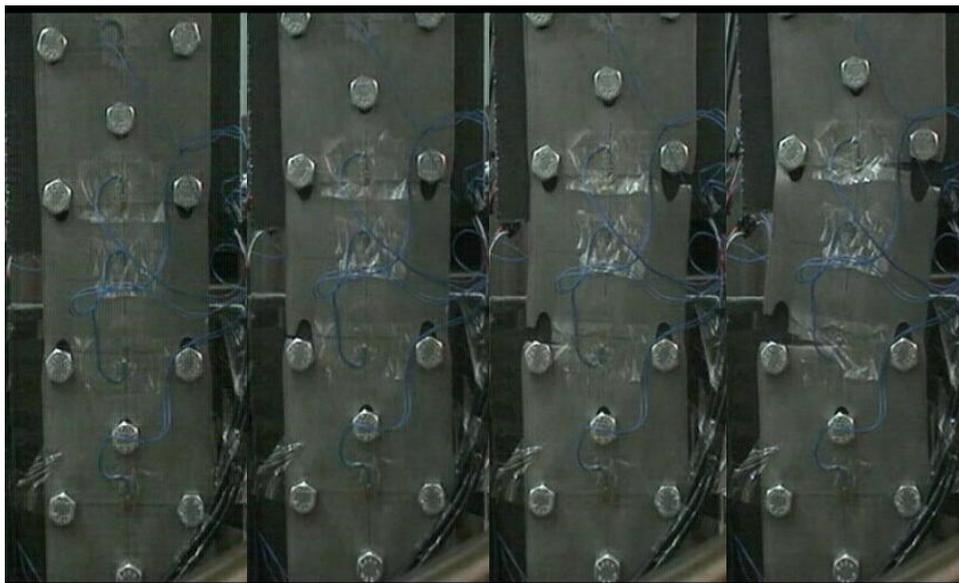


Figura 3.13 – Seqüência de ruptura do ensaio E5_INOX_S50, (SANTOS, 2008)

Na Figura 3.15 e na Figura 3.16 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, obtidos por Santos (2008), onde o mesmo observou o final do comportamento linear da ligação entre as cargas de 280 kN a 320 kN. Também observou o valor de deslocamento associado a carga última, de aproximadamente 41 mm.

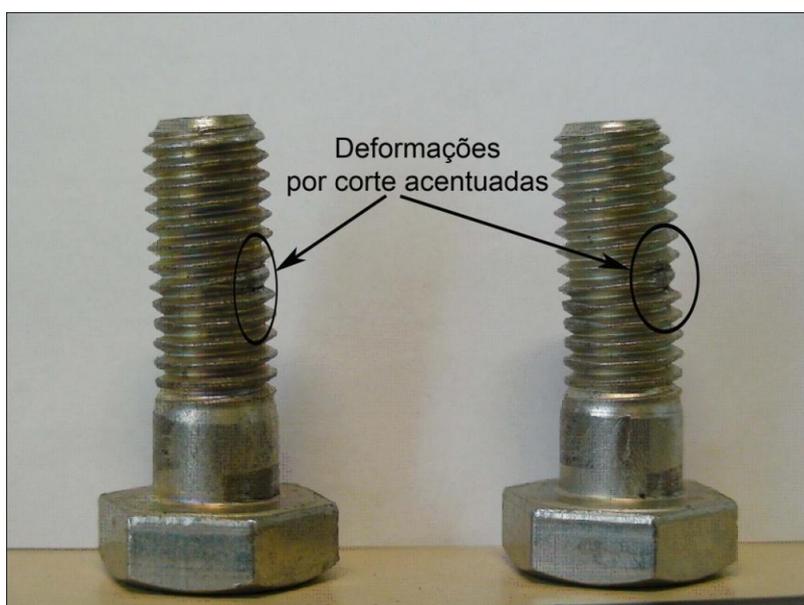


Figura 3.14 – Deformação por corte - parafuso do ensaio E5_INOX_S50, (SANTOS, 2008)

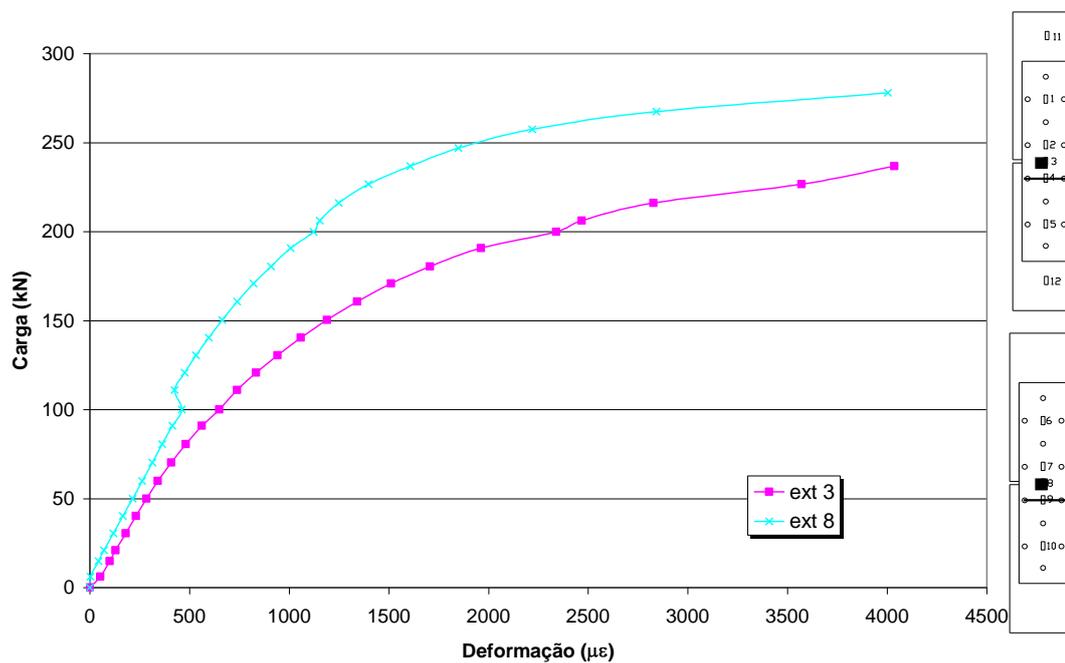


Figura 3.15 – Gráfico carga versus deformação - E5_INOX_S50, (SANTOS, 2008)

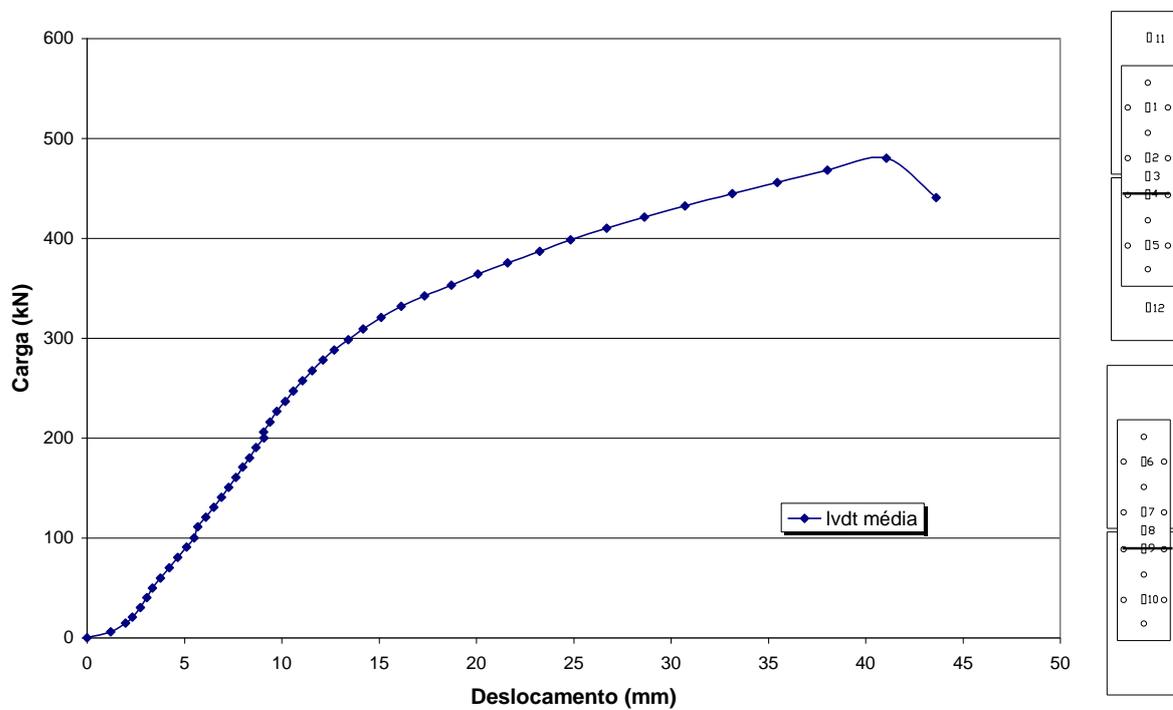


Figura 3.16 – Gráfico carga versus deslocamento - E5_INOX_S50, (SANTOS, 2008)

3.4.2 Ensaio E7 INOX S30

Segundo Santos (2008), este ensaio apresentou ruptura na área líquida passando por dois furos com a carga última de 459,0 kN. Conforme mencionado no trabalho do autor, a norma europeia preconiza que a ruptura ocorreria primeiro na seção bruta da chapa com a carga de 302,9 kN, seguida do corte no parafuso com carga de 376,0 kN, mais a frente ocorreria o esmagamento da chapa na região dos parafusos com a carga de 466,9 kN e finalmente romperia na área líquida passando por três furos com a carga de 469,8 kN. No ensaio de Santos (2008), ocorreu, antes da ruptura, o esmagamento da chapa mostrado através da seqüência de fotos da Figura 3.18. Os parafusos, localizados na área líquida da ruptura, apresentaram, como no quinto ensaio com placas de aço inoxidável, deformações substanciais devido ao corte.

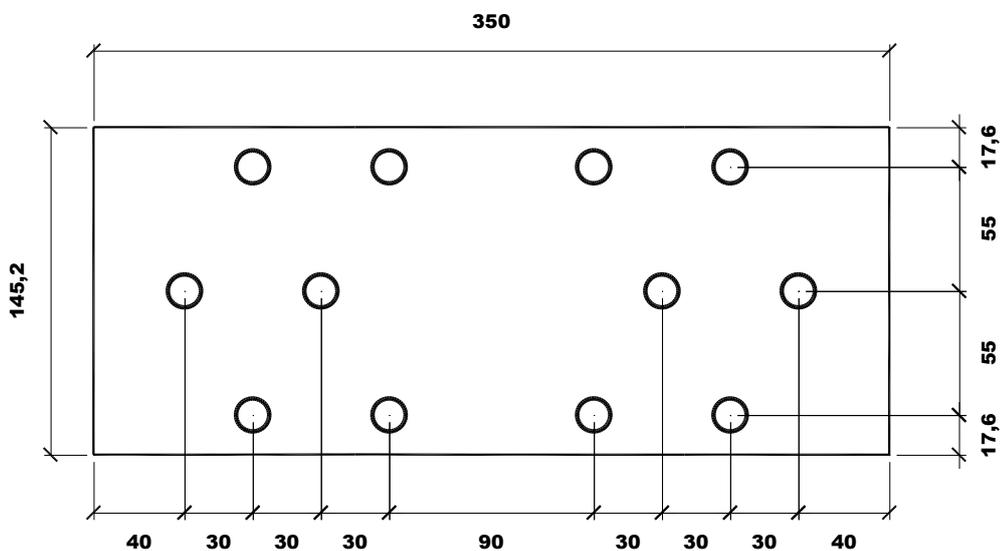


Figura 3.17 – Desenho geométrico do ensaio E7_INOX_S30, (SANTOS, 2008)

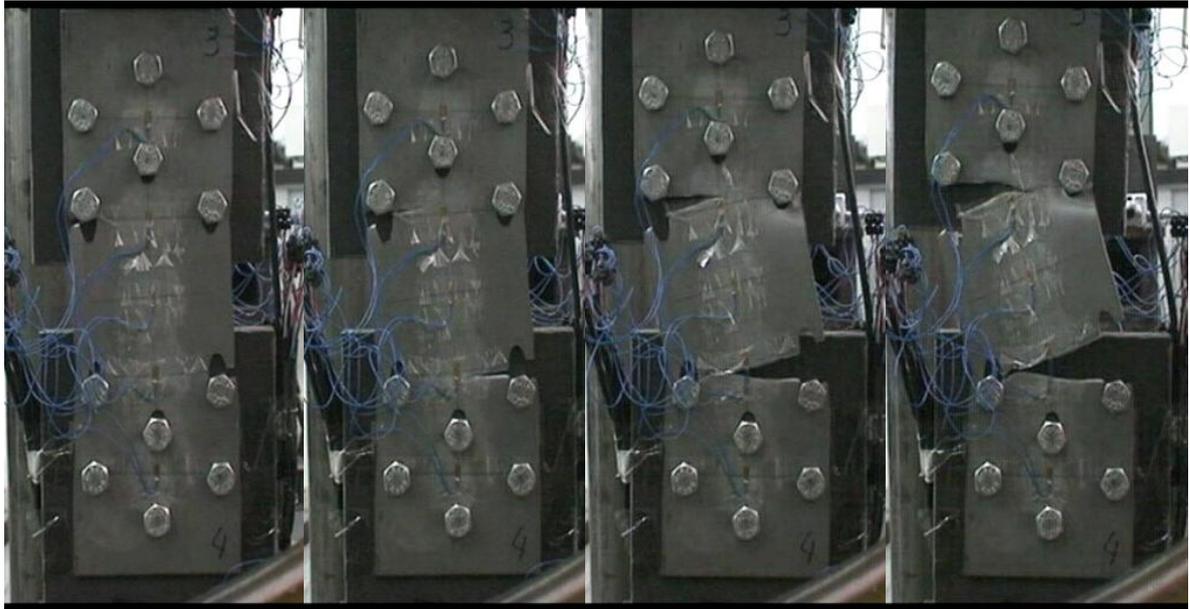


Figura 3.18 – Seqüência de ruptura do ensaio E7_INOX_S30, (SANTOS, 2008)

Na Figura 3.19 e na Figura 3.20 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, obtidos por Santos (2008), onde o mesmo observou o final do comportamento linear da ligação entre as cargas de 250 kN a 300 kN. Também observou o valor de deslocamento associado a carga última, de aproximadamente 36 mm.

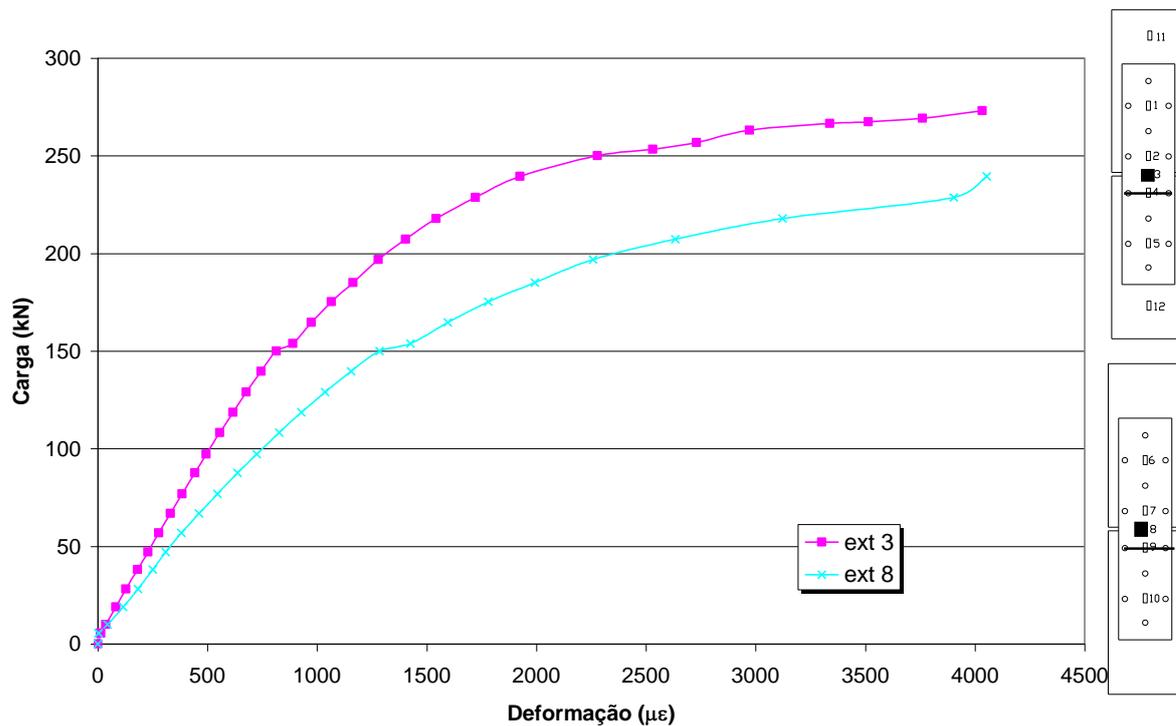


Figura 3.19 – Gráfico carga *versus* deformação - E7_INOX_S30, (SANTOS, 2008)

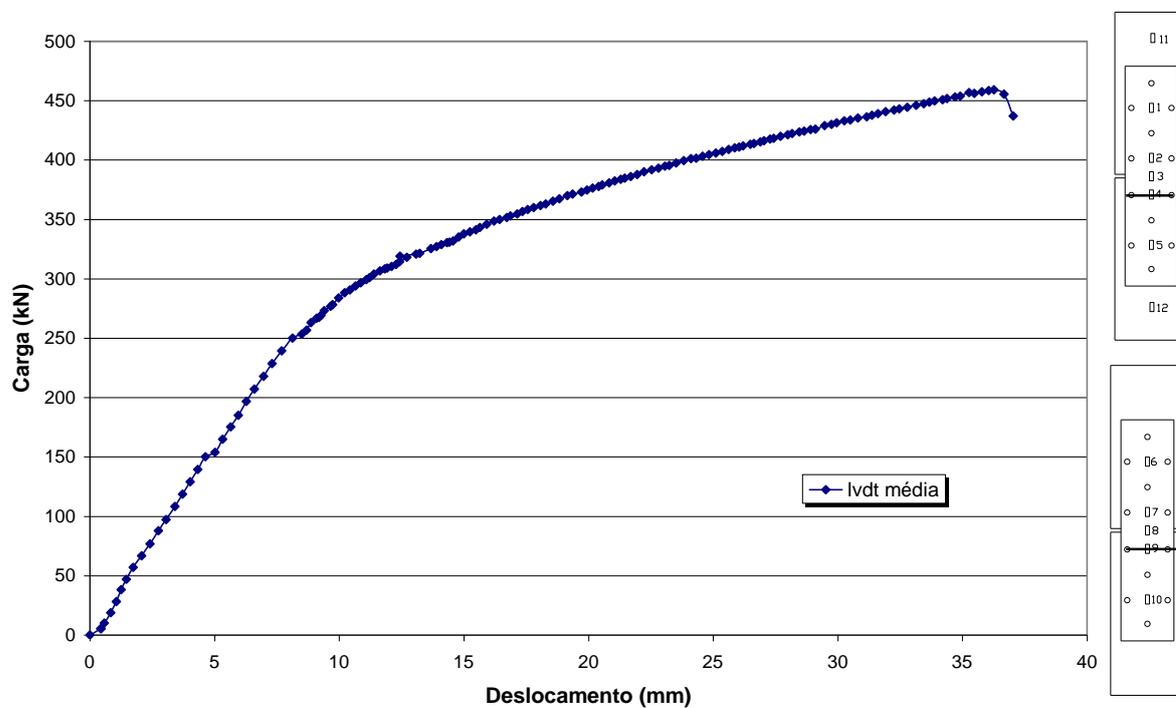


Figura 3.20 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E7_INOX_S30, (SANTOS, 2008)

3.4.3 Ensaio E9 INOX S23

Neste ensaio, Santos (2008) procurou diminuir o valor do parâmetro s baseado numa simples consideração dos resultados dos dois últimos ensaios em aço inoxidável e a relação entre áreas líquidas, buscando a ruptura na seção líquida passando por três furos, resultando no desenho geométrico da Figura 3.21.

O ensaio de Santos (2008) apresentou a ruptura esperada na área líquida passando por três furos com a carga última de 436,0 kN. Porém, conforme Santos (2008), a norma preconiza que a ruptura ocorreria primeiro na seção bruta da chapa com a carga de 302,9 kN, seguida do corte do parafuso com uma carga de 376,0 kN, e, finalmente, romperia na área líquida passando por três furos com a carga de 455,5 kN. A norma fornece para o esmagamento da placa na região dos parafusos, uma carga de 466,9 kN. Na seqüência de fotos da Figura 3.22 pode ser observado o esmagamento ocorrido na placa antes da ruptura da seção líquida passando por três furos.

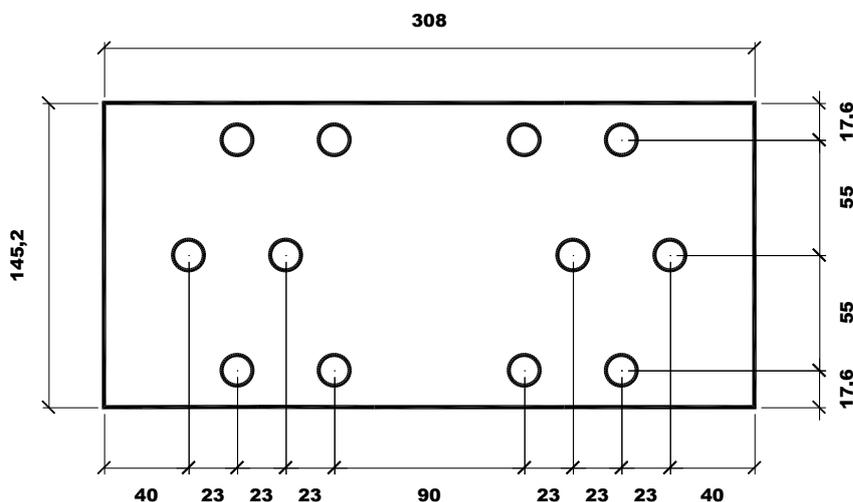


Figura 3.21 – Desenho geométrico do ensaio E9_INOX_S23, (SANTOS, 2008)

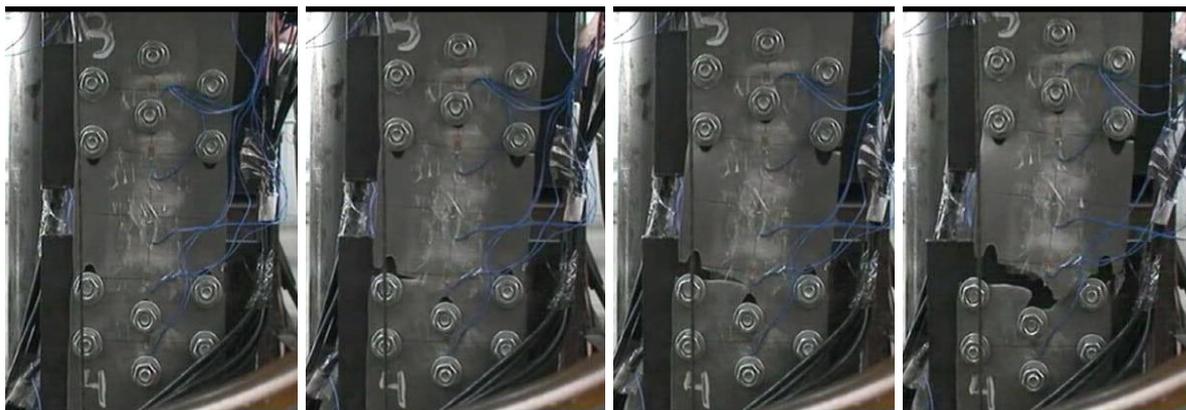


Figura 3.22 – Seqüência de ruptura do ensaio E9_INOX_S23, (SANTOS, 2008)

Na Figura 3.19 e na Figura 3.20 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, obtido por Santos (2008), onde o mesmo observou o final do comportamento linear da ligação entre as cargas de 230 kN a 280 kN. Também observou o valor de deslocamento associado a carga última, de aproximadamente 35 mm.

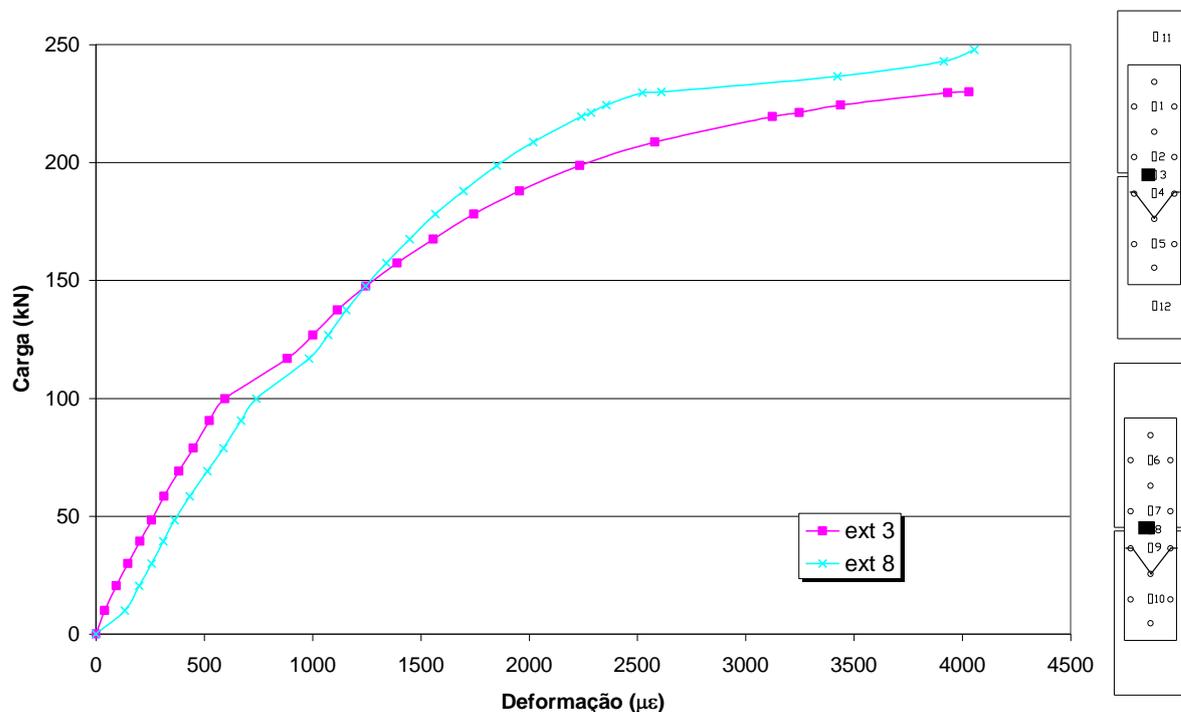


Figura 3.23 – Gráfico carga *versus* deformação - E9_INOX_S23, (SANTOS, 2008)

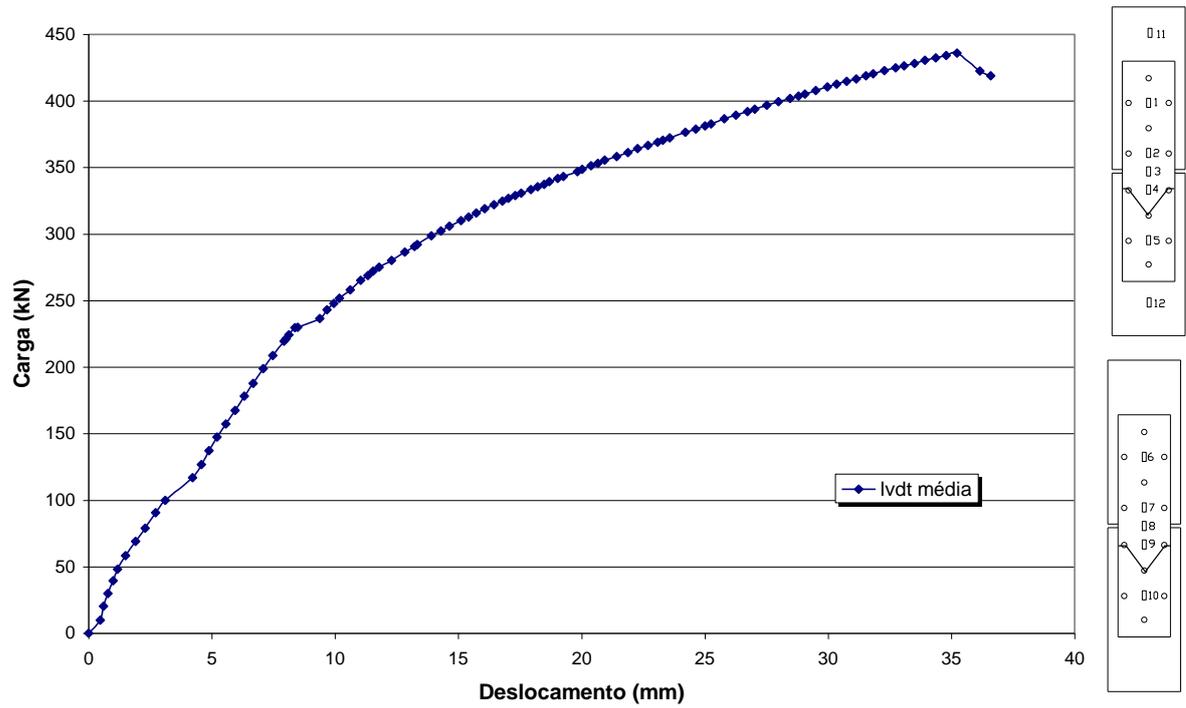


Figura 3.24 – Gráfico carga versus deslocamento - E9_INOX_S23, (SANTOS, 2008)

4 MODELO NUMÉRICO PARA CHAPAS COM FURAÇÃO DEFASADA

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se as etapas do desenvolvimento da análise numérica, descrevendo-se a preparação dos modelos numéricos utilizados para reprodução dos ensaios experimentais realizados por Santos (2008) de chapas com furação defasada submetidas à tração e constituídas de aço inoxidável 304.

Apresentam-se as características relevantes para os modelos em elementos finitos, ou seja, a definição da lei constitutiva do material, o tipo de análise a ser implementada, os tipos de elementos finitos utilizados e as condições de contorno aplicadas. Convém salientar que todos os modelos possuem as mesmas considerações no que diz respeito às características da análise e simplificações adotadas, diferenciando apenas pelas características geométricas.

Faz-se uma comparação dos resultados obtidos nos modelos numéricos através da curva carga *versus* deformação, em pontos predeterminados nos ensaios experimentais, através da utilização de extensômetros, evidenciando o modo de ruína para cada modelo proposto.

4.2 Critérios gerais utilizados na análise numérica

No capítulo três foram apresentados os resultados experimentais do trabalho de Kuwamura (2002) e os modelos numéricos propostos por Kim; Kuwamura (2007), de forma a encontrar e calibrar a configuração de malha que foi aplicada para reproduzir os ensaios experimentais de Santos (2008), visto a complexidade do comportamento estrutural da chapa com furação defasada.

Para a reprodução dos modelos e análise dos resultados também foi utilizado o programa de elementos finitos Ansys - versão 11 (2007). Foram considerados para a modelagem, não-linearidades geométrica e física, assim como, o modelo descrito no capítulo três, no que tange à configuração de malha.

Pela característica da análise, também foi utilizado o elemento finito SOLID45, ver Figura 2.2, para representar a placa e o parafuso, visto que o mesmo possui características peculiares ao desenvolvimento da análise. Para representar o contato entre o fuste do parafuso e a borda do furo, o deslizamento entre a placa em aço inoxidável e a placa base em aço carbono, foram utilizados os elementos TARGET170 e CONTACT173. A Figura 2.3 e a Figura 2.4 mostram as características dos elementos de contato.

Com os resultados obtidos por Santos (2008) do ensaio de tração para o corpo-de-prova em aço inoxidável, foi aplicado o conceito de tensão verdadeira e deformação verdadeira, de forma a corrigir a curva tensão *versus* deformação do material aplicando-se as equações 3.3 e 3.4. A Figura 4.1 e a Figura 4.2 mostram as curvas tensão *versus* deformação para o aço inoxidável 304 e aço carbono, respectivamente. Para representar o comportamento do parafuso, utilizou-se uma curva tensão *versus* deformação linear, com módulo de elasticidade de 205 GPa, tensão última de 1200 MPa e coeficiente de Poisson igual 0,3.

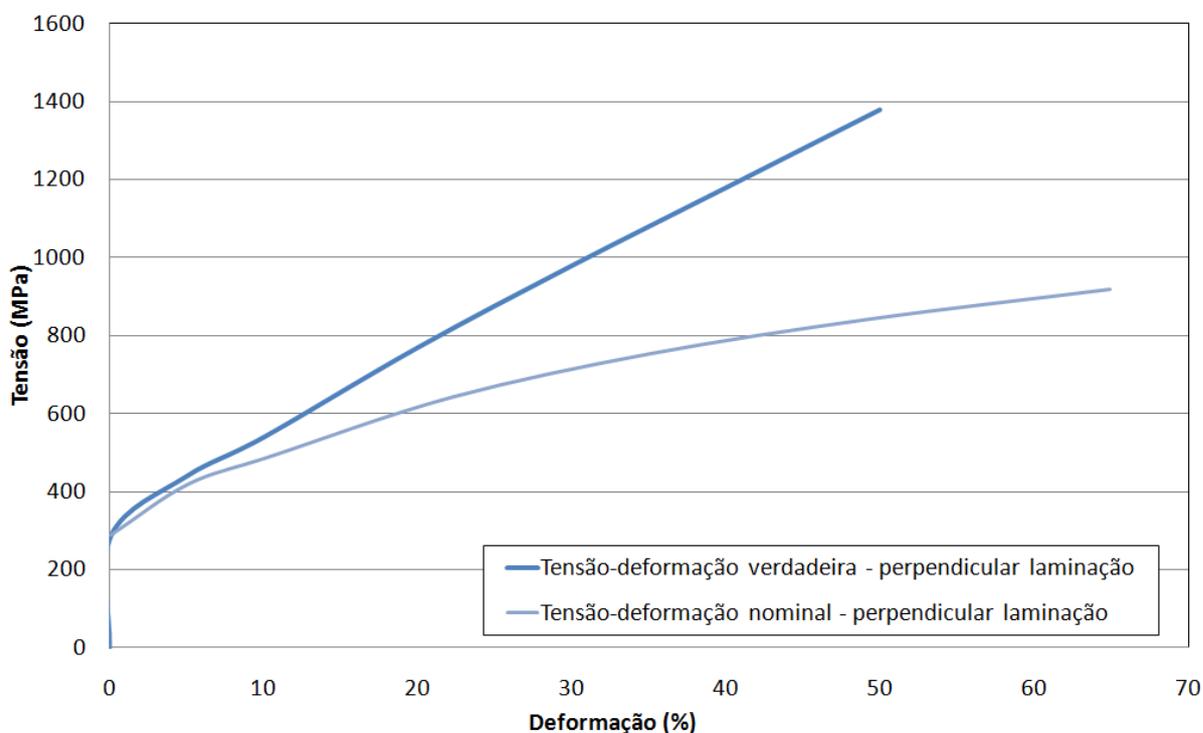


Figura 4.1 – Curva tensão *versus* deformação, aço inoxidável 304

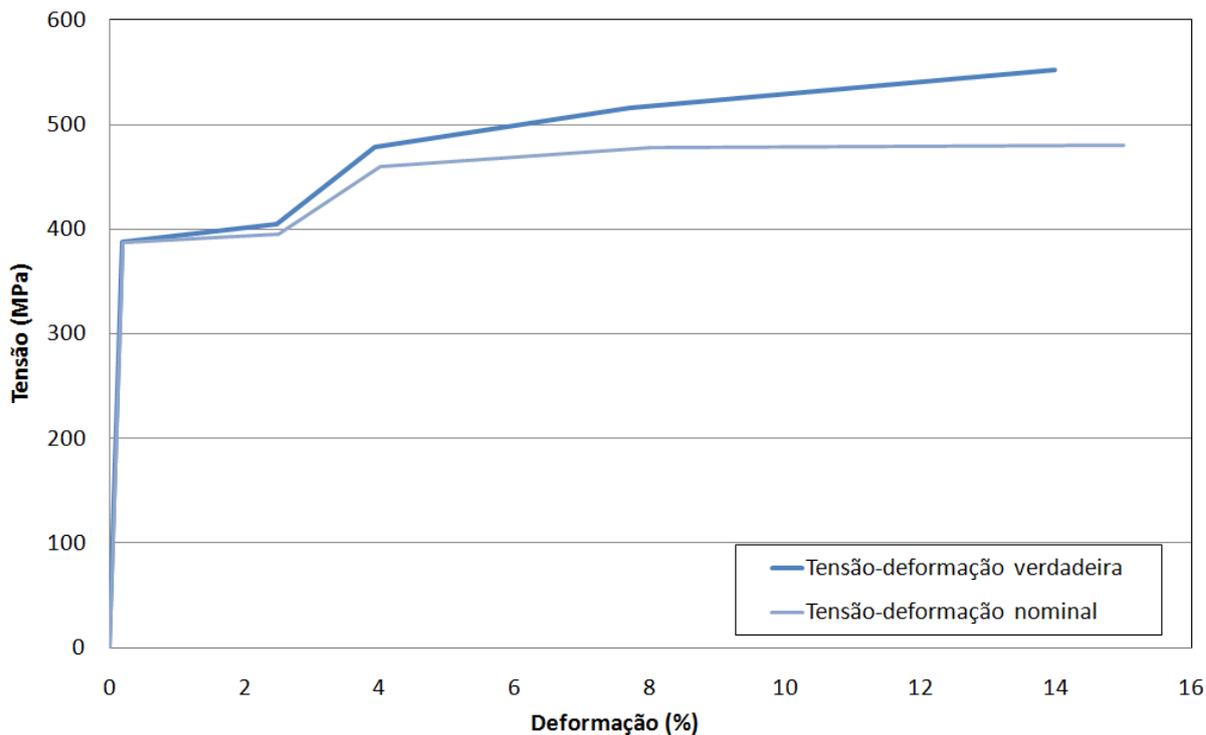


Figura 4.2 – Curva tensão *versus* deformação, aço carbono

4.2.1 Condições de contorno

Para a reprodução dos três ensaios apresentados no capítulo anterior, as condições de contorno e de carregamento foram adotadas em concordância com o modelo experimental. Para simplificação das análises, e pela geometria da ligação propiciar tal procedimento, apenas um oitavo de toda a ligação foi modelada, ou seja, foram criados eixos de simetria em três planos, como pode ser visualizado na Figura 4.3.

Os parafusos para a presente análise foram produzidos em um formato de haste cilíndrica, modelando apenas o fuste do mesmo. No entanto, no ensaio experimental foi utilizada uma arruela para fixação dos parafusos. Desta forma, restringiram-se os nós na região ao redor do furo com as mesmas dimensões aproximadas do acessório, ou seja, os deslocamentos para fora do plano (direção Z), como ilustra a Figura 4.4.

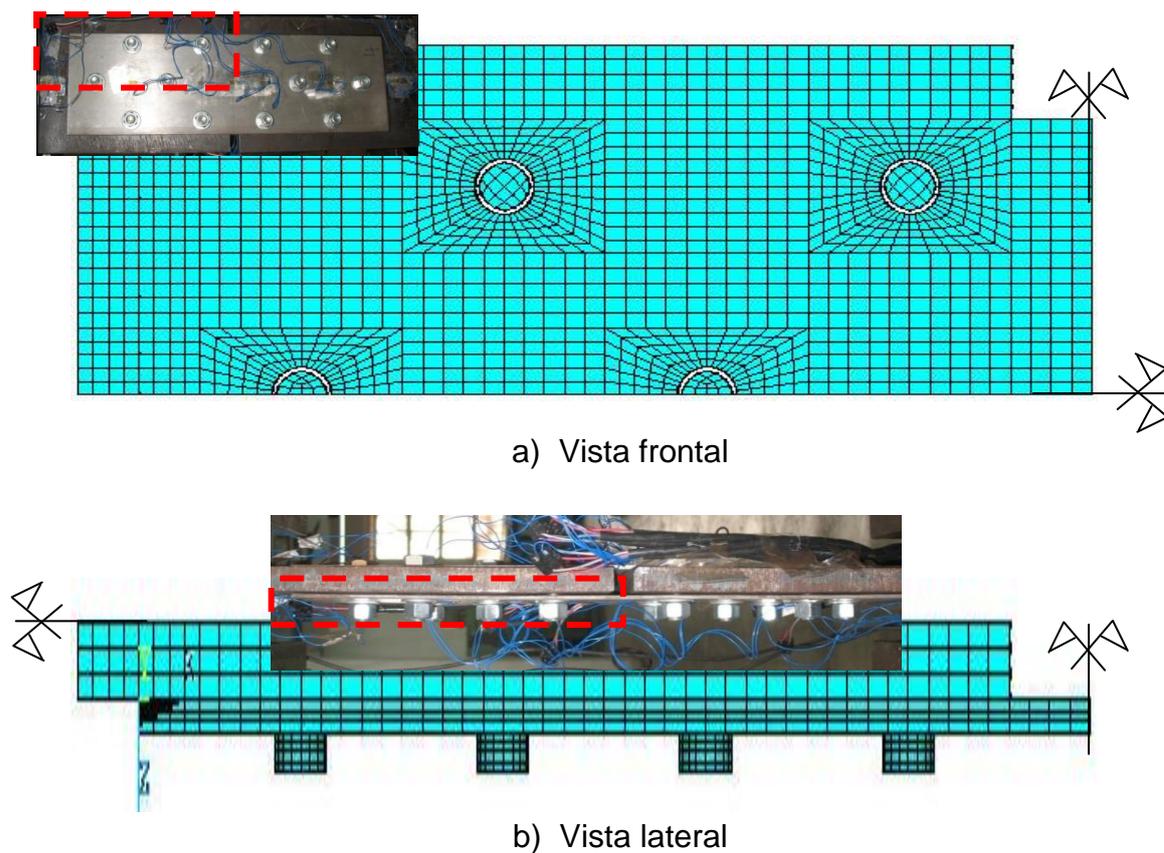


Figura 4.3 – Modelo numérico proposto

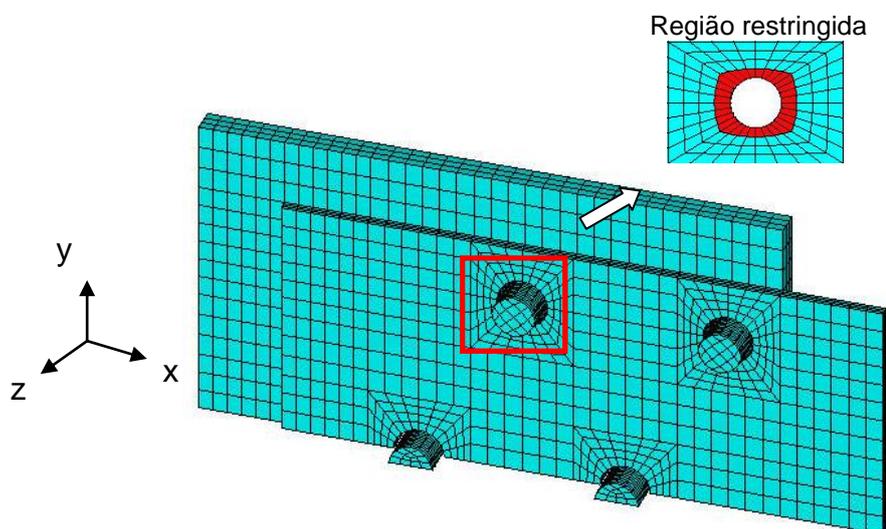


Figura 4.4 – Região restringida, UZ

Há também restrições em uma das extremidades do parafuso, ou seja, foram restringidos os nós desta área nas direções Y e Z respectivamente, ver

Figura 4.5. Há deslocamentos na direção da carga, visto que pela estrutura da chapa, a placa base se desloca, com isto empurra os parafusos, que entram em contato com a placa de aço inoxidável. Uma folga entre as placas e o fuste do parafuso no valor de 1,0 mm foi adotada.

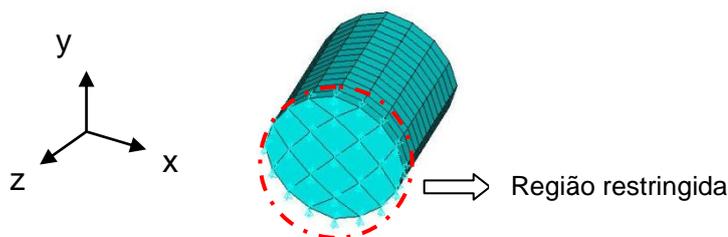


Figura 4.5 – Região restringida do parafuso nas direções UY e UZ

4.2.2 Carregamento aplicado

Para os três modelos desenvolvidos, a carga última foi obtida através de deslocamento imposto na extremidade da placa base, sendo o valor considerado igual a 20mm na direção negativa do eixo X, 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, ou seja, os graus de liberdade dos nós da face externa da extremidade da placa base foram acoplados em apenas um único nó, localizado no centro da seção transversal.

O deslocamento foi dividido em sub-passos, e para o parâmetro de convergência de descolamento utilizou-se o valor de 0.01, segundo recomenda Chung; Ip (2000). A

Figura 4.6 ilustra as condições de carregamento aplicadas para os modelos desenvolvidos.

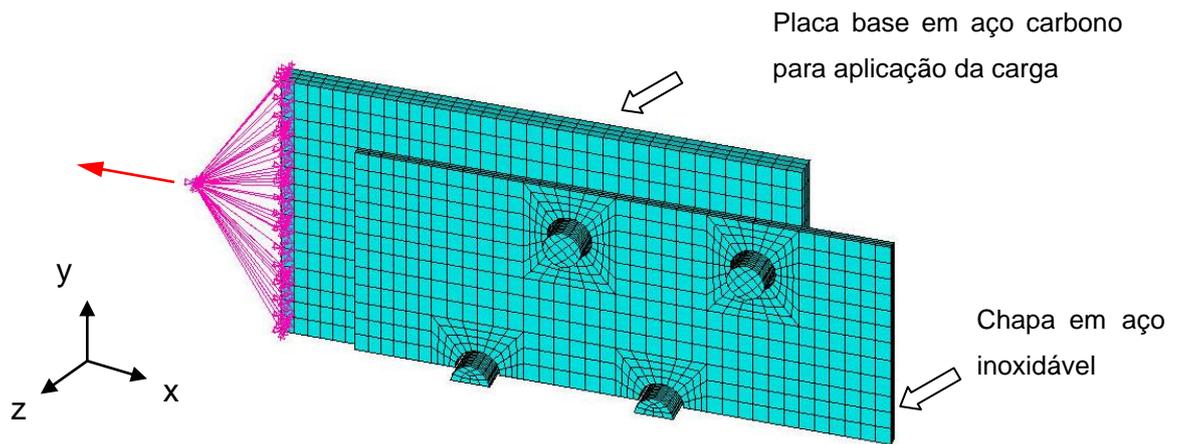
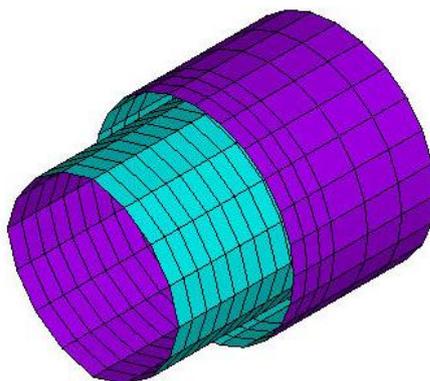


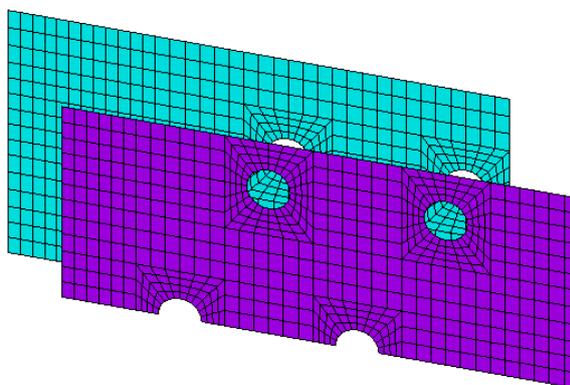
Figura 4.6 – Carregamento aplicado

4.2.3 Elementos de contato

Como foi dito anteriormente, os elementos de contato utilizados são TARGET170 e CONTACT173, que servem para estabelecer novos termos na matriz de rigidez da estrutura, fornecendo informações das regiões que sofrerão pressão quando comprimidas umas contra as outras. Para a reprodução de todos os modelos, foi atribuído o valor de 0,25 para o coeficiente de atrito entre parafuso e furo, segundo recomenda Chung; Ip (2000) e 0,05 entre placas. Na Figura 4.7, apresenta-se uma vista isométrica, ilustrando os elementos de contato da interface entre o fuste do parafuso e a parede do furo das placas (a), e entre placas (b).



a) Placas mais parafuso



b) Entre placas

Figura 4.7 – Elementos de contato

4.2.4 Malha de elementos finitos

No capítulo três, verificou-se quais as dimensões dos elementos que fornecem uma melhor resposta dos modelos numéricos, com a configuração de malha proposta. Concluiu-se que elementos da ordem de 2 mm de dimensão, conseguem em termos de carga última, um valor mais próximo dos ensaios experimentais. No entanto, foi efetuada uma análise preliminar para duas malhas de elementos finitos, reproduzindo o ensaio 7 do trabalho de Santos (2008). A Figura 4.8(a), ilustra a malha que corresponde às dimensões do referido estudo, porém, pela complexa análise dos modelos que serão estudados, optou-se por utilizar uma

malha menos densa, com elementos de aproximadamente 3,5 mm, como mostra a Figura 4.8(b).

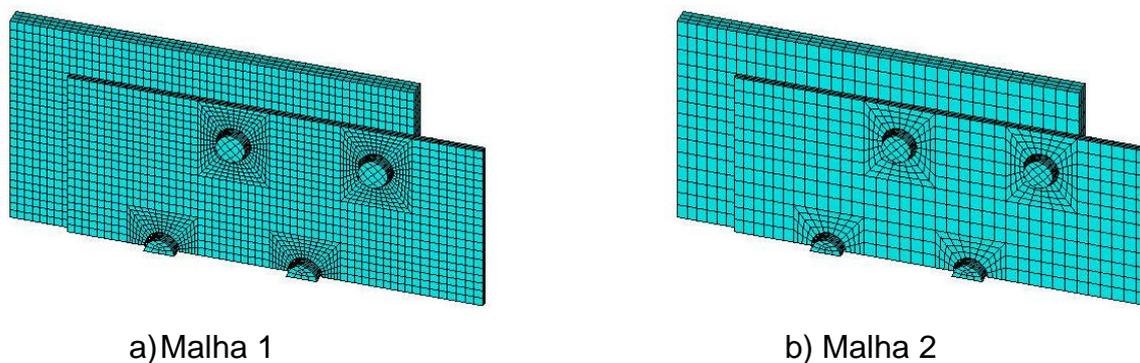


Figura 4.8 – Discretização dos elementos

O gráfico carga *versus* deslocamento da Figura 4.9, evidencia que o comportamento estrutural de ambas as malhas propostas é idêntico. A diferença em termos de carga última corresponde a um valor de aproximadamente 1%. Desta forma, em busca de um processamento de dados mais eficaz, com um tempo de duração menor, optou-se por utilizar em todos os modelos da referida análise, uma malha menos densa.

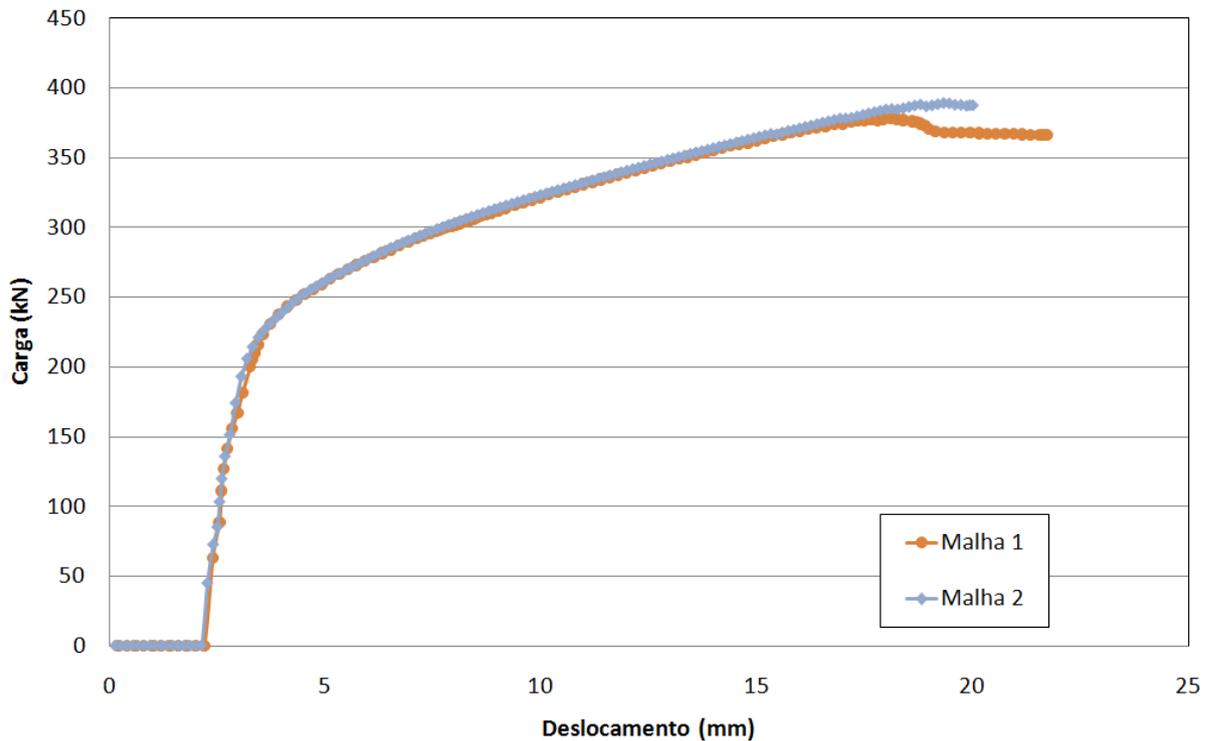


Figura 4.9 – Gráfico carga *versus* deslocamento

4.3 Análise dos resultados – experimental *versus* numérico

4.3.1 Ensaio E5 INOX S50

Conforme mencionado anteriormente, no trabalho de Santos (2008), o referido ensaio apresentou ruptura na área líquida passando por dois furos com a carga última de 480 kN, porém, antes da ruptura, ocorreu esmagamento da chapa. Pelo dimensionamento segundo o EUROCODE 3, Parte 1.4 (EUROCODE 3, 2005), os estados limites últimos seriam: escoamento da seção bruta da chapa em aço inoxidável, com a carga de 302,9 kN, esmagamento da chapa na região dos parafusos com a carga de 466,9 kN e finalmente, rompimento na área líquida na seção com dois furos com a carga de 494,6 kN.

Para a análise dos resultados dos modelos numéricos com a chapa apresentando as mesmas dimensões apresentadas na Tabela 3.1, foi proposta a malha de elementos finitos ilustrada na Figura 4.10 através de uma vista isométrica.

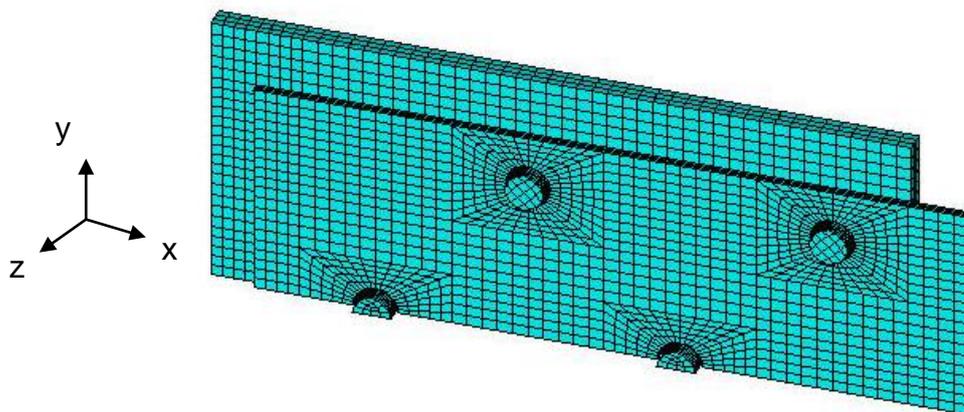


Figura 4.10 – Discretização dos elementos, ENSAIO E5_INOX_S50

Ao analisar o gráfico da Figura 4.11, observa-se que o modelo numérico proposto apresentou uma carga máxima no valor de 389 kN. Desta forma, esse valor corresponde a uma diferença de 19% da carga última obtida pelo ensaio experimental. Vale ressaltar que já foi desconsiderada a folga entre a borda do furo e fuste do parafuso para confecção do gráfico em questão.

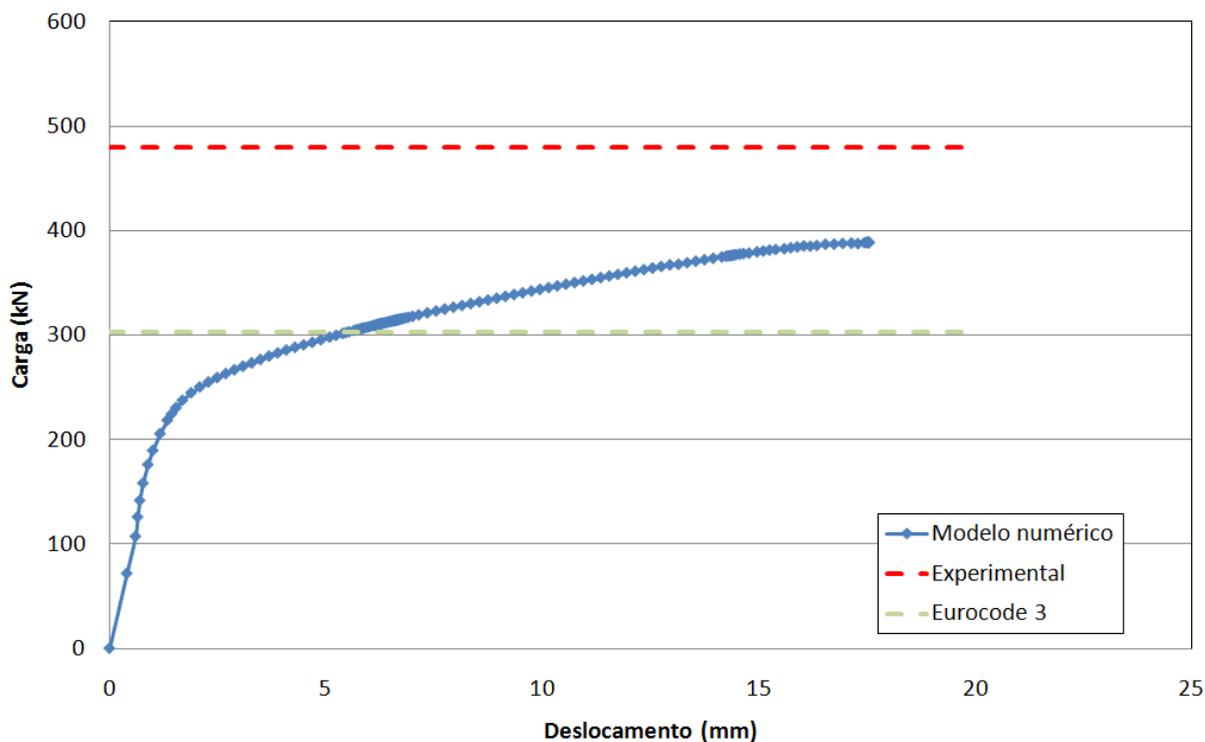


Figura 4.11 – Gráficos com resultados numérico ENSAIO E5_INOX_S50

A Figura 4.12 e a Figura 4.13 apresentam as curvas carga *versus* deformação, do modelo numérico proposto e do ensaio experimental, nas posições predeterminadas no trabalho de Santos (2008). Vale ressaltar que os extensômetros utilizados nos ensaios experimentais têm limites máximos para mensurar as deformações. Desta forma, para o presente trabalho, optou-se por apresentar apenas o comportamento da chapa para os limites impostos pelo equipamento de ensaio, visto que, no modelo numérico, as deformações foram maiores que as observadas experimentalmente.

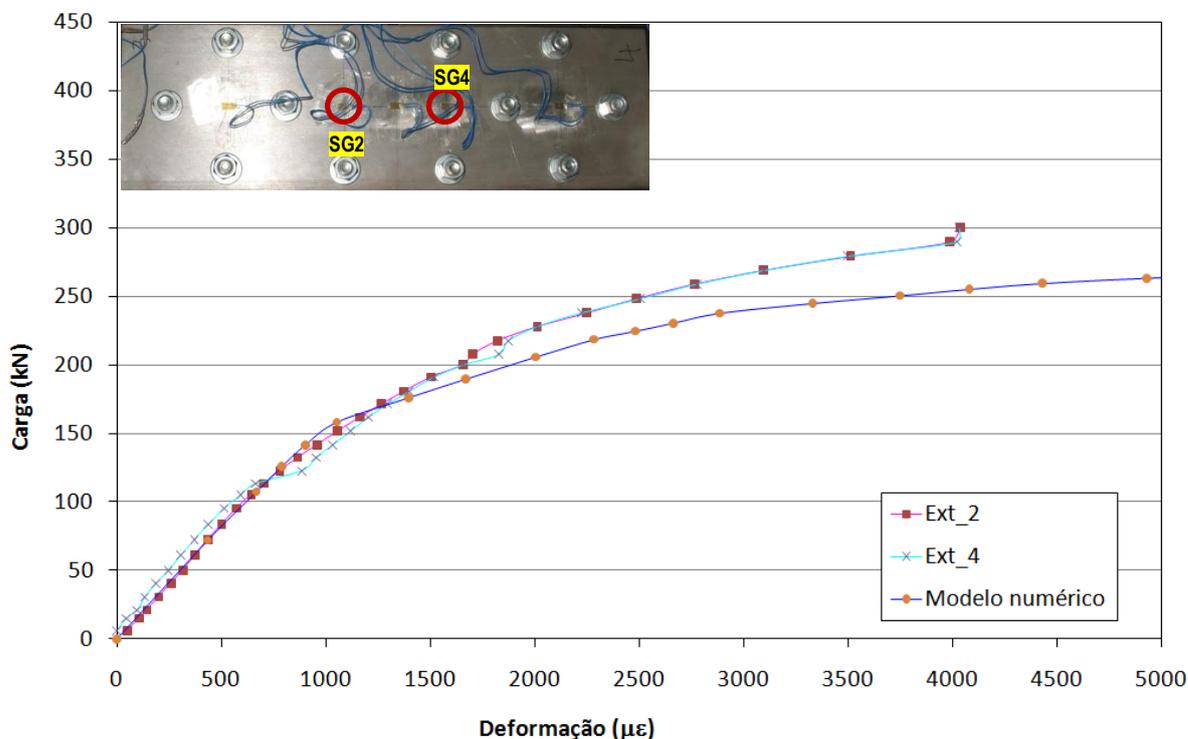


Figura 4.12 – Carga *versus* deformação – SG2 e SG4 - ENSAIO E5_INOX_S50

Observa-se nos gráficos carga *versus* deformação, que o modelo numérico proposto conseguiu representar o comportamento apresentado pela chapa com furação defasada do ensaio experimental. No entanto, para os extensômetros SG3 e SG8, a carga apresentada para um mesmo nível de deformação foi menor.

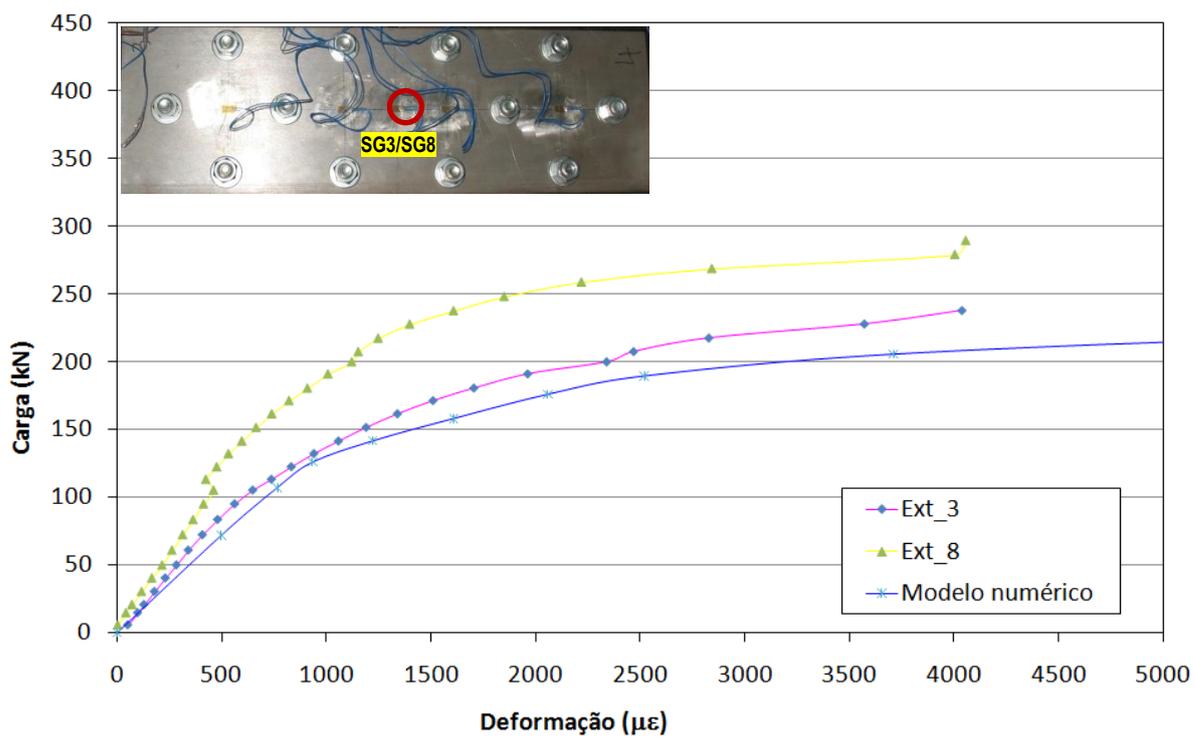


Figura 4.13 – Carga versus deformação – SG3 e SG8 - ENSAIO E5_INOX_S50

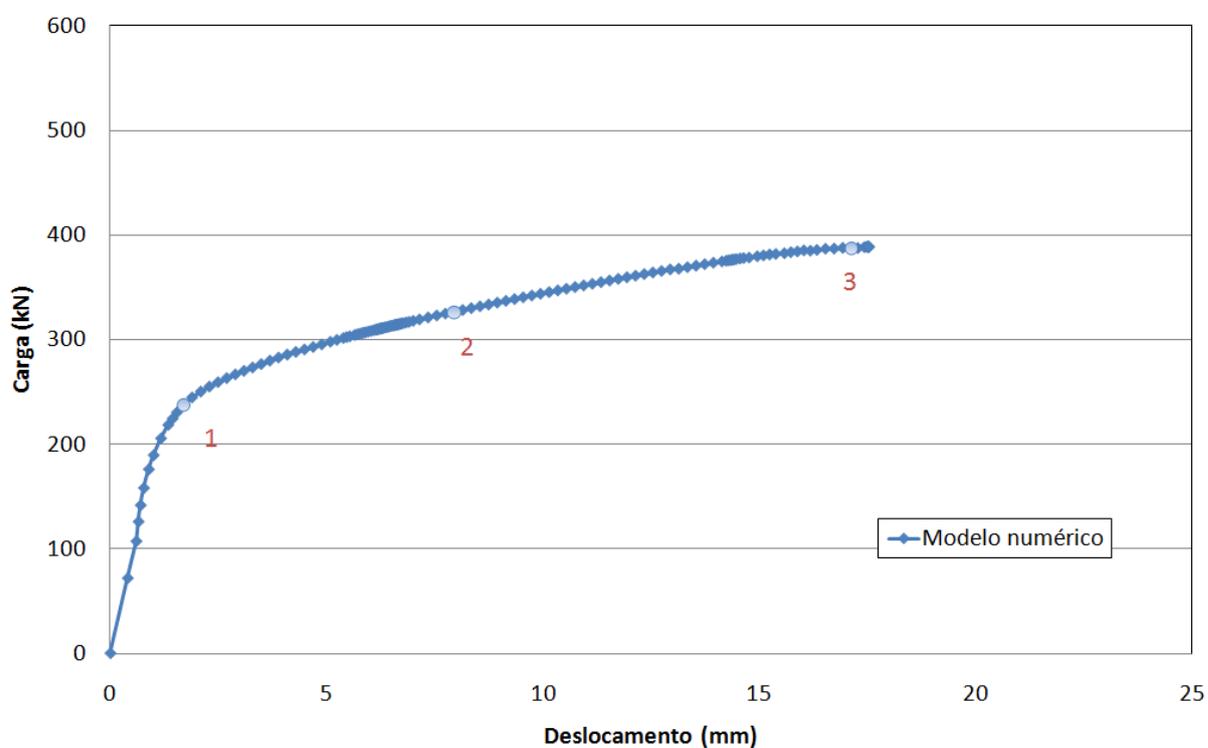
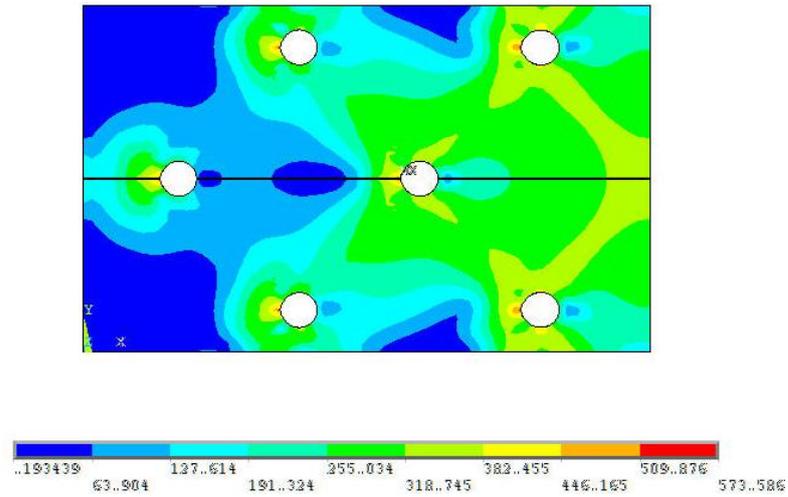


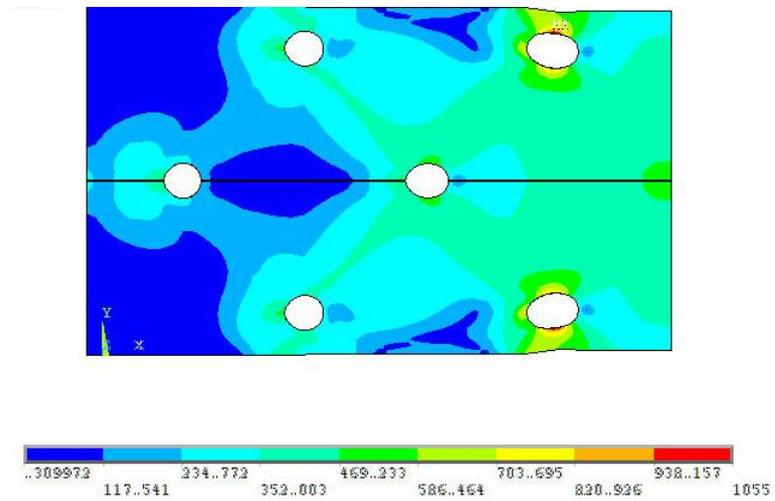
Figura 4.14 – Carga versus deslocamento – modelo numérico - ENSAIO E5_INOX_S50

A Figura 4.15 ilustra o nível de tensão da placa de aço inoxidável deformada correspondente aos pontos 1, 2 e 3, da curva carga *versus* deslocamento, apresentada na Figura 4.14. Pode-se observar que entre a borda da placa e o furo aparecem tensões elevadas. Também evidencia-se que a ruptura dar-se-à pela seção líquida da ligação. No entanto, não é claramente verificado qual o caminho da ruptura, ou seja, podendo ocorrer em dois ou três furos. Tal aspecto verificado, conseguiu reproduzir o ensaio experimental, no qual, a ruptura deu-se em dois furos, como dito anteriormente.

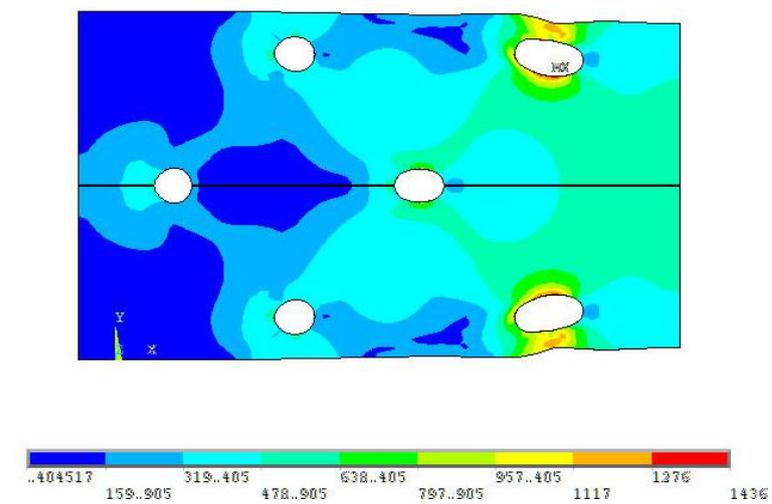
Outro aspecto importante da modelagem numérica e que merece destaque, refere-se ao fato de que a configuração deformada apresentada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos. Este fato está representado na Figura 4.16. Observa-se também a estrição da placa de aço inoxidável entre o furo e a extremidade da placa, local esse, onde ocorre a ruptura em concordância com o ensaio experimental.



a) Ponto 1



b) Ponto 2



c) Ponto 3

Figura 4.15 – Distribuição de tensões, Von Mises – E5_INOX_S50 (em MPa)

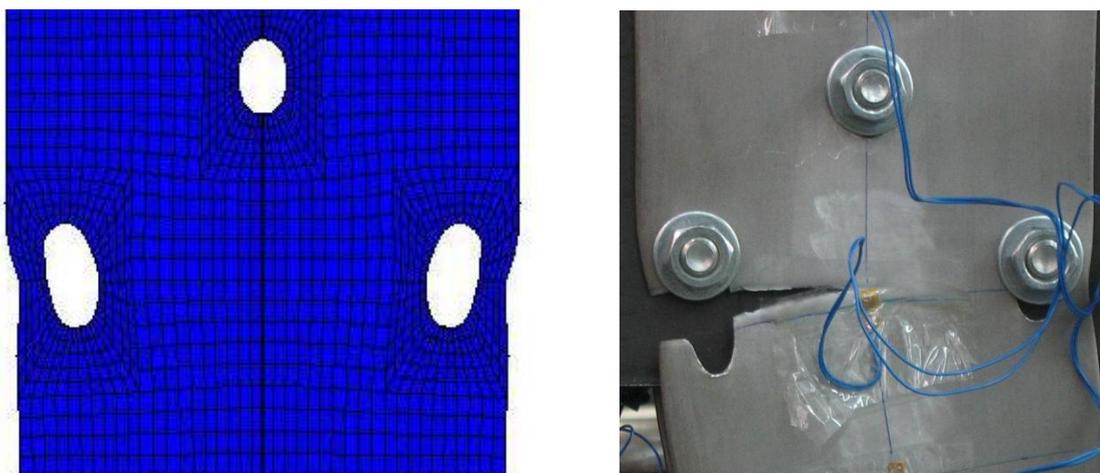


Figura 4.16 – Deformada – Numérico *versus* experimental

4.3.2 Ensaio E7 INOX S30

Conforme mencionado anteriormente, no trabalho de Santos(2008), o referido ensaio apresentou ruptura na área líquida passando por dois furos com a carga última de 459 kN, porém, antes da ruptura, ocorreu esmagamento da chapa. Pelo dimensionamento, segundo o EUROCODE 3, Parte 1.4 (EUROCODE 3, 2005), os estados limites últimos seriam: escoamento da seção bruta da chapa em aço inoxidável, com a carga de 302,9 kN, esmagamento da chapa na região dos parafusos com a carga de 466,9 kN e finalmente, romperia na área líquida na seção com dois furos com a carga de 469,8 kN.

Para a análise dos resultados dos modelos numéricos com a chapa apresentando as mesmas dimensões conforme consta na Tabela 3.1, foi proposta a malha de elementos finitos, ilustrada na Figura 4.17 através de uma vista isométrica.

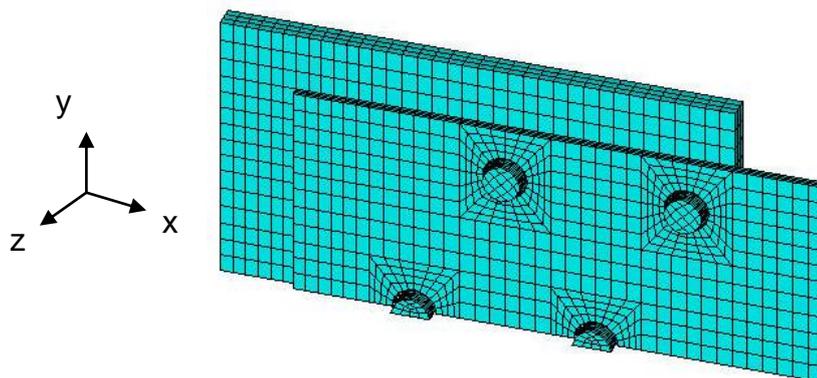


Figura 4.17 – Discretização dos elementos, ENSAIO E7_INOX_S30

Ao analisar o gráfico da Figura 4.18 que apresenta a curva carga *versus* deslocamento, observa-se que o modelo numérico proposto apresentou uma carga máxima no valor de 389 kN. Então, este valor corresponde a uma diferença de 15% da carga última obtida pelo ensaio experimental. Novamente, foi desconsiderada a folga entre a borda do furo e o fuste do parafuso para confecção do gráfico em questão.

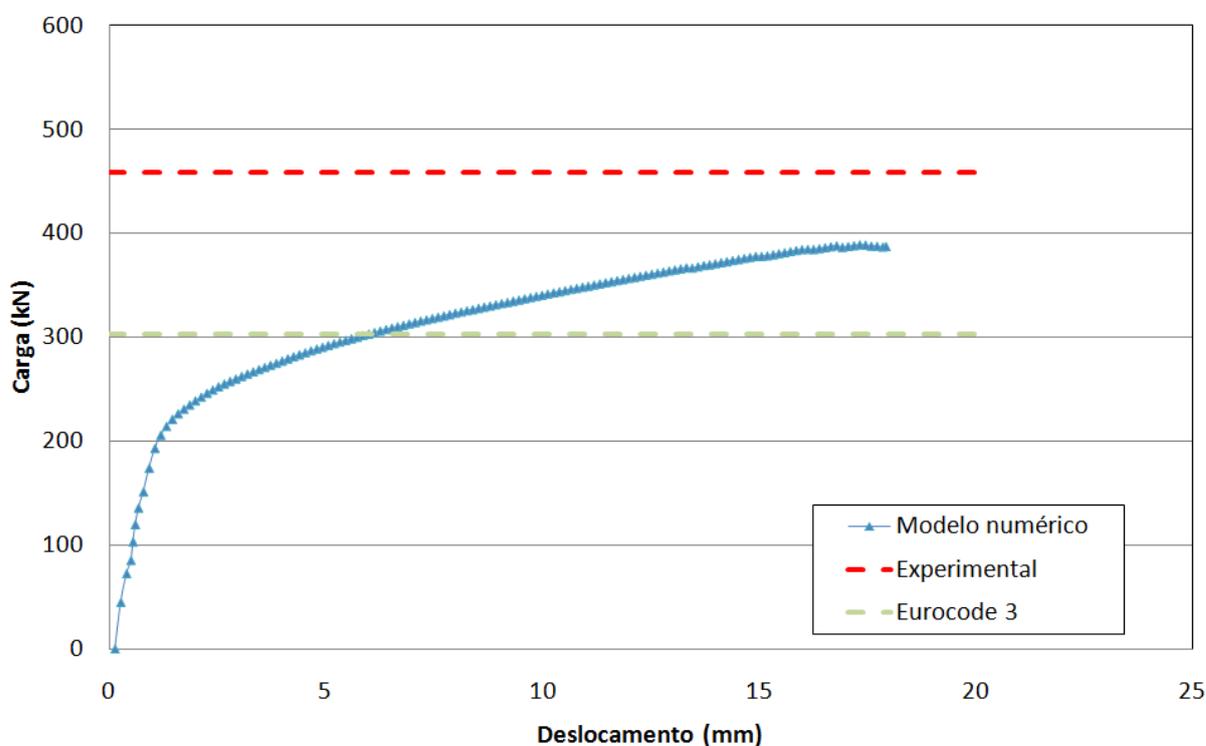


Figura 4.18 – Gráficos com resultados numérico ENSAIO E7_INOX_S30

A Figura 4.19 e a Figura 4.20 apresentam as curvas carga *versus* deformação, do modelo numérico proposto e do ensaio experimental, nas posições predeterminadas no trabalho de Santos (2008), e indicados nas figuras em questão.

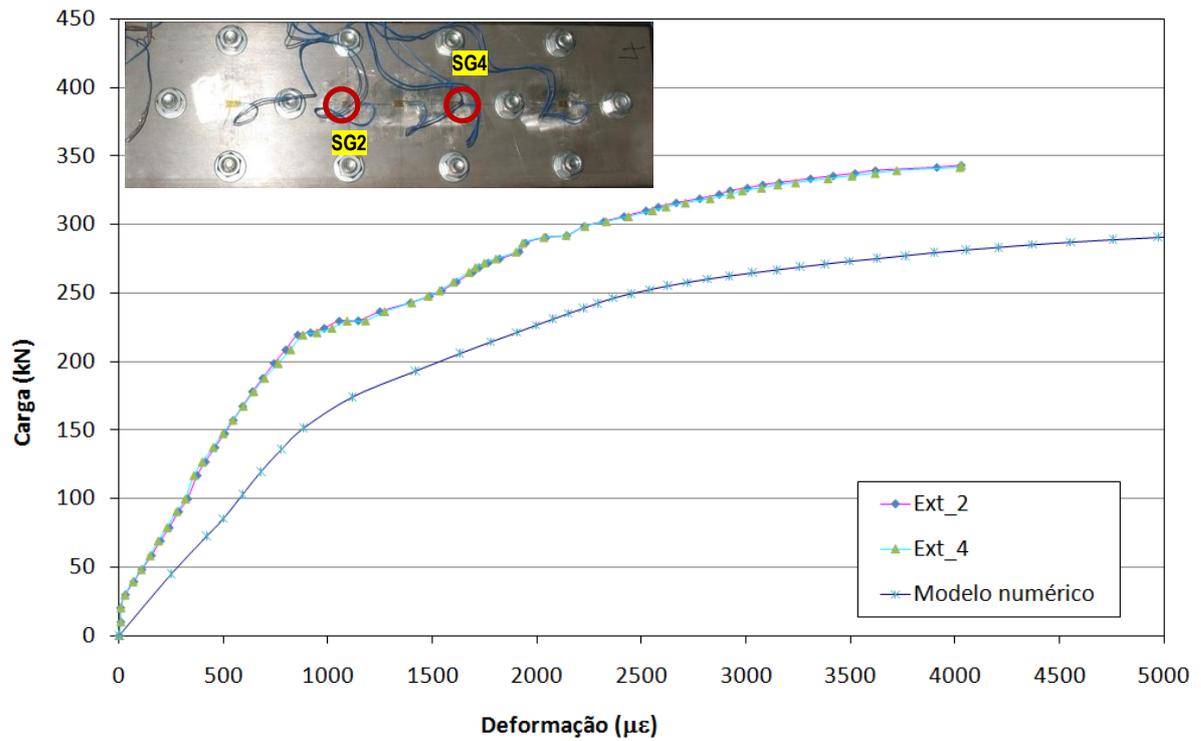


Figura 4.19 – Carga *versus* deformação – SG2 e SG4 - ENSAIO E7_INOX_S30

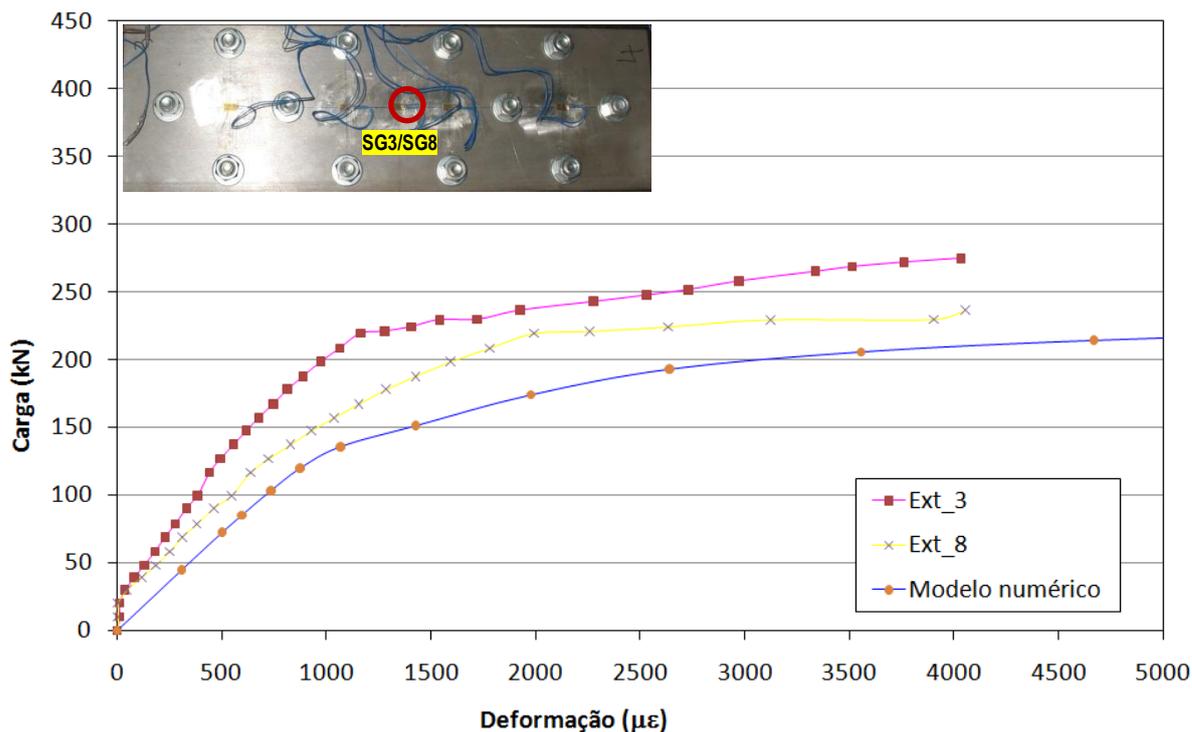


Figura 4.20 – Carga *versus* deformação – SG3 e SG8 - ENSAIO E7_INOX_S30

Observa-se nos gráficos carga *versus* deformação, que o modelo numérico proposto apresentou um comportamento diferente a nível de deformações, em comparação ao ensaio experimental. Para ambos os gráficos, o ensaio experimental apresentou uma maior carga e uma rigidez mais elevada do que a numérica.

A Figura 4.22 ilustra o nível de tensão da placa de aço inoxidável deformada correspondente aos pontos 1, 2 e 3, da curva carga *versus* deslocamento, ilustrada na Figura 4.21. Observa-se que entre a borda da placa e o furo aparecem tensões elevadas. Também evidencia que a ruptura dar-se-á pela seção líquida da ligação com 2 furos.

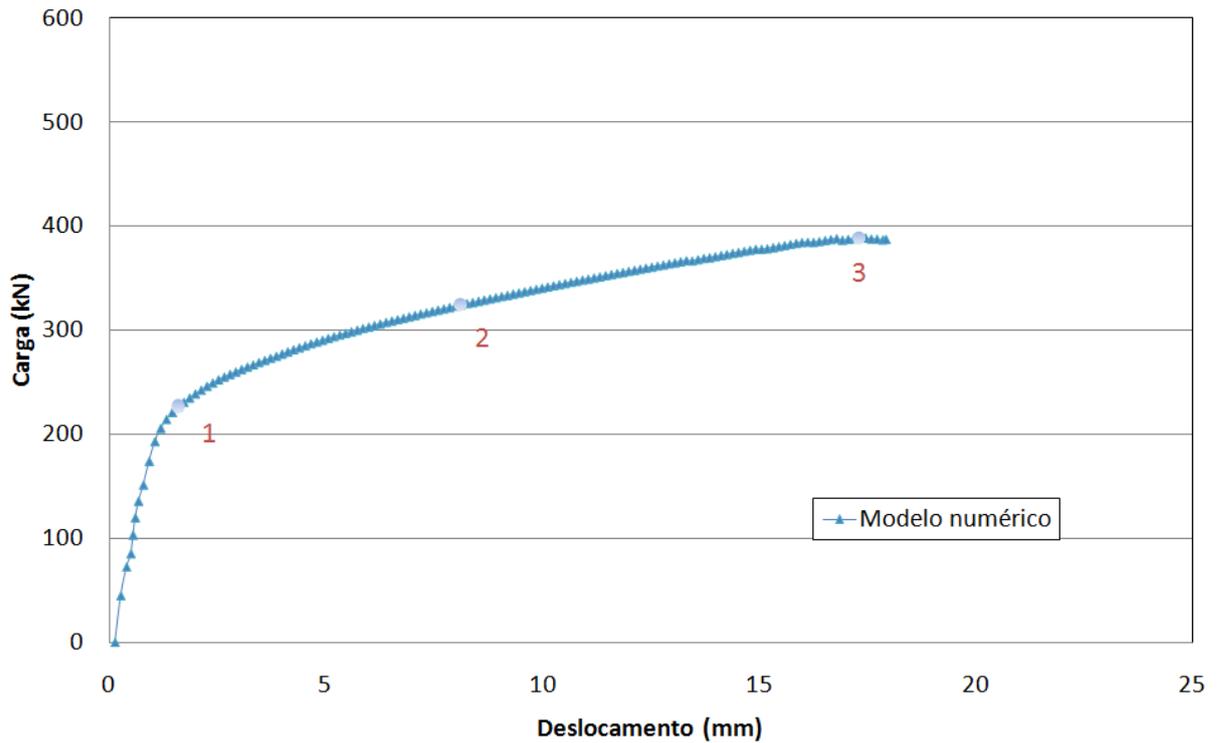
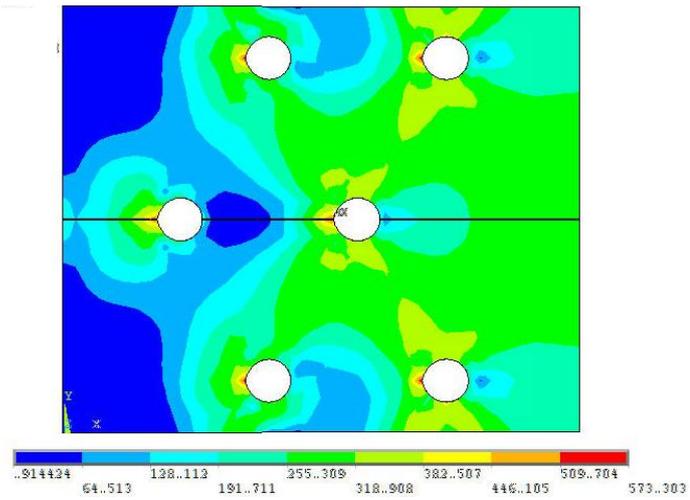
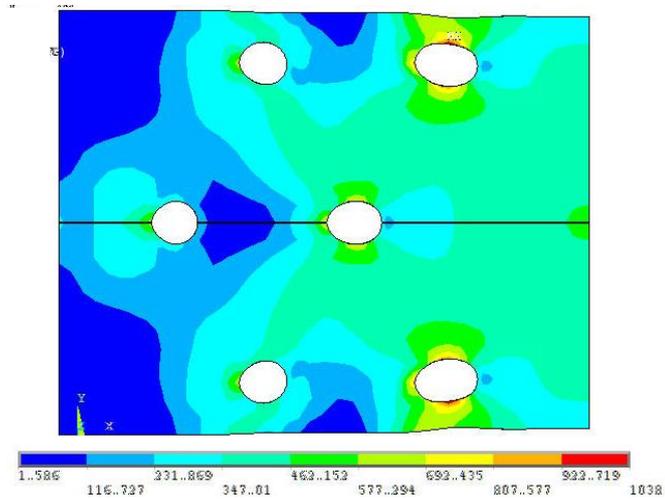


Figura 4.21 – Carga *versus* deslocamento – modelo numérico - ENSAIO E7_INOX_S30

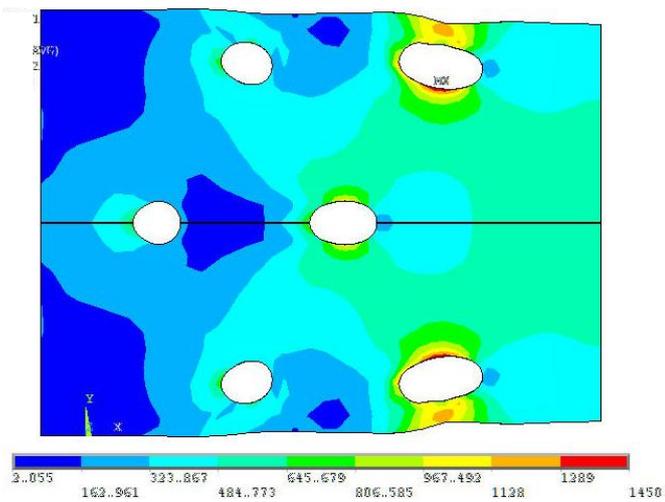
A configuração deformada apresentada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos. Este fato está representado na Figura 4.23. Observa-se também a estricção da placa de aço inoxidável entre o furo e a extremidade da placa, local esse onde ocorre a ruptura, em concordância com o ensaio experimental.



a) Ponto 1



b) Ponto 2



c) Ponto 3

Figura 4.22 – Distribuição de tensões de Von Mises – E7_INOX_S30 (em MPa)

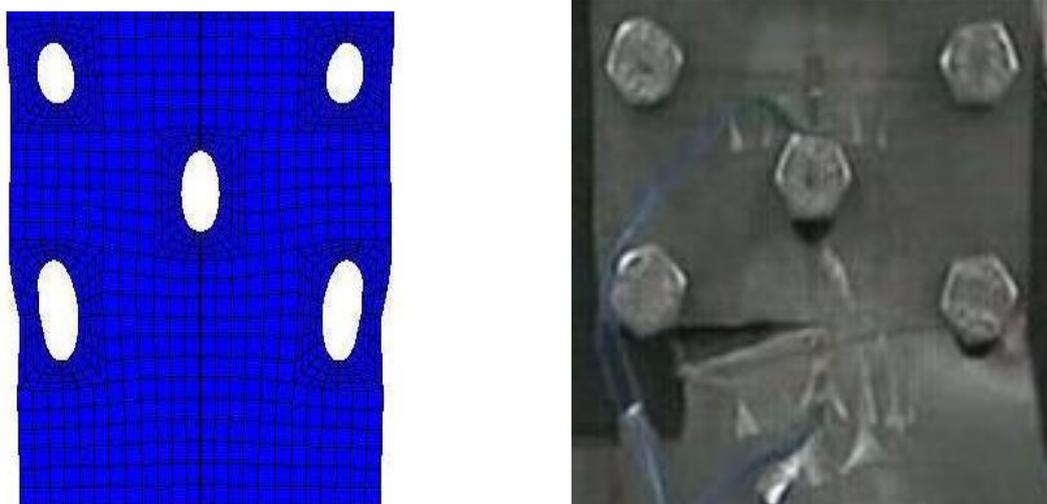


Figura 4.23 – Deformada – Numérico *versus* experimental

4.3.3 Ensaio E9_INOX_S23

Este ensaio realizado por Santos (2008) apresentou ruptura na área líquida passando por três furos com a carga última de 436 kN, porém, antes da ruptura ocorreu esmagamento da chapa. Pelo dimensionamento segundo o EUROCODE 3, Parte 1.4 (EUROCODE 3, 2005), os estados limites últimos seriam: escoamento da seção bruta da chapa em aço inoxidável, com a carga de 302,9 kN, esmagamento da chapa na região dos parafusos com a carga de 466,9 kN e finalmente, rompimento na área líquida na seção com dois furos com a carga de 455,5 kN.

Para a análise dos resultados dos modelos numéricos com a chapa apresentando as mesmas dimensões apresentadas Tabela 3.1, foi proposta a malha de elementos finitos, ilustrada na Figura 4.24 através de uma vista isométrica.

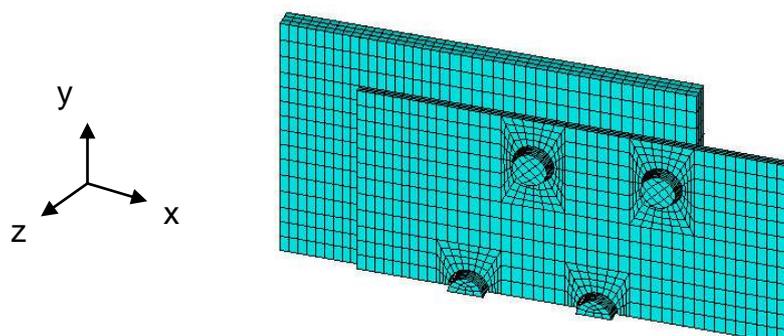


Figura 4.24 – Discretização dos elementos, ENSAIO E9_INOX_S23

Ao analisar o gráfico da Figura 4.25, observa-se que o modelo numérico proposto apresentou uma carga máxima no valor de 385 kN. Desta forma, esse valor corresponde a uma diferença de 12% da carga última obtida pelo ensaio experimental.

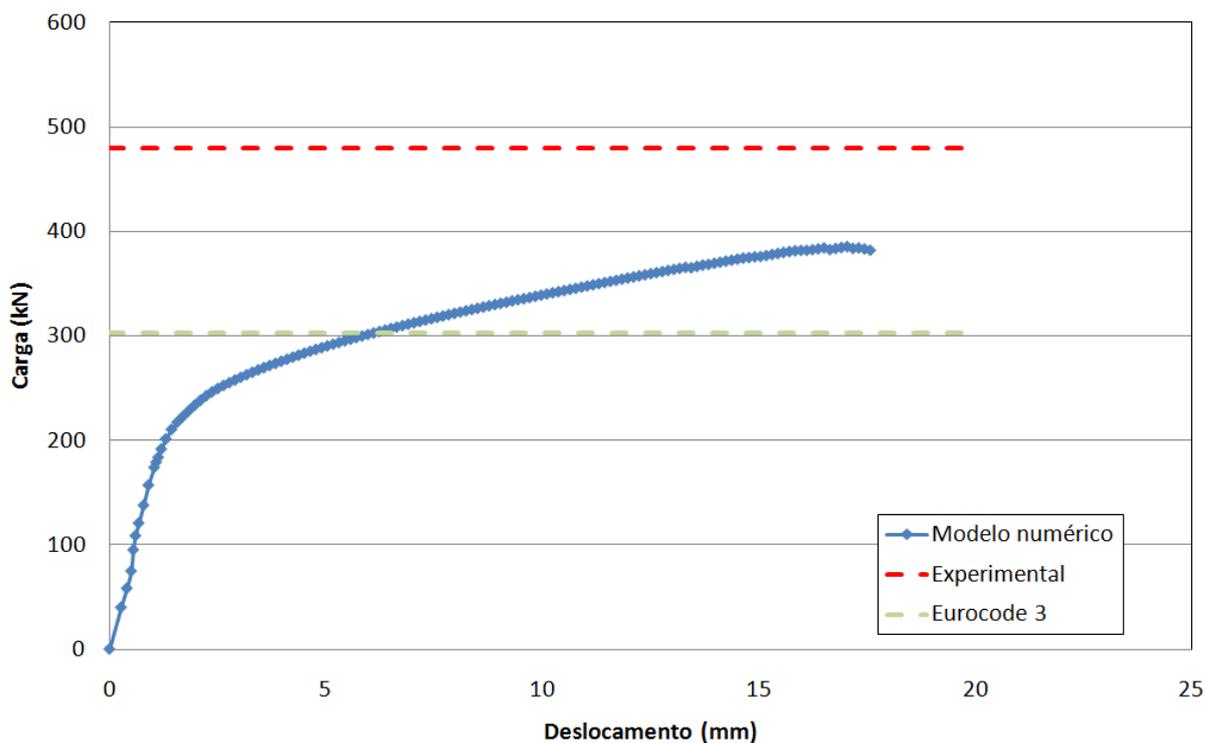


Figura 4.25 – Gráficos com resultados numérico - ENSAIO E9_INOX_S23

A Figura 4.19 e a Figura 4.20 apresentam as curvas carga *versus* deformação, do modelo numérico proposto e do ensaio experimental, nas posições predeterminadas no trabalho de (SANTOS, 2008).

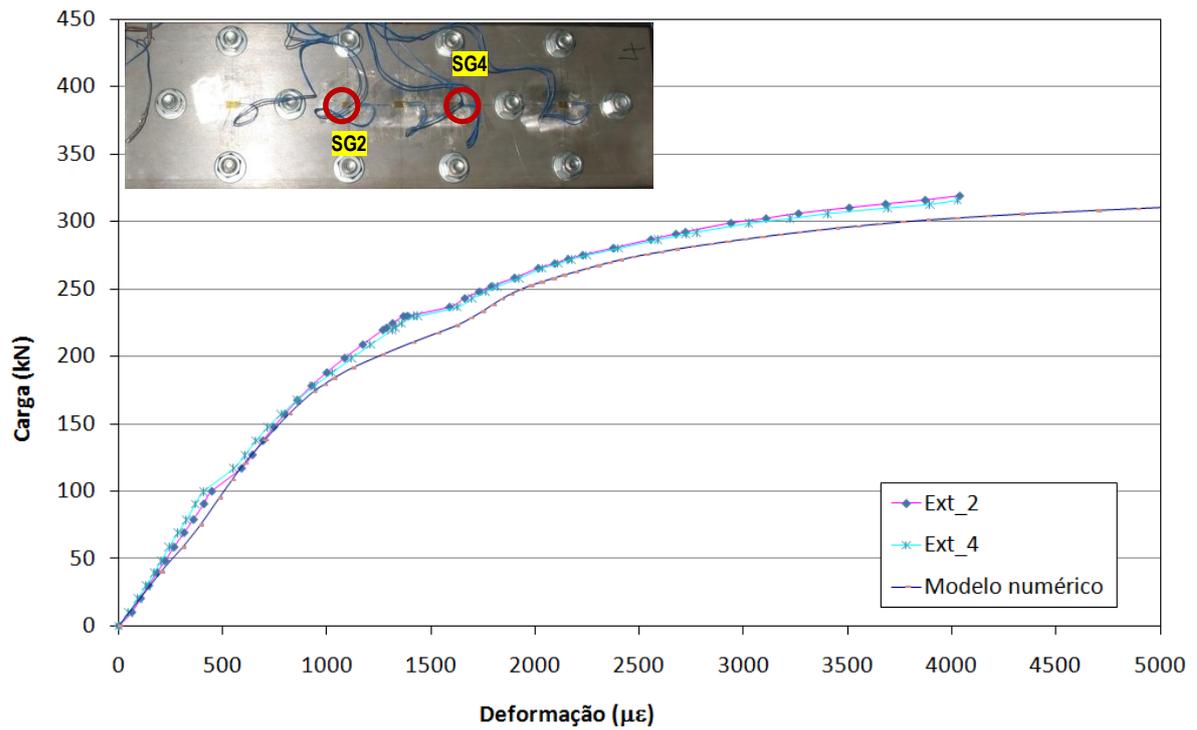


Figura 4.26 – Carga versus deformação – SG2 e SG4 - ENSAIO E9_INOX_S23

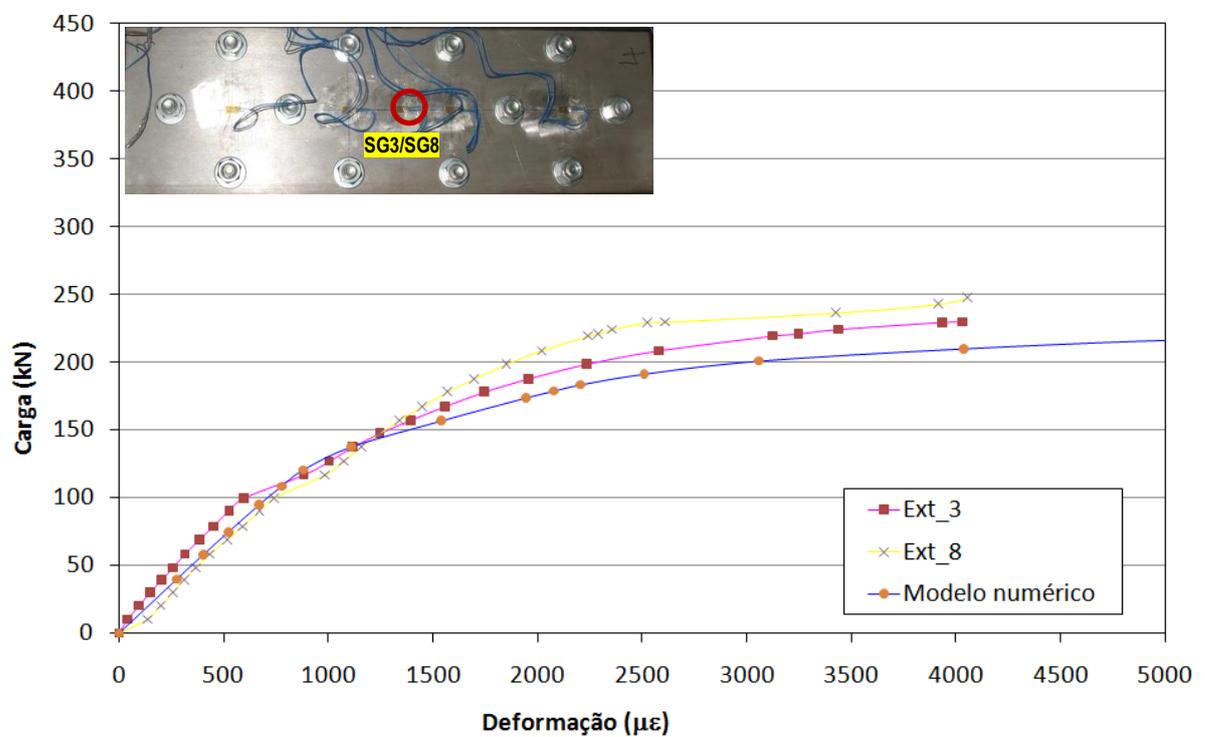


Figura 4.27 – Carga versus deformação – SG3 e SG8 - ENSAIO E9_INOX_S23

Observa-se nos gráficos carga *versus* deformação, que o modelo numérico proposto apresentou um comportamento muito próximo a nível de deformações, em comparação ao ensaio experimental. Para ambos os gráficos, o ensaio experimental apresentou maior carga, para um nível de deformação maior que aproximadamente $1000\mu\epsilon$.

A Figura 4.29 ilustra o nível de tensão da placa de aço inoxidável deformada correspondente aos pontos 1, 2 e 3, da curva carga *versus* deslocamento, apresentada na Figura 4.28. Observa-se que entre a borda da placa e o furo aparecem tensões elevadas. Também evidencia-se que a ruptura dar-se-á pela seção líquida da ligação, no entanto, não é claramente verificado qual o caminho da ruptura, ou seja, podendo ocorrer em dois ou três furos. No entanto, para o ensaio experimental a ruptura ocorreu em três furos, como dito anteriormente.

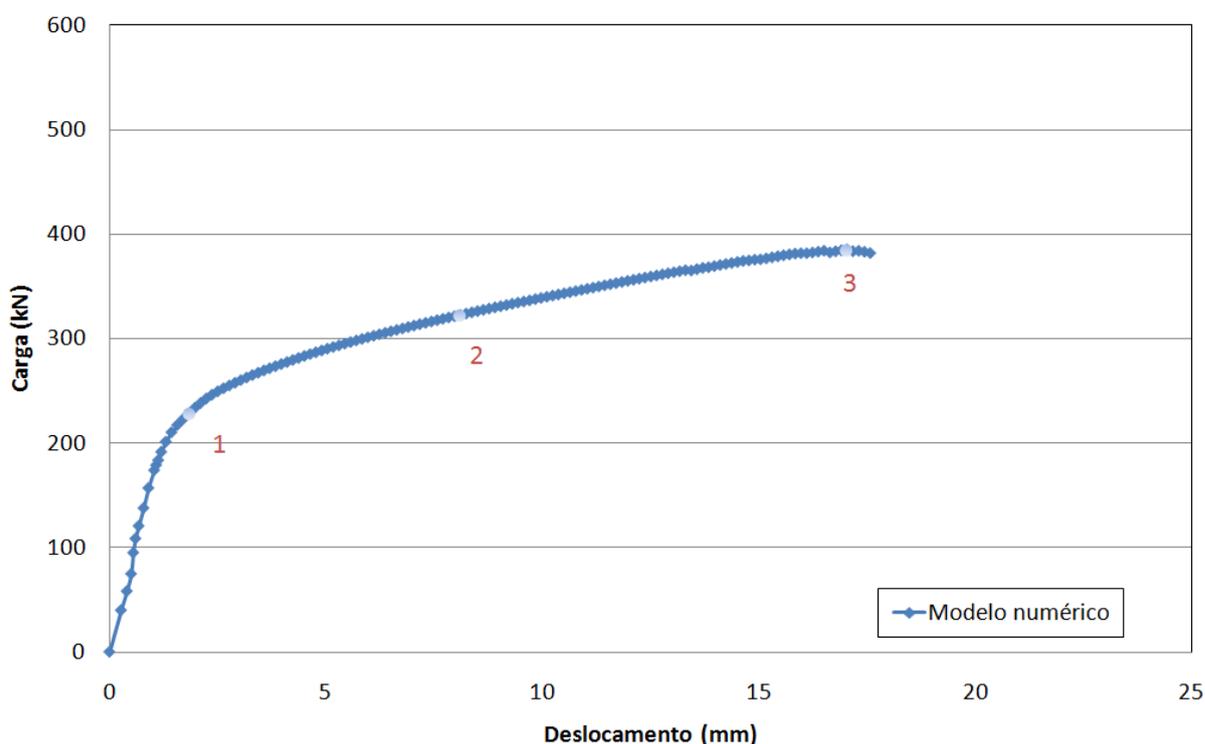
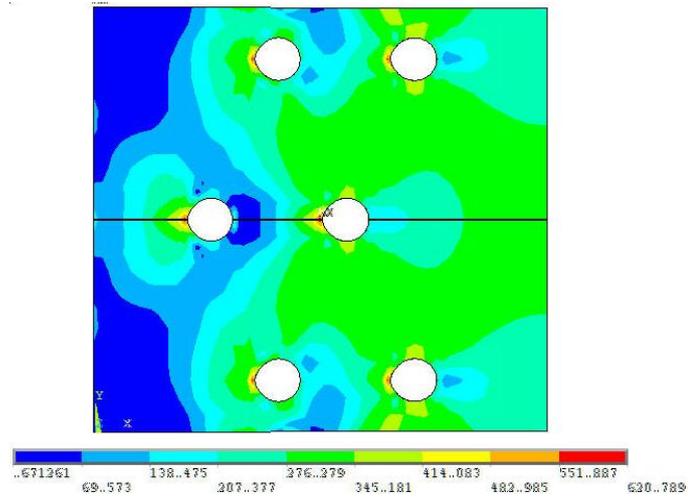
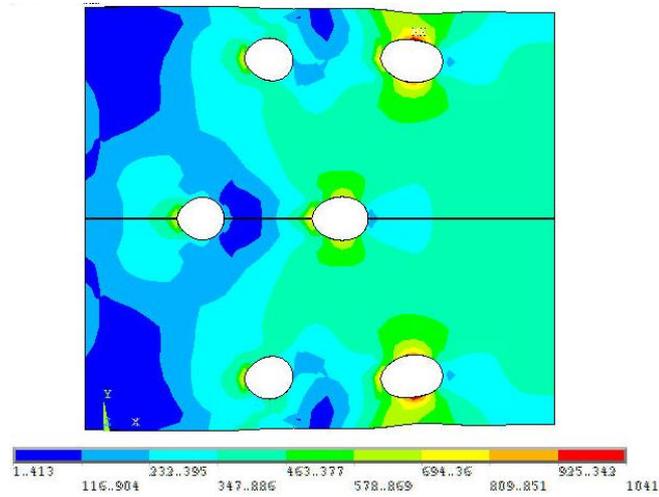


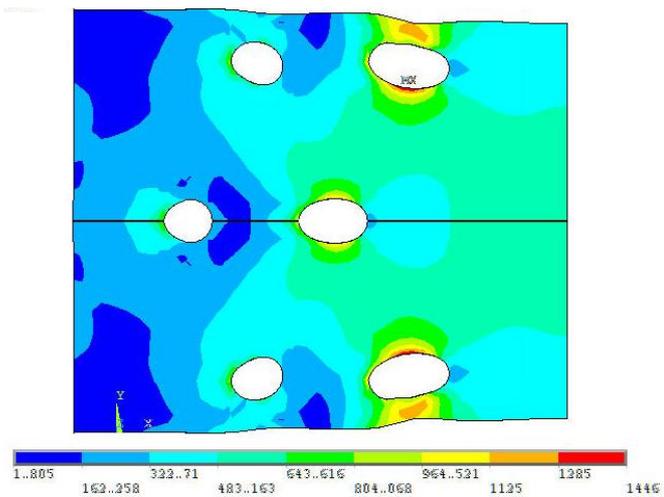
Figura 4.28 – Carga *versus* deslocamento – modelo numérico - ENSAIO E9_INOX_S23



a) Ponto 1



b) Ponto 2



c) Ponto 3

Figura 4.29 – Distribuição de tensões de Von Mises – E9_INOX_S23 (em MPa)

Novamente, a configuração deformada apresentada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos. Este fato está representado na Figura 4.30. Observa-se também a estrição da placa de aço inoxidável entre o furo e a extremidade da placa, local esse onde ocorre a ruptura, em concordância com o ensaio experimental.

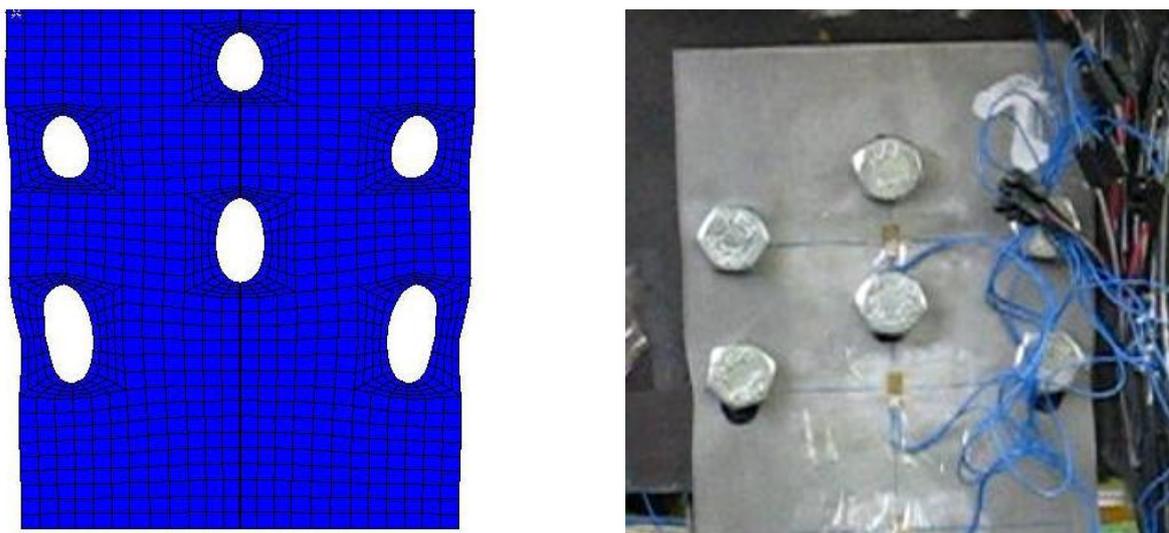


Figura 4.30 – Deformada – Numérico *versus* experimental

4.4 Sumário dos resultados experimentais e numéricos

Apresenta-se a seguir a Tabela 4.1 com o resumo dos resultados dos ensaios experimentais realizados por Santos (2008) e dos modelos numéricos propostos, mostrando os tipos de ruptura e suas respectivas as cargas últimas apresentadas, as cargas últimas da norma européia e as diferenças apresentadas. A nomenclatura utilizada foi a seguinte: 1F – ruptura na área líquida passando por um furo; 2F – ruptura na área líquida passando por dois furos e 3F – ruptura na área líquida passando por três furos.

Pode-se evidenciar na Tabela 4.1 que os modelos numéricos propostos conseguiram reproduzir o modo de ruína apresentado nos ensaios experimentais, no entanto, este fato não foi tão claro para os ensaios E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23, em que o modelo numérico apresentou uma grande concentração de tensão entre

dois e três furos. As diferenças apresentadas entre o modelo numérico e o Eurocode 3 são superiores às encontradas entre o modelo numérico e o ensaio experimental, visto assim um conservadorismo da norma.

Tabela 4.1 – Resumo dos resultados experimentais e numéricos

Ensaio	Tipo de ruptura (experimental)	Carga última – exp. (kN)	Tipo de ruptura (numérico)	Carga última – num. (kN)	Diferença (%) Num.–Exp.	Diferença (%) Num. – EC3.
E5_INOX_S50	2F	480,0	2F	389	19,0	28,8
E7_INOX_S30	2F	459,0	2F / 3F	389	15,2	28,8
E9_INOX_S23	3F	436,0	2F / 3F	385	11,6	27,5

Observa-se na Figura 4.31 que para as três configurações reproduzidas, o comportamento das curvas é idêntico, e a diferença entre as cargas máximas encontrada é menor do que 1%. Também vale ressaltar que a diferença entre as cargas máximas encontradas nos ensaios experimentais foi de aproximadamente 10%. Esta diferença pode ser considerada satisfatória, visto que no ensaio experimental, Santos (2008) utilizou duas células de carga para medir o carregamento em cada ensaio, tendo valores não tão próximos entre os dois equipamentos, e pela complexidade da ligação estudada. Então, o modelo numérico também conseguiu reproduzir tal fato em que as cargas máximas para os três modelos têm uma pequena diferença.

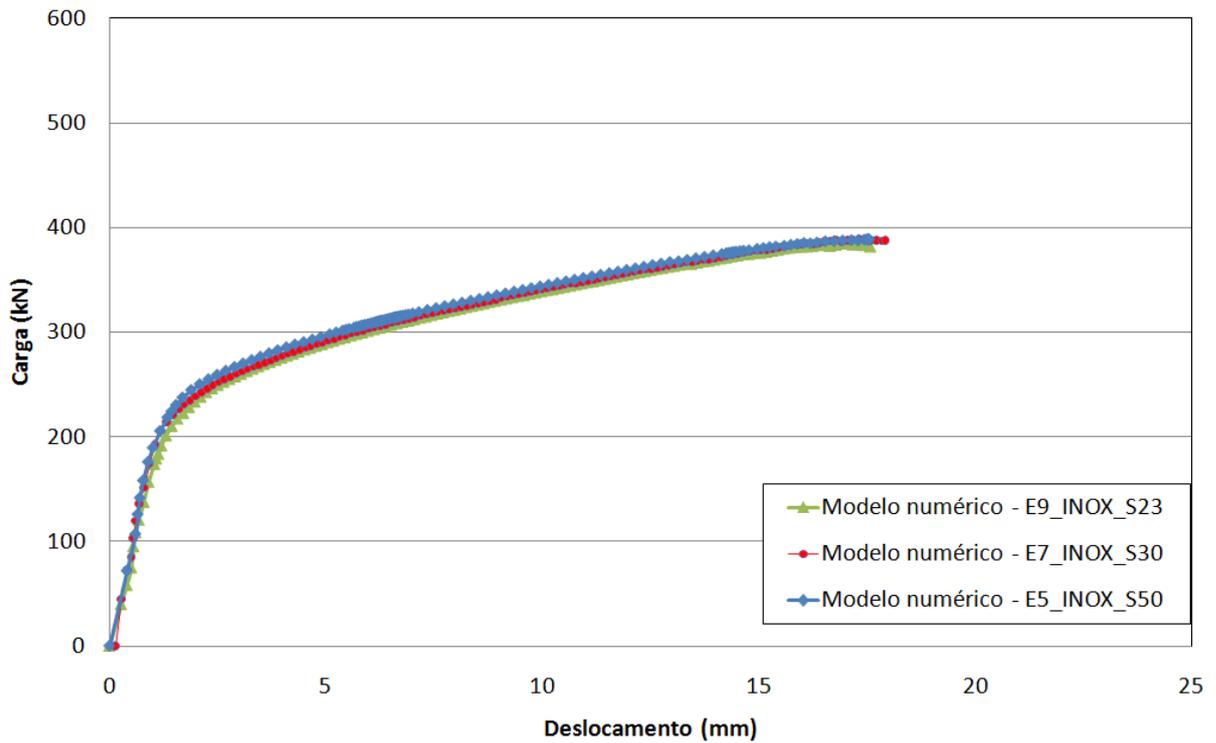


Figura 4.31 – Carga *versus* deslocamento – Modelos numéricos

A Figura 4.32 mostra a distribuição de deformações plásticas equivalentes para a máxima carga obtida em cada modelo numérico produzido.

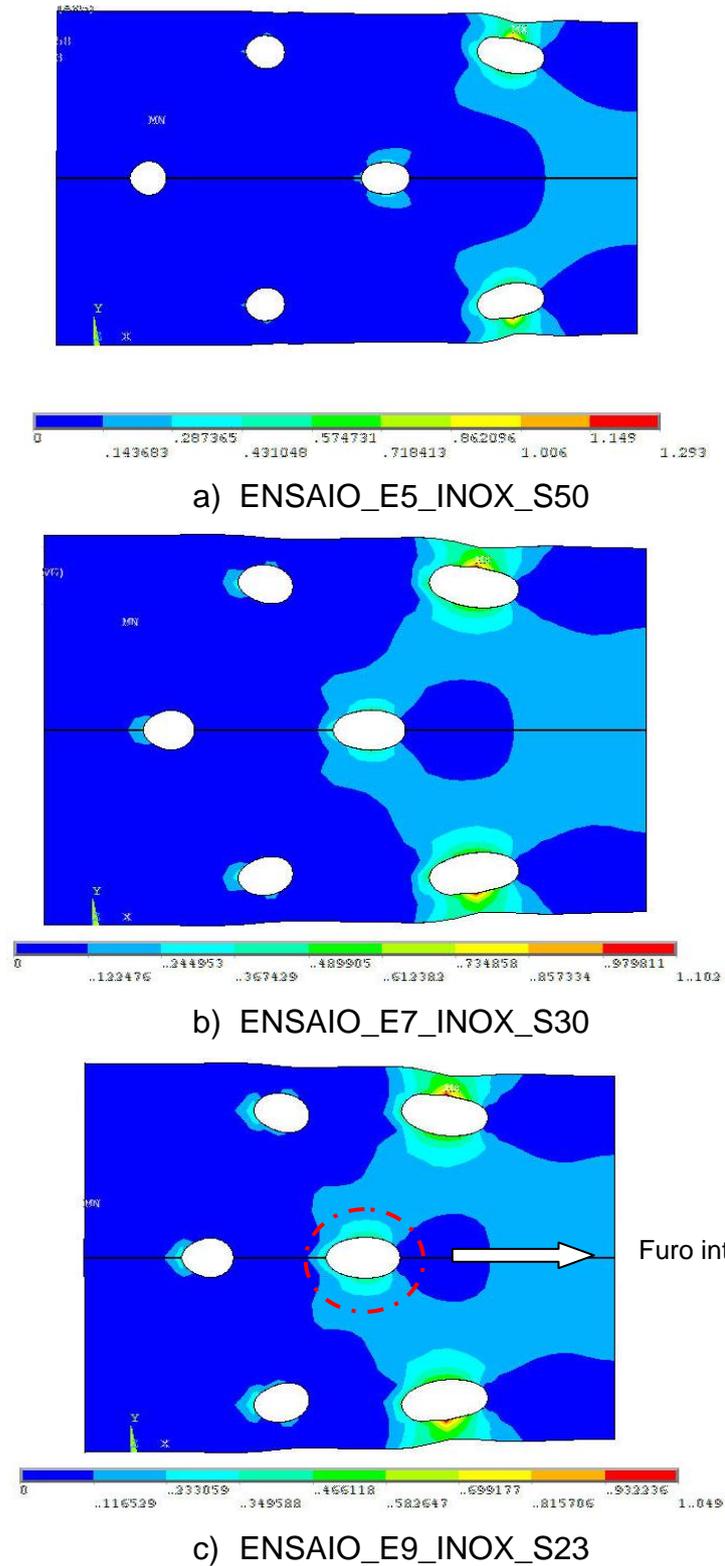


Figura 4.32 – Deformações plásticas equivalente – Todos modelos numéricos

Observa-se para o primeiro modelo, que existe uma maior tendência para a ruptura da seção líquida em dois furos. Já no segundo modelo, não existe uma exatidão onde poderá ocorrer a ruptura, em dois ou em três furos. Para o terceiro modelo, a ruptura dar-se-á em três furos, devido ao aumento de deformação entre os furos, fato este não evidenciado na distribuição de tensões (ver Figura 4.9). Também pode-se evidenciar que existe um aumento de deformações no furo intermediário, ver detalhe Figura 4.32(c), com a diminuição da distância entre furos. Desta forma, para o primeiro modelo, o nível de deformação é menor, pois o espaçamento é maior do que o terceiro modelo.

Neste capítulo foram apresentados os resultados numéricos obtidos, e comparando com os resultados experimentais realizados por Santos (2008). No capítulo seguinte, apresentar-se-á uma análise dos parâmetros utilizados para a execução dos ensaios experimentais, e fazer uma generalização para outras configurações de ligações aparafusadas submetida a tração em aço inoxidável.

5 ANÁLISE PARAMÉTRICA

5.1 Introdução

No capítulo anterior, os resultados obtidos nos modelos numéricos demonstram que a configuração deformada da chapa em aço inoxidável dos ensaios experimentais foi reproduzida em termos do modo de ruína considerando-se a ruptura da seção líquida da chapa, visualização da concentração de tensões nas bordas dos furos bem como as cargas máximas obtidas.

Neste capítulo apresenta-se uma análise paramétrica obtida através dos modelos numéricos buscando variar os seguintes parâmetros: espaçamento entre furos e a espessura da placa-base utilizada para aplicação da carga nos ensaios experimentais. Serão discutidos os comportamentos globais obtidos para cada modelo, buscando encontrar qual a real influência para cada parâmetro em questão.

A análise comparativa de curvas carga *versus* deformação proporciona uma visão global do comportamento da ligação aparafusada, com relação à sua rigidez. Da mesma forma, uma análise comparativa de curvas carga *versus* deslocamento permite, também, uma visão do comportamento da chapa com furação defasada, verificando a carga última de ruptura e o deslocamento total apresentado pela ligação.

5.2 Estudo da espessura da placa-base

Santos (2008) analisou em seu trabalho a contribuição da espessura da placa-base, e concluiu que para uma menor espessura a carga máxima encontrada foi maior, pois houve uma melhor distribuição da carga aplicada entre os parafusos. Porém, esse estudo aconteceu para uma ligação aparafusada em aço carbono.

Para o presente trabalho, foram produzidos modelos com as mesmas dimensões para chapa em aço inoxidável do ensaio E5_INOX_S50 apresentado anteriormente, no entanto, variar-se-á a espessura da placa-base nos valores de 8

mm, 12,5 mm e 20 mm, respectivamente. No capítulo anterior, para reproduzir o ensaio em questão, a espessura da placa-base foi de 15 mm. Os modelos possuem as mesmas características do modelo que reproduziu o ensaio E5_INOX_S50, tais como: condições de simetria, condições de contorno, material utilizado, coeficiente de atrito, entre outras. A Figura 5.1 mostra uma vista isométrica dos modelos analisados.

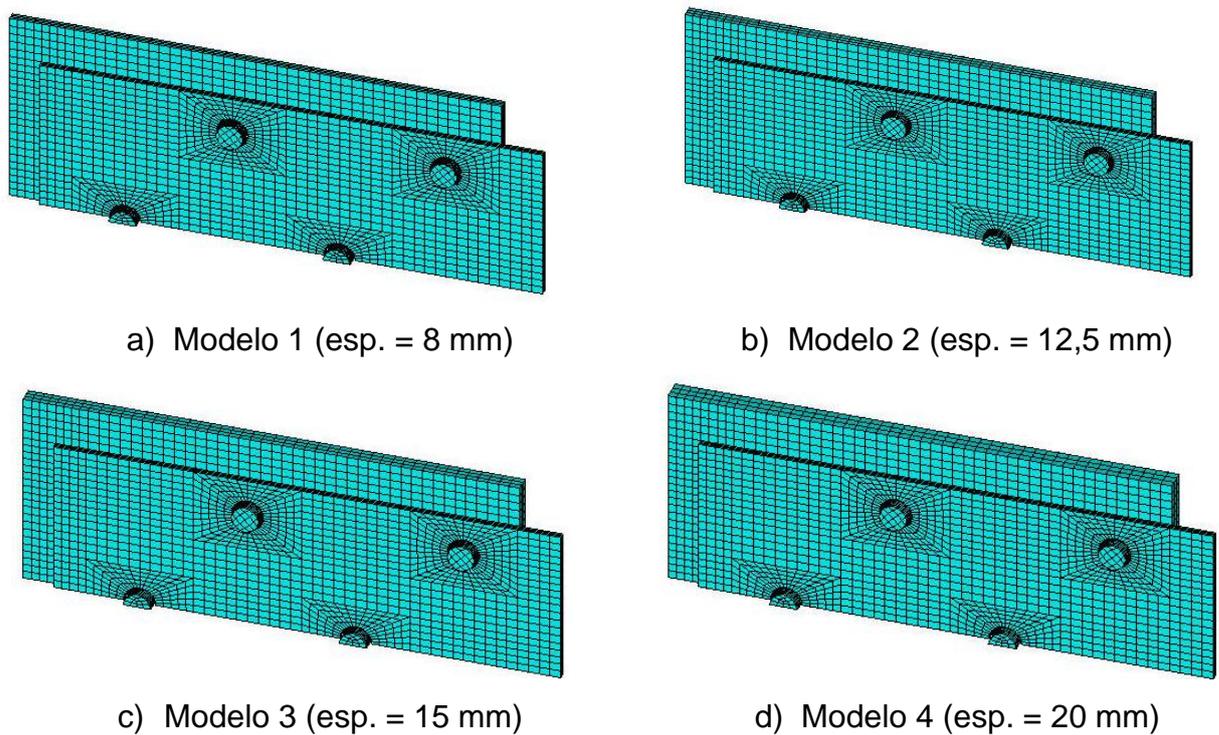


Figura 5.1 – Modelos propostos

5.2.1 Análise dos resultados

A Figura 5.2 ilustra as curvas carga *versus* deslocamento para os quatro modelos. Observa-se que os modelos têm comportamentos similares, no entanto, para o modelo com a menor espessura (8mm), verificou-se uma rigidez inicial menor, e também, não foi possível evidenciar a máxima carga.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados numéricos obtidos para cada modelo. Observa-se que, em termos de carga máxima, a diferença entre os quatro modelos é

menor que 1%, no entanto, o deslocamento encontrado para a correspondente carga aumenta com a diminuição da espessura.

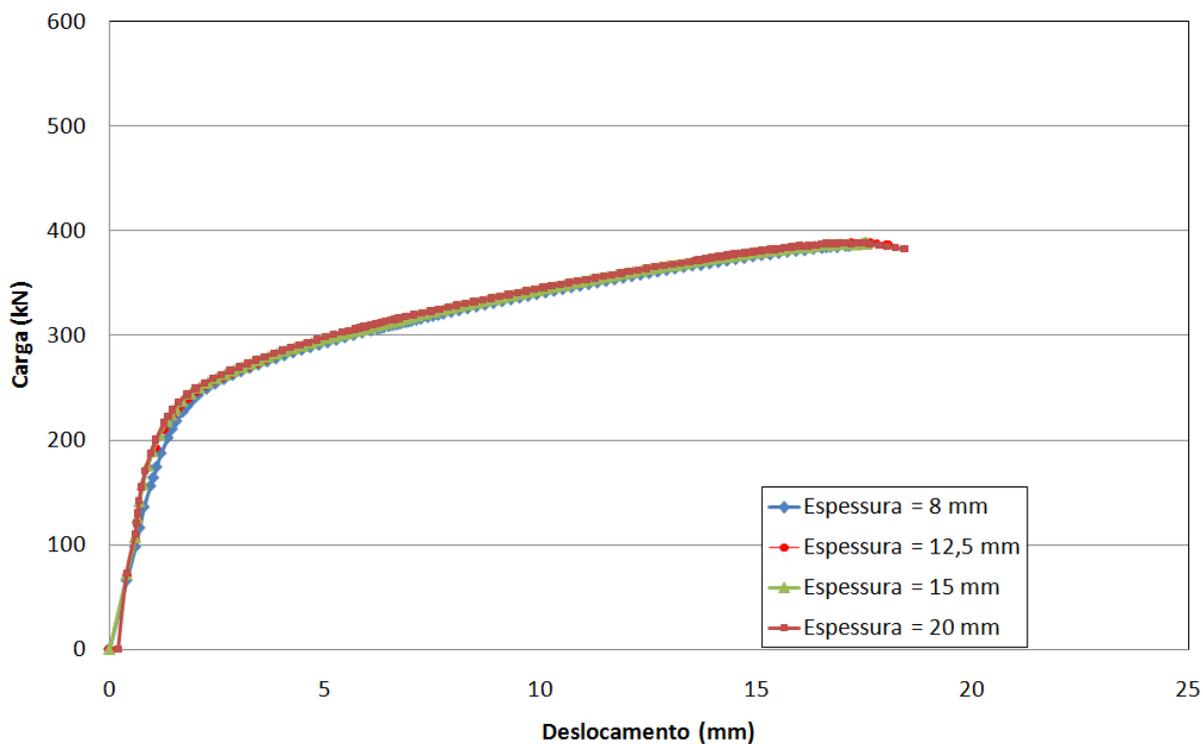


Figura 5.2 – Gráfico carga *versus* deslocamento

Tabela 5.1 – Resumo dos resultados numéricos

Modelo	Carga máxima – numérico (kN)	Deslocamento da carga máxima (mm)
Modelo 1	385,2	17,72
Modelo 2	388,6	17,62
Modelo 3	388,9	17,51
Modelo 4	388,8	17,47

Observa-se na Figura 5.3 que a distribuição de tensões de Von Mises para as quatro espessuras estudadas são similares. Pode-se também observar na Figura 5.4 que a distribuição de deformação plástica equivalente para os modelos é similar, visto que, não foi possível evidenciar, para o modelo com espessura de 8 mm, a carga máxima obtida.

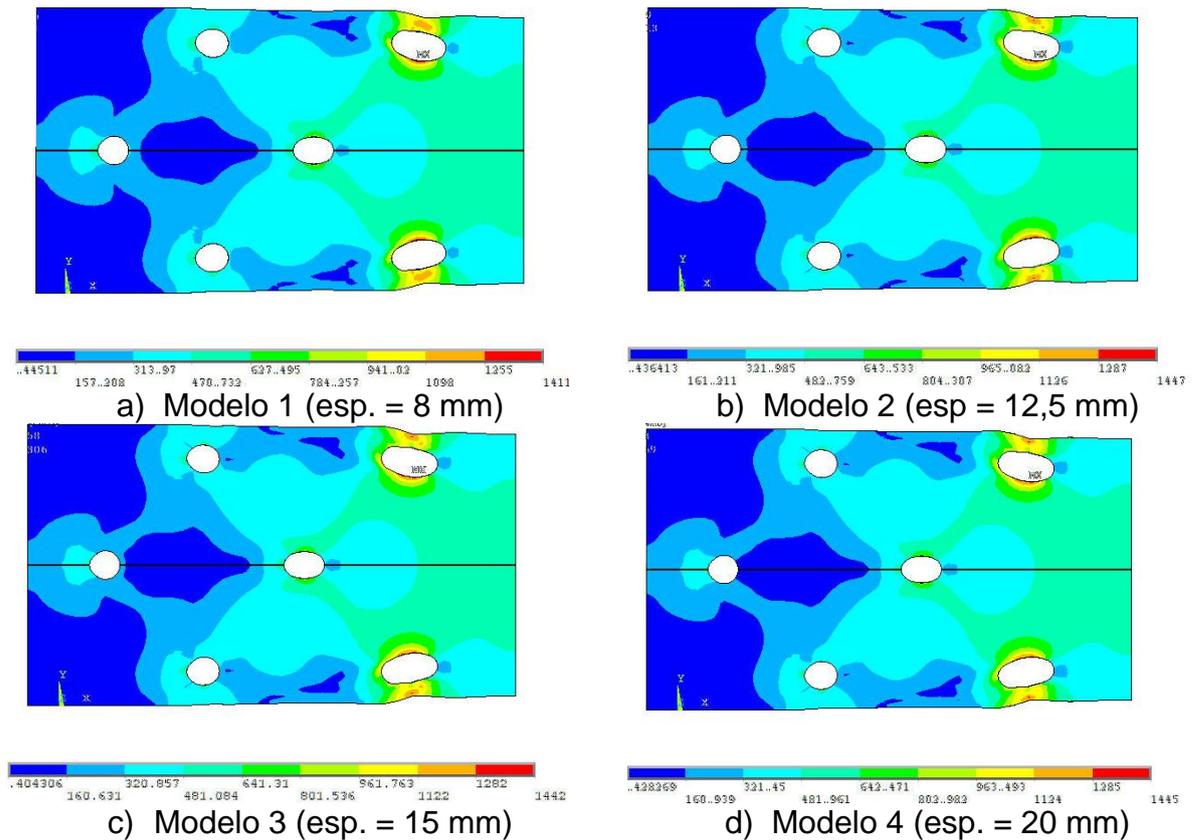


Figura 5.3 – Distribuição de tensões de Von Mises – todos modelos (em MPa)

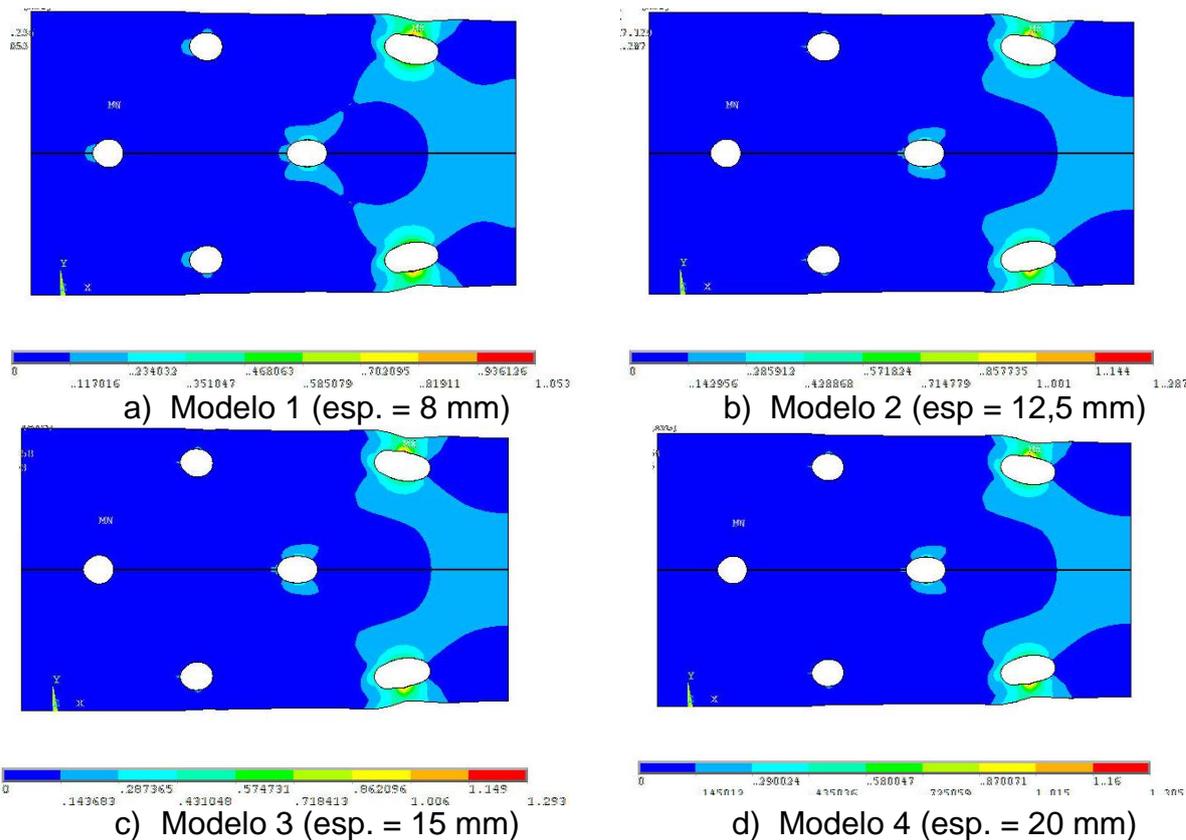


Figura 5.4 – Deformação plástica equivalente – Todos modelos

5.3 Estudo do espaçamento entre furos

Santos (2008) também analisou, em seu trabalho, a contribuição do espaçamento horizontal entre furos, de modo a permitir que os critérios de ruína coincidisse com os valores teóricos, visto que, na avaliação da seção líquida, as fórmulas teóricas para analisar o caminho de ruptura, seção com dois ou três furos, são bem próximas. Desta forma, qualquer irregularidade, que possa ocorrer na chapa ou no ensaio, poderá dar um falso resultado positivo.

Para o presente trabalho, serão produzidos mais dois modelos com dimensões apresentadas na Tabela 5.2 adicionais aos três desenvolvidos anteriormente (espaçamento entre furos igual a 23, 30 e 50 mm). A modelagem foi reproduzida com as mesmas características dos modelos do capítulo cinco, tais como: condições de simetria, condições de contorno, material utilizado, coeficiente de atrito, entre outras. A Figura 5.1 mostra uma vista isométrica dos modelos analisados.

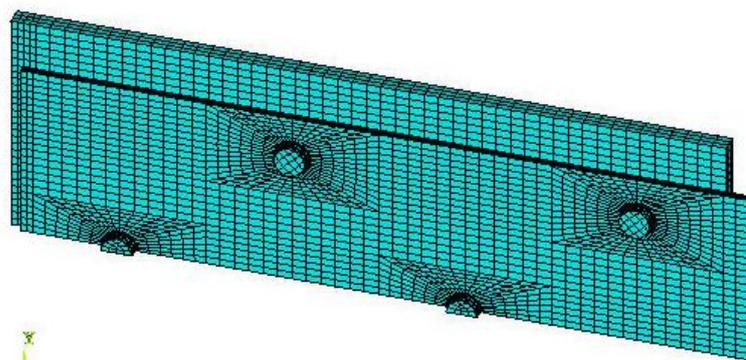
Tabela 5.2 – Configuração dos ensaios experimentais

Identificação	s (mm)	p (mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	d ₀ (mm)	Tipo de aço	Espessura da placa base (mm)	Quantidade de parafusos
Modelo 1	70	55	40	17,6	14,7	inoxidável	15	6
Modelo 2	18	55	40	17,6	14,7	inoxidável	15	6

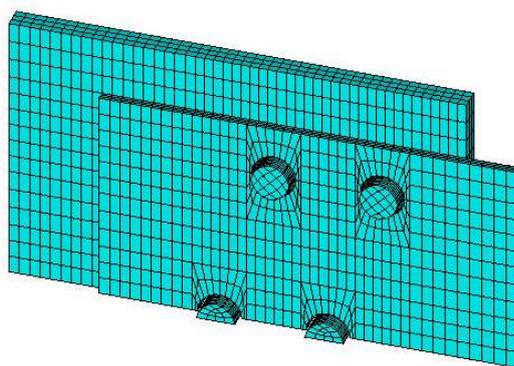
5.3.1 Análise dos resultados

A Figura 5.6 ilustra as curvas carga *versus* deslocamento para todos os modelos analisados no presente trabalho. Pode-se observar que para os cinco modelos o comportamento da curvas carga *versus* deslocamento é similar, não podendo diferenciar um modelo mais rígido ou mais flexível.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados numéricos obtidos para cada modelo. Observa-se que o modelo com espaçamento de 70 mm obteve a maior carga com o maior deslocamento, sendo que ocorre o inverso para o modelo com espaçamento de 23 mm. Esta diferença pode ser explicada pelas placas terem comprimentos diferentes, pois, possuindo o mesmo material os deslocamentos seriam proporcionais ao seu comprimento, e também pelo fato de ter grandes concentrações de tensão para espaçamentos menores. A diferença entre as cargas máximas obtidas para cada modelo é menor 4%.



a) Modelo 1



b) Modelo 2

Figura 5.5 – Modelos adicionais propostos

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados numéricos

Espaçamento (mm)	Carga máxima – numérico. (kN)	Deslocamento na carga máxima (mm)	Tamanho da placa (mm)
18	383,35	16,08	139
23	384,92	17,04	154
30	389,21	17,32	175
50	388,90	17,51	235
70	395,32	28,00	295

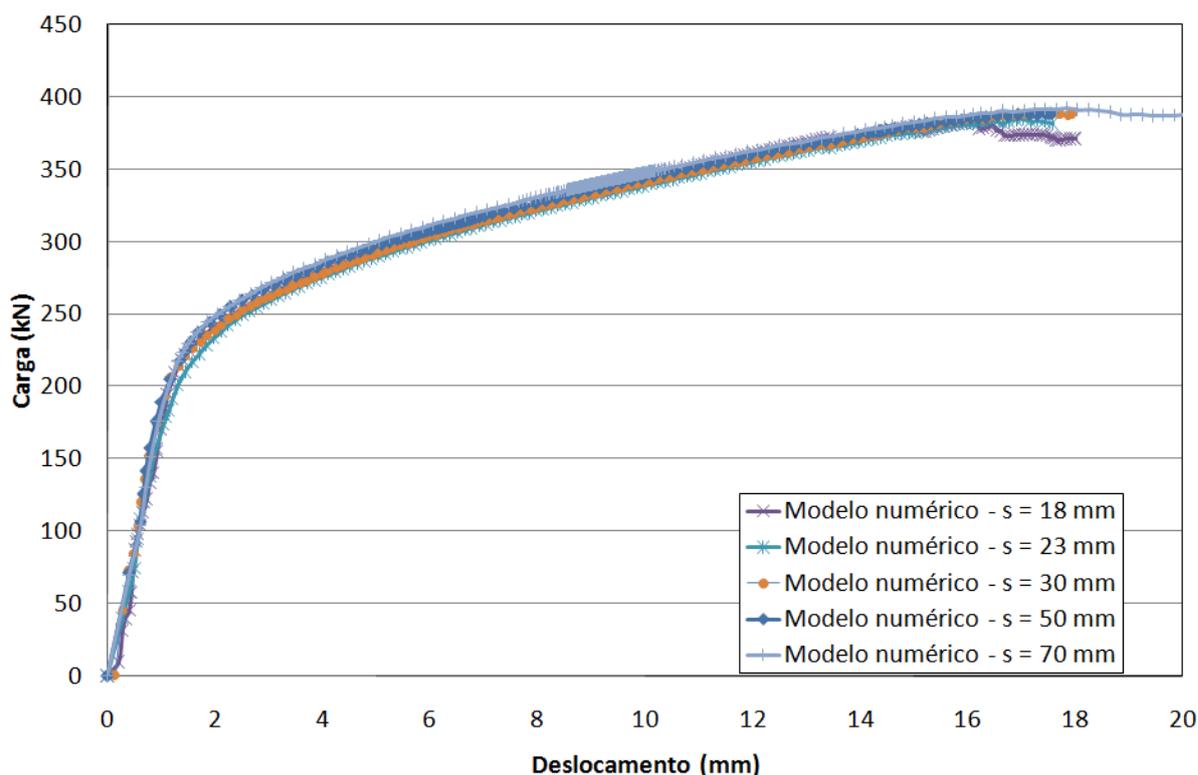


Figura 5.6 – Gráfico carga *versus* deslocamento

A Figura 5.7 mostra a distribuição de tensões de Von Mises para os modelos reproduzidos anteriormente e para os desenvolvidos na presente análise paramétrica. A partir da distribuição de tensões, há uma concentração de tensão para todos os modelos entre a borda da chapa e o furo, reproduzindo os resultados experimentais de Santos (2008). No entanto, como dito anteriormente, a carga máxima obtida nos modelos numéricos diverge em aproximadamente 4% a partir do aumento ou diminuição do espaçamento horizontal entre os furos.

A Figura 5.8 mostra a distribuição de deformações plásticas equivalentes para os modelos reproduzidos dos ensaios experimentais e para a análise paramétrica. A partir da distribuição em questão, pode-se observar que para os modelos com espaçamento entre furos de 70 mm e 50 mm, a ruptura da seção líquida ocorre em dois furos. Para os outros modelos (30 mm, 23 mm e 18 mm) a ruptura da seção líquida pode ocorrer em dois ou três furos.

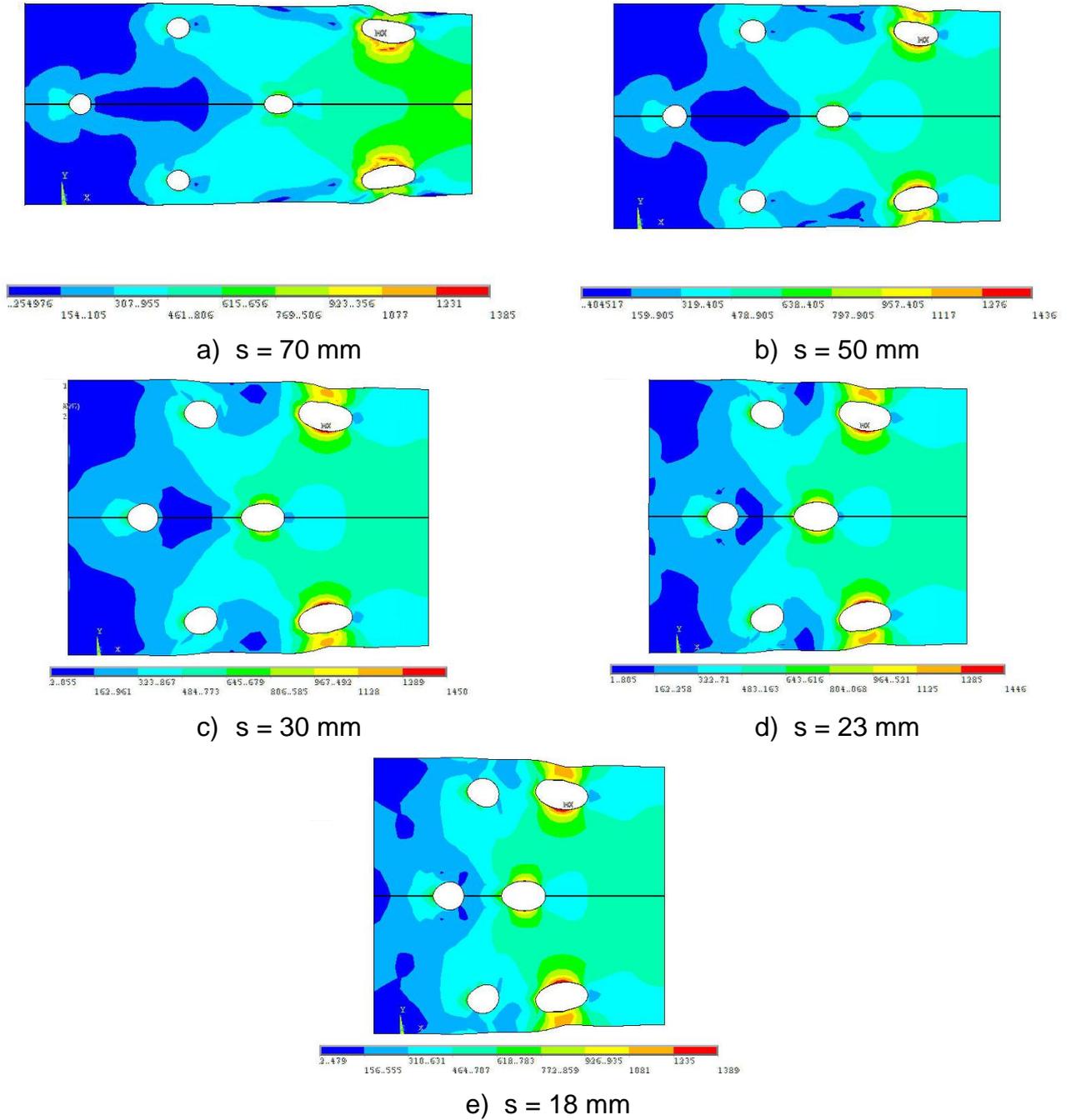


Figura 5.7 – Distribuição de tensões de Von Mises – Todos modelos (em MPa)

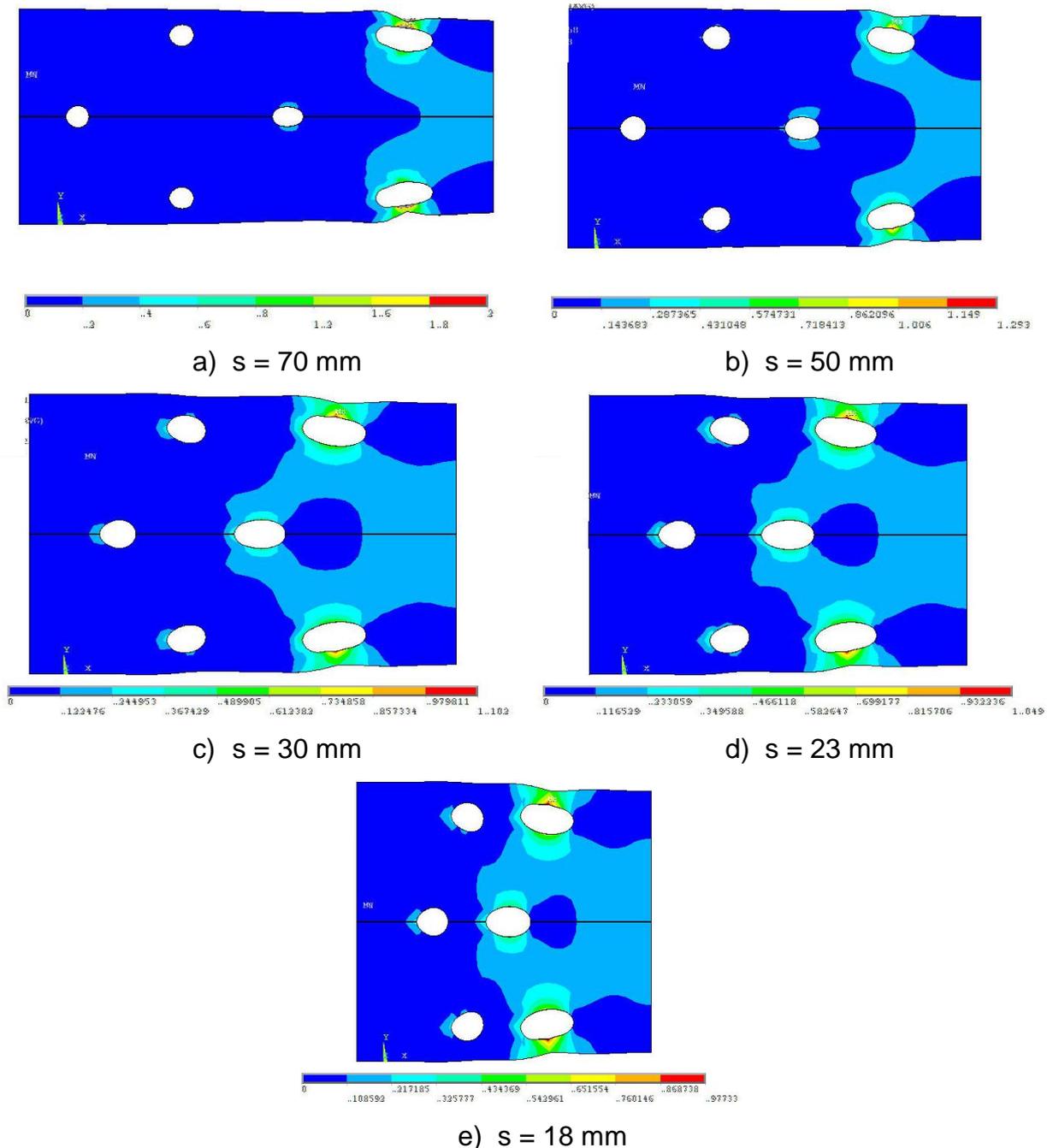


Figura 5.8 – Deformação plástica equivalente – Todos modelos

Analisando-se as curvas carga *versus* deformação mostradas na Figura 5.9 para um ponto situado na seção com dois furos no eixo de simetria horizontal, verifica-se que, quanto maior for a distância horizontal entre furos, parâmetro s , menor é a solicitação no parafuso da seção adjacente. Por exemplo, para um nível de carga aplicada de 250kN, tem-se a curva mais à esquerda com um nível de deformação inferior aos demais evidenciando a ruptura na seção com 3 furos. Por

outro lado, para este mesmo nível de carga aplicada, os modelos com espaçamentos de 50 mm e 70 mm, evidenciam que a ruína ocorre na seção com 2 furos.

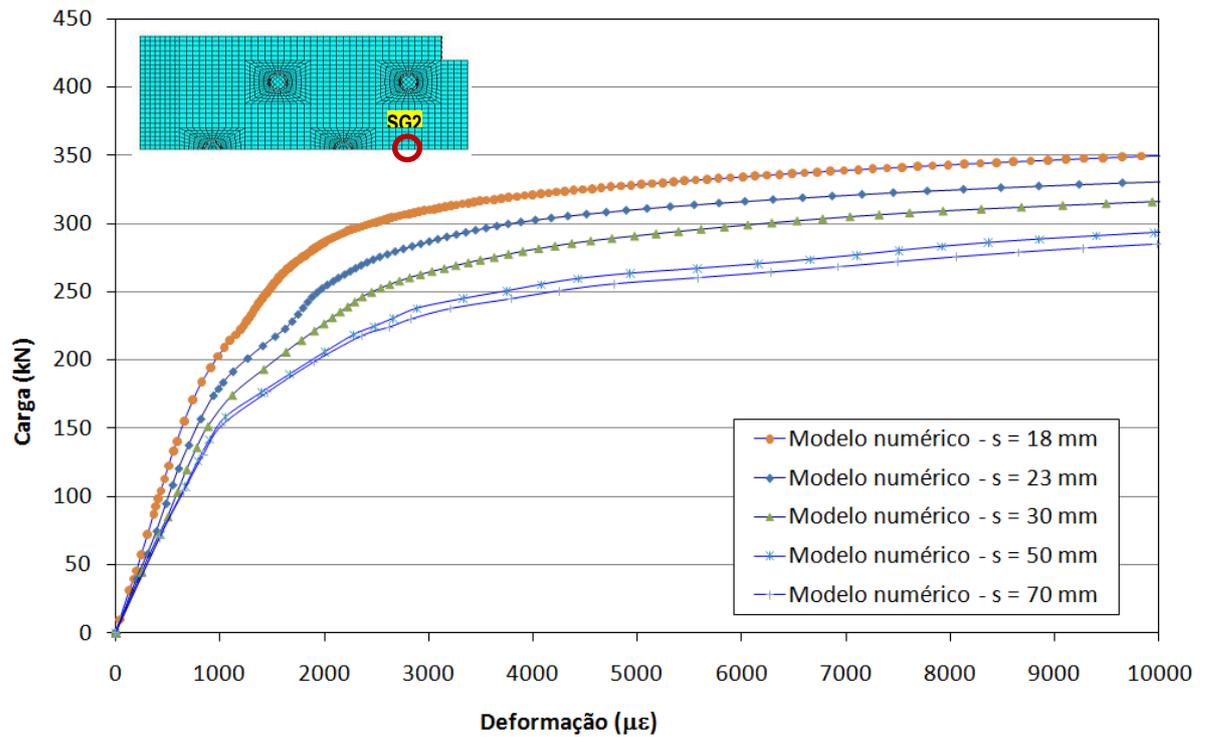


Figura 5.9 – Curva carga *versus* deformação – Todos os modelos

Neste capítulo foram apresentados os resultados numéricos obtidos para uma avaliação da influência da espessura da placa-base e o espaçamento entre placas. No capítulo seguinte, apresentar-se-ão as principais conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Introdução

É importante para o profissional conhecer por completo os materiais empregados na construção civil, até onde os cálculos estão sendo considerados conservadores ou arrojados. As ligações representam um papel importantíssimo em um projeto de estruturas de aço, pois a partir do momento em que o engenheiro conhece o comportamento estrutural como um todo e os fatores de segurança adequados, pode tornar o projeto estrutural mais econômico.

Na tentativa de se avaliar o real comportamento de chapas constituídas em aço inoxidável submetidas à tração, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos nesta área. Considerando-se ainda, chapas com furação defasada, somente o trabalho experimental desenvolvido por Santos (2008) pode ser citado.

Poucos ensaios em laboratório foram realizados de forma a possibilitar a calibração dos modelos existentes, dificultando a análise dos parâmetros que realmente influenciam no comportamento de chapas tracionadas em aço inoxidável.

Os resultados experimentais obtidos em Santos (2008) foram baseados no Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003) por se tratar de uma norma que considera o comportamento de elementos estruturais constituídos de aço inoxidável.

A proposta do presente trabalho objetivou analisar numericamente o comportamento estrutural de chapas tracionadas com furações alternadas, em aço inoxidável, comparando-se os resultados obtidos com os ensaios experimentais realizados por (SANTOS, 2008).

Foram desenvolvidos modelos para representar, com boa precisão possível, os elementos dos ensaios, a fim de se estabelecer uma modelagem em que os resultados fossem confiáveis e satisfatórios. Constatou-se que os modelos numéricos apresentaram um comportamento que, em termos qualitativos, pode ser considerado próximo ao comportamento esperado dos elementos estruturais avaliados, tendo em vista as comparações com os resultados experimentais. Os modelos conseguiram representar a grande capacidade que o aço inoxidável tem de se deformar.

6.2 Conclusões

A análise dos resultados numéricos obtidos nos diversos modelos propostos permitiu algumas conclusões importantes conforme descrito a seguir:

- Com as propostas de malhas estudadas no capítulo três, observa-se que os erros entre as configurações de malhas estudadas foram menores que 10% em sua grande maioria. Todos os modelos conseguiram reproduzir o modo de falha dos ensaios experimentais, inclusive o efeito “curling”;
- Pode-se verificar que uma malha de elementos finitos não pode ter elementos grandes, tendo em vista que estes apresentam maiores erros em todos os três casos estudados no capítulo três. No entanto, uma malha muito densa, com elementos pequenos, com dimensões de aproximadamente 1 mm (chapas com espessura de 3 mm), também apresentou em alguns casos, maiores erros, e para todos os casos um tempo de processamento da solução maior. Então, para ser eficiente, é necessário estabelecer uma configuração de malha que possa dar uma resposta mais próxima possível do real, em um tempo mais curto possível. Desta forma, consideram-se resultados satisfatórios para elementos com dimensões na ordem de 2 a 3 mm;
- Os valores de carga última para todos os modelos foram menores que os obtidos nos ensaios experimentais. Pode-se atribuir ao fato de que os modelos numéricos são uma forma idealizada de representar as ligações, sem imperfeições. Também, pelo fato de que a curva tensão *versus* deformação do aço inoxidável obtida, a partir de corpos-de-prova, teve seu comportamento modificado devido à direção da laminação. O corpo-de-prova foi extraído na direção perpendicular à aplicação da carga, mas a chapa foi ensaiada com uma carga que era paralela à laminação;
- Os modelos com menor valor do parâmetro s apresentaram uma menor deformação na seção com dois furos, em comparação com outro maior. No entanto, não houve uma diferença considerável de deformações nos modelos com espaçamento de 50 e 70 mm;
- A carga máxima obtida nos modelos reproduzidos, na avaliação da espessura da placa base, teve uma variação na ordem de 1%. No entanto, o modelo

com espessura da placa base no valor de 8 mm não foi possível evidenciar a carga máxima;

- Para diferentes valores do parâmetro s , não houve grandes mudanças no valor da carga máxima obtida no modelo numérico, fato este ocorrido devido à grande concentração de tensão entre a borda da placa e o furo, o que resultou em um ponto “fraco” da ligação.

6.3 Trabalhos futuros

Com poucos dados experimentais e numéricos, torna-se viável a realização de mais ensaios e modelos numéricos, de forma a avaliar a real influência dos parâmetros de uma placa com furação alternada submetida à tração. Para isso, é adequada a utilização de formatos variáveis. Também é válido reproduzir modelos numéricos considerando o aço inoxidável um material ortotrópico, visto que o mesmo possui curvas tensão *versus* deformação diferentes para cada sentido da laminação.

Outros tipos de configurações poderão ser utilizados, considerando-se, por exemplo, que a espessura é um fator importante e com a utilização de espessuras de placas diferentes das utilizadas neste trabalho, ter-se-ia uma gama maior de resultados para estudo mais aprofundado do comportamento individual das placas tracionadas com furação defasada em aço inoxidável.

Ensaio com cargas cíclicas considerando a capacidade de absorção de energia demonstrada pela placa constituída de aço inoxidável neste trabalho, também devem ser avaliados em comparação com as placas constituídas de aço carbono.

Finalmente, de posse de mais resultados, torna-se possível a realização de uma análise paramétrica mais ampla identificando o efeito de cada um dos parâmetros. A partir disso, deve-se propor uma nova formulação de dimensionamento a ser inserida em normas de dimensionamento de estruturas constituídas de aço inoxidável.

REFERÊNCIAS

Ansys, Inc. *Theory Reference* (version 11.0), 2007.

ACETI, R. et al. A limit analysis study to interpret the ultimate behavior of bolted joints. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, p. 1333-1351, 2004.

BADDOO, N.R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, p. 1199-1206, 2008.

BARTH, K.E.; ORBISON, J.G.; NUKALA, R. Behavior of steel tension members subjected to uniaxial loading. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 58, p. 1103-1120, 2002.

BOUCHAÏR, A.; AVERSENG, J.; ABIDELAH, A. Analysis of the behaviour of stainless steel bolted connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, p. 1264-1274, 2008.

BURGAN, B.A.; BADDOO, N.R.; GILSENAN, K.A. Structural design of stainless steel members - comparison between Eurocode 3, Part 1.4 and test results. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 54, p. 51-73, 2000.

BURSI, O.S.; JASPART, J.P. Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted end-plate Steel Connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 44, p. 225-262, 1997.

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

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

COCHRANE, R. *article*, Engineering News, 1922.

DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. 2^a ed. Guanabara Dois: Rio de Janeiro, 1981.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Bruxelas, 2005. 133 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION . *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.4: General rules – Stainless steel*. Bruxelas, 2003. 42 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints*. Bruxelas, 2005. 91 p.

GARDNER, L.; BADDOO, N.R. Fire testing and design of stainless steel structures. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, p. 532-43, 2006.

GARDNER, L.; NETHERCOT, D.A. Experiments on stainless steel hollow sections — Part 1: Material and cross-sectional behaviour. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, p. 1291-318, 2004.

GARDNER, L.; NETHERCOT, D.A. Structural stainless steel design: A new approach. **The Structural Engineer**, p. 21-8, 2004.

GEDGE, G. Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, p. 1194-1198, 2008.

KEELER, S. P. The state of the art. Understanding sheet metal formability. **Machinery**, v.74, n. 6, p. 88-95, fev. 1968.

KIM, T.S.; KUWAMURA, H. Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear. **Thin-Walled Structures**. v. 45, p. 407-421, 2007.

KOUHI, J. et al. Current R&D work on the use of stainless steel in construction in Finland. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 54, p. 31-50, 2000.

RAMBERG, W.; OSGOOD, W.R. Description of stress-strain curves by three parameters. *Technical Note No. 902*, **National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC**, 1943.

SCHAEFFER, L. *Conformação mecânica*. UFRS: Porto Alegre, 1999.

SOUZA, S. A. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos*. Edgard Blucher, 1974.

SANTOS, J.J. *Comportamento Estrutural de Elementos em Aço Inoxidável*. Rio de Janeiro, 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, UERJ, 2008.

VAN DEN BERG, G.J. The effect of the non-linear stress–strain behaviour of stainless steels on member capacity. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 54, p. 135-60, 2000.