



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Gilmar de Castro Batista

**Estudo experimental e numérico de ligações aparafusadas em
aço inoxidável submetidas à tração**

Rio de Janeiro
2018

Gilmar de Castro Batista

**Estudo experimental e numérico de ligações aparafusadas em aço inoxidável
submetidas à tração**

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

Orientadores: Prof. Dr. André Tenchini da Silva
Prof^a. Dr^a. Monique Cordeiro Rodrigues
Prof. Dr. João de Jesus dos Santos

Rio de Janeiro

2018

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

B326 Batista, Gilmar de Castro.
Estudo experimental e numérico de ligações aparafusadas em
aço inoxidável submetidas à tração / Gilmar de Castro Batista. –
2018.
114f.

Orientadores: André Tenchini da Silva, Monique Cordeiro
Rodrigues e João de Jesus dos Santos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Aço inoxidável - Teses. 3.
Análise numérica - Teses. 4. Aço - Estruturas - Teses. 5. Análise
estrutural (Engenharia) - Teses. I. Silva, André Tenchini da. II.
Rodrigues, Monique Cordeiro. III. Santos, João de Jesus dos. IV.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de
Engenharia. V. Título.

CDU 624.04

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

Assinatura

Data

Gilmar de Castro Batista

**Estudo experimental e numérico de ligações aparafusadas em aço inoxidável
submetidas à tração**

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: 08 de fevereiro de 2018.

Banca Examinadora:

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

Prof^a. Dr^a. Monique Cordeiro Rodrigues (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. João de Jesus dos Santos (Orientador)
Departamento de Engenharia Civil - CEFET / RJ

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

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues de Araújo
Departamento de Engenharia Civil - CEFET / RJ

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

Primeiramente a Deus, por permitir mais essa vitória, A minha Querida Tia Zenil Batista Cruz, onde quer que ela esteja sempre estará comigo, a minha família, em especial a rainha da minha vida, minha Vó Izabel Edvirges de Jesus, que desde os primeiros dias da minha vida estão ao meu lado em tudo que eu faço e aos meus amigos de UERJ e os da minha amada cidade de Queimados, por compartilhar todos os momentos, inclusive os ruins

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. André TENCHINI da Silva, Prof. João Santos e a Profa. Monique Cordeiro Rodrigues pela excelente orientação, sempre apontando o melhor caminho a ser seguido, por toda ajuda e força dada no tempo necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante a época da graduação e agora no mestrado. Principalmente ao Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima e ao Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco pelo incentivo dado.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo apoio sempre quando necessário, em especial a Keila Letícia Baptista de Souza, Karina Mota Rocha, Wando Rodrigues Fortes, Jonathan Gonzalez Rodriguez, Ali Asghar Golbini Mofrad, Helena Maria Alves Moreira e Rodolfo Maranguape.

A UERJ, pois sem estas pessoas eu não conseguiria ter realizado esta conquista.

A minha família, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis.

Aos técnicos e funcionários do laboratório, pela ajuda dada nas execuções dos ensaios.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram de alguma forma para a execução deste trabalho.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro.

*“Quem caminha sozinho,
pode até chegar mais rápido,
mas aquele que vai acompanhado,
com certeza vai mais longe.”*

Clarice Lispector

RESUMO

BATISTA, Gilmar de Castro. *Estudo experimental e numérico de ligações aparafusadas em aço inoxidável submetidas à tração*. 2018. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Atualmente o dimensionamento de estruturas constituídas em aço inoxidável considera analogias baseadas no aço carbono, porém este material apresenta quatro curvas tensão *versus* deformação muito distintas, modificando assim, o comportamento global da estrutura. Em adição, as ligações desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho estrutural de ligações aparafusadas com modos distintos de falha estrutural. Essas ligações foram desenvolvidas com chapas finas em aço inoxidável do tipo austenítico e ferrítico, sendo submetidas a esforços de tração por meio de ensaios experimentais e simulações numéricas. O modelo numérico foi desenvolvido utilizando o programa Abaqus, tendo como base os ensaios experimentais desenvolvidos neste trabalho. Posteriormente, foi realizado um estudo paramétrico com variações da geometria da chapa. Adicionalmente, os resultados obtidos foram comparados com a norma europeia vigente e estudos propostos na literatura. Entre os resultados encontrados, pode-se observar uma boa concordância entre os resultados do modelo numérico com os experimentais. Em termos gerais, o aço inoxidável ferrítico apresentou cargas para o modo de falha investigado mais próximas da norma de dimensionamento em comparação com o aço austenítico. Além disso, é importante mencionar que o efeito *curling* é mais evidente para os casos estudados em aço austenítico estando este relacionado a capacidade de deformação dos materiais analisados. O estudo paramétrico mostrou que as ligações onde o modo de colapso está relacionado ao esmagamento ou rasgamento da chapa apresenta um patamar constante de carga quando o efeito *curling* é observado. Nas ligações onde a falha é caracterizada pela ruptura da seção líquida, o parâmetro k_r empregado na norma mostrou ser muito rigoroso para a definição da capacidade da ligação.

Palavras-chave: Aço Inoxidável, Peças tracionadas, Ligações Aparafusadas, Análise experimental, Análises Numéricas.

ABSTRACT

Batista, Gilmar de Castro. *Experimental and numerical study of stainless steel bolted connections subjected to tension*. 2018. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Currently, the design of structures performed using stainless steel considers analogies based on carbon steel grade, but this material presents four very distinct stress versus strain curves, thus modifying the overall structural behavior. In addition, the connections play a key role in the overall behavior of structures. Therefore, the present work aims to evaluate the structural performance of bolted connections with distinct failure modes. These connections were developed in both austenitic and ferritic stainless steel thin-plates under tensile loading by means of experimental tests and numerical simulations. The numerical model was developed using the program Abaqus, based on the experimental tests developed in this work. Subsequently, a parametric study was carried out with variations of the plate geometry. In addition, the results obtained were compared to current European code and proposed studies in the literature. Among the results, a good agreement can be observed between the numerical and experimental results. In general, terms, ferritic stainless steel experimented both load and failure mode closer to the codes compared to austenitic stainless steel. In addition, it is important to mention that the curling effect is more evident for the cases studied in austenitic steel being related to the deformation capacity of the analyzed materials. The parametric study showed that the bolted connections in which the collapse mode is related to crushing or tearing of the plate showing a constant loading plateau when the curling effect is observed. In the connections where the failure is characterized by the rupture of the effective section, the parameter k_r used in the code showed to be very strict for the definition of the connection capacity.

Keywords: Stainless Steel, Plates in Tension, Bolted Connection, Experimental Tests, Numerical Analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Píer Progresso, México [2]	23
Figura 2 – Estrutura microscópica do aço inoxidável [3]	24
Figura 3 – Ligação aparafusada em estrutura de aço inoxidável [5].	28
Figura 4 – Ponte Hélix, para pedestres, localizada em Cingapura [10].	28
Figura 5 – Ruptura na área líquida [5].	29
Figura 6 – Rasgamento da chapa [5].	29
Figura 7 – Esmagamento da chapa [5].	30
Figura 8 – Corte do parafuso [5].	30
Figura 9 – Escoamento da seção bruta [5].	30
Figura 10 – Ruptura em bloco [5].	31
Figura 11 – Efeito <i>curling</i> [5].	31
Figura 12 – Definição de parâmetros básicos.	32
Figura 13 – Parâmetros presentes na ligação estudada.	32
Figura 14 – Efeito na seção líquida [12].	37
Figura 15 – Geometria do corpo de prova (valores em milímetros).	44
Figura 16 – Máquina para confecção dos corpos de prova.	44
Figura 17 – Resultado final da confecção dos corpos de prova.	45
Figura 18 – Organograma para nomenclatura dos corpos de prova.	45
Figura 19 – Máquina usada no ensaio do corpo de prova (Instron 3382).	46
Figura 20 – Etapas de ensaio dos corpos de prova CP-AUST.	47
Figura 21 – Etapas de ensaio dos corpos de prova CP-FERRIT.	48
Figura 22 – Organograma para nomenclatura dos modelos ensaiados.	50
Figura 23 – Padrão base para os modelos avaliados.	51
Figura 24 – Detalhe do LVDT.	54
Figura 25 – Sistema de aplicação de carga.	55
Figura 26 – Modulo amplificador universal QuantumX MX1601B.	56
Figura 27 – Dados geométrico do parafuso, arruela e porca (em milímetros).	57
Figura 28 – Conjunto de parafuso, porca e arruela, depois do ensaio.	57
Figura 29 – Máquina utilizada para fazer os furos.	58
Figura 30 – Dados geométrico das chapas base, em milímetros.	59

Figura 31 – Conjunto da ligação aparafusada ensaiada com um furo.	60
Figura 32 – Esquema das placas para modelo de um furo, em milímetros.....	61
Figura 33 – Modelos experimentais 1F-A-L50.....	63
Figura 34 – Modelos experimentais 1F-A-L90.....	64
Figura 35 – Modelos experimentais 1F-F-L50.....	66
Figura 36 – Modelos experimentais 1F-F-L90.....	67
Figura 37 – Esquema das placas para modelo de dois furos, em milímetros.	68
Figura 38 – Modelos experimentais 2F-A-L50.....	70
Figura 39 – Modelos experimentais 2F-A-L90.....	71
Figura 40 – Modelos experimentais 2F-F-L50.....	73
Figura 41 – Modelos experimentais 2F-F-L90.....	74
Figura 42 – Tipos de elementos.	79
Figura 43 – Malha dos modelos analisados.	80
Figura 44 – Malha das demais peças envolvidas.....	80
Figura 45 – Zonas de aplicação das condições de contorno.....	82
Figura 46 – Zonas de aplicação do carregamento - Parte 1.	82
Figura 47 – Zonas de aplicação do carregamento - Parte 2.	82
Figura 48 – Estado final da malha dos modelos com um furo.....	83
Figura 49 – Estado final da malha dos modelos com dois furos.	83
Figura 50 – Geometria do modelo 1F-A-L50-F18, em milímetros.	84
Figura 51 – Modelo 1F-A-L50-E18.	85
Figura 52 – Geometria do modelo 1F-F-L50-F18, em milímetros.	86
Figura 53 – Modelo 1F-F-L50-E18.	87
Figura 54 – Geometria do modelo 2F-A-L50-F60, em milímetros.	88
Figura 55 – Modelo 2F-A-L50-E60.	90
Figura 56 – Geometria do modelo 2F-F-L50-F60, em milímetros.	91
Figura 57 – Modelo 2F-A-L50-E60.	92
Figura 58 – Estudo de casos com um furo, austenítico e largura de 50 mm.....	96
Figura 59 – Estudo de casos com um furo, austenítico e largura de 90 mm.....	96
Figura 60 – Estudo de casos com um furo, ferrítico e largura de 50 mm.	97
Figura 61 – Estudo de casos com um furo, ferrítico e largura de 90 mm.	97
Figura 62 – Estudo de casos com dois furos, austenítico e largura de 26 mm.	99
Figura 63 – Estudo de casos com dois furos, austenítico e largura de 35 mm.	99
Figura 64 – Estudo de casos com dois furos, austenítico e largura de 60 mm.	99

Figura 65 – Estudo de casos com dois furos, austenítico e largura de 70 mm.	99
Figura 66 – Estudo de casos com dois furos, austenítico e largura de 80 mm.	99
Figura 67 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 26 mm.....	101
Figura 68 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 35 mm.....	101
Figura 69 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 60 mm.....	101
Figura 70 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 70 mm.....	101
Figura 71 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 80 mm.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modos de falha possíveis.	31
Tabela 2 – Resumo das equações de projetos propostas neste em Salih <i>et al.</i> [7]. .	41
Tabela 3 – Dados dos três ensaios do CP-AUST.	46
Tabela 4 – Características físicas obtidas nos três ensaios dos CP-AUST.	48
Tabela 5 – Dados dos três ensaios do CP-FERRIT.	49
Tabela 6 – Características físicas obtidas nos 3 ensaios dos CP-FERRIT.	49
Tabela 7 – Todos os modelos e casos que serão estudados, com um furo.	52
Tabela 8 – Todos os modelos e casos que serão estudados, com dois furos.	52
Tabela 9 – Características dos Extensômetros EXT [22].	53
Tabela 10 – Características dos Extensômetros ROS [22].	54
Tabela 11 – Características das chapas base.	59
Tabela 12 – Dados geométricos dos modelos de um furo.	62
Tabela 13 – Resistência dos modelos com um furo, austenítico.	65
Tabela 14 – Resistência dos modelos com um furo, ferrítico.	68
Tabela 15 – Dados geométricos dos modelos de dois furos.	69
Tabela 16 – Resistência dos modelos com dois furos, austenítico.	72
Tabela 17 – Resistência dos modelos com dois furos, ferrítico.	74
Tabela 18 – Propriedades para as premissas do programa.	77
Tabela 19 – Comparação entre análises do modelo 1F-A-L50-E18.	85
Tabela 20 – Comparação entre análises do modelo 1F-F-L50-E18.	87
Tabela 21 – Comparação entre análises do modelo 2F-A-L50-E60.	89
Tabela 22 – Comparação entre análises do modelo 2F-F-L50-E60.	92
Tabela 23 – Comparativos das análises dos modelos.	94
Tabela 24 – Dados geométricos, nomenclatura e alguns outros dados dos modelos em estudos de casos, para um furo.	95
Tabela 25 – Dados geométricos, nomenclatura e alguns outros dados dos modelos em estudos de casos, austenítico.	98
Tabela 26 – Dados geométricos, nomenclatura e alguns outros dados dos modelos em estudos de casos, ferrítico.	100

Tabela 27 – Dados do estudo numérico dos caso com um furo e razão e_1/d_0 por larguras.	102
Tabela 28 – Dados do estudo numérico dos caso com dois furos e razão e_2/d_0 com valores de $k_{r,num}$	104
Tabela 29 – Comparação dos valores, austenítico com um furo.....	106
Tabela 30 – Comparação dos valores, ferrítico com um furo.	106
Tabela 31 – Comparação dos valores, austenítico com dois furos.	107
Tabela 32 – Comparação dos valores, ferrítico com dois furos.....	108

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação de custos entre aço carbono e aço inoxidável [1].....	22
Gráfico 2 – Curva tensão <i>versus</i> deformação.	23
Gráfico 3 – Curva tensão <i>versus</i> deformação características dos CP-AUST.....	47
Gráfico 4 – Curva tensão <i>versus</i> deformação características dos CP-FERRIT.	49
Gráfico 5 – Carga <i>versus</i> deslocamento, modelos com 1F-A-L50.	62
Gráfico 6 – Carga <i>versus</i> deslocamento, modelos com 1F-A-L90.	64
Gráfico 7 – Carga <i>versus</i> deslocamento, modelos com 1F-F-L50.	65
Gráfico 8 – Carga <i>versus</i> deslocamento, modelos com 1F-F-L90.	67
Gráfico 9 – Carga <i>versus</i> deslocamento, modelos com 2F-A-L50.	69
Gráfico 10 – Carga <i>versus</i> deslocamento, modelos com 2F-A-L90.	71
Gráfico 11 – Carga <i>versus</i> deslocamento, modelos com 2F-F-L50.	72
Gráfico 12 – Carga <i>versus</i> deslocamento, modelos com 2F-F-L90.	73
Gráfico 13 – Trecho inicial, tensão <i>versus</i> deformação do CP2-AUST.	76
Gráfico 14 – Trecho inicial, tensão <i>versus</i> deformação do CP2-FERRIT.....	76
Gráfico 15 – Tensão <i>versus</i> deformação CP2-AUST.....	76
Gráfico 16 – Tensão <i>versus</i> deformação CP2-FERRIT.	76
Gráfico 17 – Carga <i>versus</i> deslocamento, do modelo 1F-A-L50-E18.	84
Gráfico 18 – Carga <i>versus</i> deformação dos extensômetro do modelo 1F-A-L50-E18.	86
Gráfico 19 – Carga <i>versus</i> deslocamento, do modelo 1F-F-L50-E18.	87
Gráfico 20 – Carga <i>versus</i> deformação dos extensômetro do modelo 1F-F-L50-E18.	88
Gráfico 21 – Carga <i>versus</i> deslocamento, do modelo 2F-A-L50-E60.	89
Gráfico 22 – Carga <i>versus</i> deformação dos extensômetro do modelo 2F-A-L50-E60.	90
Gráfico 23 – Carga <i>versus</i> deslocamento, do modelo 2F-F-L50-E60.	91
Gráfico 24 – Carga <i>versus</i> deformação dos extensômetro do modelo 2F-F-L50-E60.	92
Gráfico 25 – Carga <i>versus</i> deslocamento dos estudos de caso austenítico com um furo.	96

Gráfico 26 – Carga <i>versus</i> deslocamento dos estudos de caso ferrítico com um furo.	97
Gráfico 27 – Carga <i>versus</i> deslocamento dos estudos de caso com dois furos, austenítico.....	98
Gráfico 28 – Carga <i>versus</i> deslocamento dos estudos de caso com dois furos, ferrítico.	100
Gráfico 29 – Carga <i>versus</i> razão e_1/d_0 , austenítico, com um furo.....	103
Gráfico 30 – Carga <i>versus</i> razão e_1/d_0 , ferrítico, com um furo.....	103
Gráfico 31 – Valores de $k_{r,num}$ <i>versus</i> razão e_2/d_0 - austenítico.....	104
Gráfico 32 – Valores de $k_{r,num}$ <i>versus</i> razão e_2/d_0 - ferrítico.....	104
Gráfico 33 – Superfície dos modelos com um furo, austenítico.....	109
Gráfico 34 – Superfície dos modelos com um furo, ferrítico.....	109
Gráfico 35 – superfície dos modelos com dois furos, austenítico.....	110
Gráfico 36 – Superfície dos modelos com dois furos, ferrítico.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

cb	Chapa base
CP	Corpo de prova
Dif,Fu	Diferença entre cargas últimas
EC3	Eurocode 3
EC4	Eurocode 4
EN	Norma Europeia
ETOTAL	Energia total
Eurocode	Comitê Europeu de Normalização
EXT	Extensômetro linear
Ferrit	Aço inoxidável ferrítico
LVDT	Transdutor linear
MEF	Método dos elementos finitos
MRC	Método da resistência contínua
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PGECIV	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
ROS	Extensômetro de roseta
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

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_0	Diâmetro do furo
E	Módulo de elasticidade
e_1	Distância paralela a direção da força da linha de parafuso até a borda
e_2	Distância perpendicular à direção da força da linha de parafuso até a borda
$F_{b,rd}$	Resistência ao esmagamento
$F_{v,rd}$	Resistência ao cisalhamento por cada plano de corte
$F_{u,exp}$	Carga última experimental
$F_{u,num}$	Carga última numérica
f_u	Tensão última da placa
f_y	Tensão limite de escoamento da placa experimental
f_{up}	Tensão última do parafuso
f_{ured}	Tensão última da placa inoxidável reduzida
k	Constante que depende do tipo de material
k_r	Fator de redução para o aço inoxidável
$k_{r,num}$	Fator de redução para o aço inoxidável da análise numérica
k_1	Fator de correção em função do posicionamento dos parafusos
$N_{pl,rd}$	Força última de projeto de escoamento da seção bruta
P	Distância entre linhas de parafusos no sentido perpendicular à força
P_1	Distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força
r	Número de parafusos numa seção dividido pelo número total de parafusos da ligação e o valor de u , dado por $2e_2$
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
δ	Deslocamento
$\delta_{u,exp}$	Deslocamento referente a carga última experimental
$\delta_{u,num}$	Deslocamento referente a carga última numérica
ε	Deformação axial
$\varepsilon_{0,2}$	Deformação a 0,2%
ε_1	Deformação a 0,1%
ε_2	Deformação a 1%
γ_{m0}	Coefficiente de resistência EC3
γ_{m2}	Coefficiente de resistência EC3
σ	Tensão
σ_0	Tensão elástica
$\sigma_{0,2}$	Tensão a 0,2%
σ_1	Limite de escoamento para deformação de 0,1%

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	22
Motivação	25
Objetivos	26
Estrutura da dissertação	26
1. LIGAÇÕES APARAFUSADAS	28
1.1. Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada	32
1.2. Dimensionamento das ligações	33
1.3. Estudos acerca do comportamento das ligações aparafusadas	36
2. ANÁLISES EXPERIMENTAIS	43
2.1. Caracterização dos materiais	43
2.1.1. Confeção do corpo de prova	44
2.1.2. Ensaio de corpo de prova	45
2.1.3. Corpos de prova austenítico	46
2.1.4. Corpos de prova ferrítico	48
2.2. Apresentação dos ensaios experimentais	50
2.2.1. Justificativas para escolha dos parâmetros adotados da ligação	50
2.3. Instrumentação	53
2.3.1. Extensômetros	53
2.3.2. LVDT	54
2.3.3. Sistema de aplicação de cargas	55
2.3.4. Aquisição de dados	56
2.4. Caracterização das ligações aparafusadas	56
2.5. Dificuldades na preparação dos ensaios	60
3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
3.1. Modelos com um furo	61
3.1.1. Austenítico	62

3.1.2. Ferrítico	65
3.2. Modelos com dois furos	68
3.2.1. Austenítico.....	69
3.2.2. Ferrítico	72
4. ANÁLISE NUMÉRICA.....	75
4.1. Lei constitutiva	75
4.2. Análise não linear.....	78
4.3. Tipo de elemento.....	79
4.4. Geometria e simplificação do modelo.....	80
4.5. Elemento de contato	81
4.6. Condições de contorno	81
4.7. Carregamento	82
4.8. Estudo da malha.....	83
4.9. Comparação dos modelos numéricos com os experimentais	83
4.9.1. Modelo: 1F-A-L50-E18	84
4.9.2. Modelo: 1F-F-L50-E18	86
4.9.3. Modelo:2F-A-L50-E60	88
4.9.4. Modelo: 2F-F-L50-E60	91
4.10. Resultados das análises numéricas	93
5. ESTUDO PARAMÉTRICO	95
5.1. Observações a respeito das análises numéricas.....	102
5.2. Análise dos resultados obtidos	105
CONCLUSÕES	111
Trabalhos futuros.....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

INTRODUÇÃO

Os aços denominados inoxidáveis são os da família que contém no mínimo 10,5% de cromo. Esse elemento químico influencia na resistência à corrosão do material e encontra-se distribuído de forma homogênea no elemento. Sua maior resistência à corrosão está relacionada à reação que o cromo produz, em presença de oxigênio, formando uma camada superficial que atua como proteção a agentes corrosivos. O aço inoxidável, ainda pouco utilizado no Brasil, é bastante empregado em países desenvolvidos devido a sua excelente resistência mecânica, capacidade de deformação, resistência ao fogo, durabilidade, baixo custo de manutenção e apelo estético, mas os custos destes materiais ainda influenciam na escolha a ser utilizado nos projetos, como pode ser observado no Gráfico 1. De fato, o preço do aço inoxidável é na ordem de quatro vezes maior que o aço carbono [1].

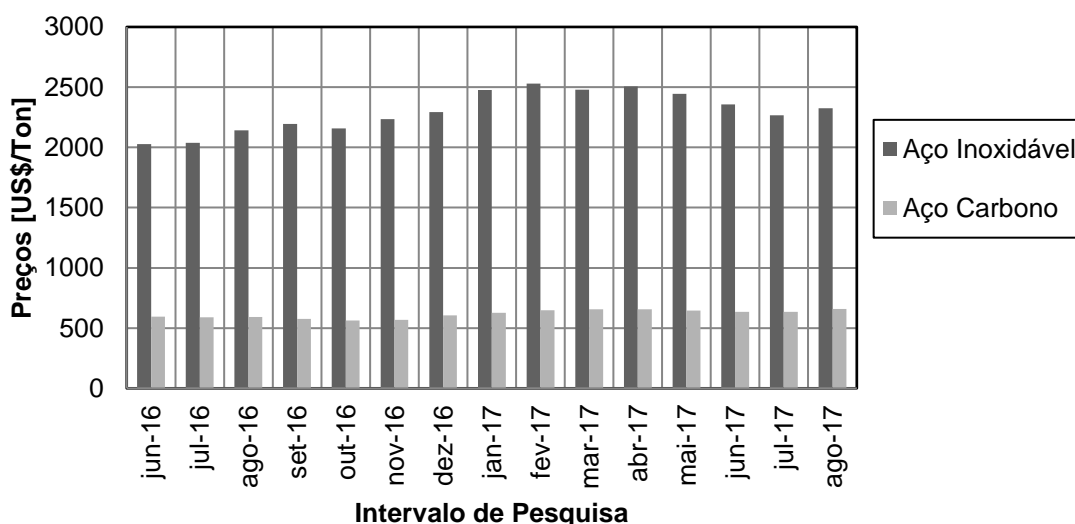


Gráfico 1 – Comparação de custos entre aço carbono e aço inoxidável [1]

Alinhado aos requisitos estruturais, a busca por construções sustentáveis vêm sendo cada vez mais frequente e o aço inoxidável é um produto que atende a alguns critérios dessas construções, como maior durabilidade, menor geração de resíduos e aproveitamento de matéria prima reciclada em sua composição. Apesar do elevado custo inicial do material, sua análise a longo prazo, e as intervenções para manutenção são reduzidos, o que permite uma compensação nos gastos iniciais,

devido aos menores gastos com reforma e manutenção. A Figura 1 mostra um exemplo de construção que utiliza aço inoxidável, e por estar exposta a ambiente marinho, apresentaria um elevado custo de manutenção, reduzido pelo emprego desse material.



Figura 1 – Píer Progresso, México [2]

O Gráfico 2 mostra a curva tensão *versus* deformação, comparando os comportamentos entre os aços carbono e inoxidável. É possível observar que o aço inoxidável alcança um valor maior de tensão e possui maiores deformações quando comparado ao aço carbono, apesar de não apresentar um patamar de escoamento bem definido.

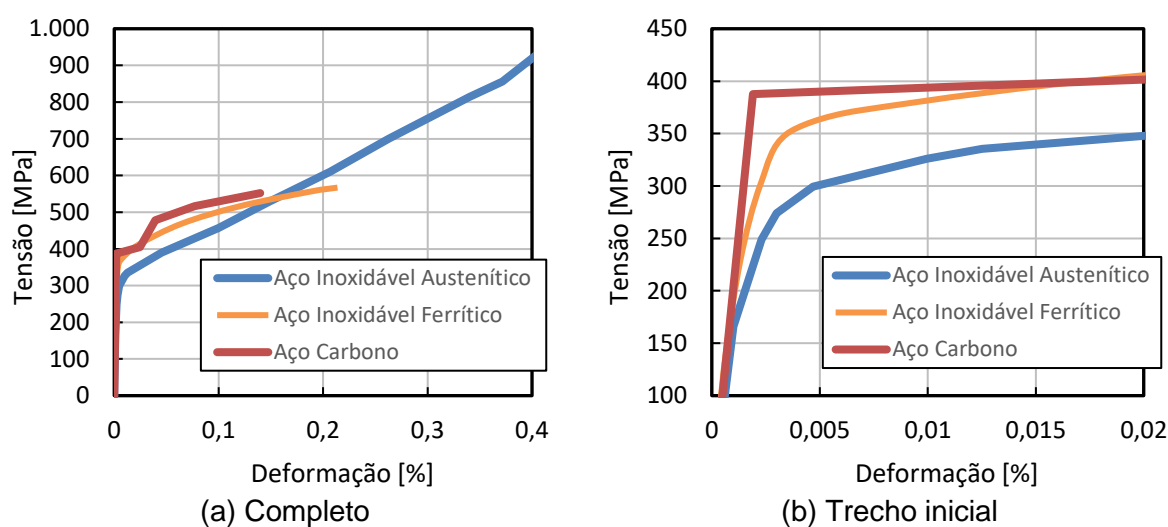


Gráfico 2 – Curva tensão *versus* deformação.

Os fabricantes de elementos em aço inoxidável têm buscado desenvolver seus processos de fabricação, de forma a melhorá-los, onde os principais objetivos são: redução de custos, 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 [3].

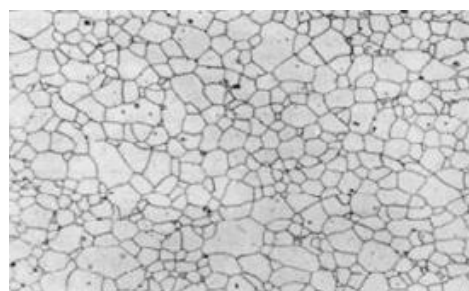
A tendência pela modernidade e sofisticação nas estruturas está alterando o comportamento social em que prevalece o consumo consciente. Neste contexto, o aço inoxidável mostra ser um material promissor para a construção sustentável, já que ele também é reciclável.

Conforme a sua composição química e o tipo de fabricação, o aço inoxidável pode ser dividido em cinco grupos: austenítico, ferrítico, duplex, martensítico e endurecível por precipitação. Sendo que, esses cinco grupos principais podem se subdividir em famílias, conforme a composição do restante da liga de aço, sendo então referenciadas por séries.

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo analisar o comportamento de placas aparafusadas submetidas à tração para os dois tipos de aços inoxidáveis mais utilizados na construção civil: austenítico A304 e o ferrítico 430. A Figura 2 apresenta, respectivamente, a estrutura microscópica desses dois tipos de aço em estudo.



(a) Austenítico A304



(b) Ferrítico 430

Figura 2 – Estrutura microscópica do aço inoxidável [3]

Os aços austeníticos apresentam em sua composição cerca de 17% a 25% de cromo, 7% a 20% de níquel e o restante de ferro. Fazem parte de sua família a série 300, onde estão presentes as seguintes designações: aço-cromo-níquel (301, 302, 303, 304, 304L, 321), aço-cromo-níquel-molibdênio (316, 316L, 316S, 316TI), aços refratários (309, 310, 310S). De acordo com Abinox [4], essa série tem como

característica a alta resistência à corrosão, boa resposta aos trabalhos a frio, ótimas propriedades mecânicas e facilidade em operações de soldagem.

Os aços ferríticos possuem de 11% a 17% de cromo e teores de níquel muito baixos, reduzindo o seu custo comparado aos aços austeníticos. Fazem parte de sua família a série 400, que possuem como uma de suas divisões o aço-cromo (409, 420, 430). São muito utilizados na produção de eletrodomésticos, moedas, revestimentos de elevadores e talheres (utensílios domésticos). Tem como característica limitada resistência à corrosão. Sua resistência mecânica pode ser aumentada por tratamento a frio [4].

A escolha do tipo de aço inoxidável deve levar em consideração o ambiente que ele estará sujeito e a aplicação, pois como foi mencionado, o nível de cromo é distinto entre os tipos de aço, fazendo com que tenham níveis diferentes de resistência à corrosão. A escolha de um material com maior presença de cromo, sem necessidade, pode onerar os custos de execução da construção.

Motivação

Atualmente no desenvolvimento da engenharia estrutural, procura-se obter projetos que atendam às especificações do cliente e normas técnicas vigentes, mas também, que proporcione menores custos e sejam mais eficazes em termos de tempo de construção e reforma. Desta forma, uma das maneiras de se avaliar uma estrutura é obter informações corretas sobre seu comportamento e características, que podem impactar na 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 aumentar o conhecimento das propriedades físicas dos novos materiais, bem como seu comportamento estrutural. Então, buscando tornar a utilização de aço inoxidável mais econômica, deve-se evitar o superdimensionamento. E para isso, faz-se necessário conhecer o real comportamento estrutural do aço inoxidável, já que na maioria dos cálculos não são consideradas as propriedades reais desse material, o que incluem as quatro curvas tensão *versus* deformação muito distintas. Essas curvas ainda apresentam comportamentos não lineares em estágios iniciais, sem patamar de escoamento bem definido, e com ampla região de

encruamento. Por conta dessas diferenças, o aço inoxidável possui comportamento ortotrópico, isto é, tem sua propriedade, a tração e compressão, no sentido paralelo a laminação funcionando diferente no sentido perpendicular a laminação.

O estudo das ligações impacta diretamente no cálculo da estrutura. Tais análises necessitam ser aprimoradas, de forma a permitir o dimensionamento de forma mais reduzida possível. A análise do comportamento das ligações utilizando o aço inoxidável apresenta um campo de estudo em desenvolvimento, devido às variações do material, sendo motivação para a realização deste trabalho.

Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar e estudar o comportamento estrutural de ligações aparafusadas, com um e dois furos, de chapas finas em aço inoxidável submetidas à tração por meio de ensaios experimentais e modelos numéricos. Os resultados dos ensaios experimentais são confrontados através de modelos numéricos, baseados no método dos elementos finitos, utilizando o programa Abaqus [6]. Também será feito um estudo paramétrico baseado em estudos feitos por Salih *et al.* [7] [8] e abordando os métodos teóricos de dimensionamento de estrutura em aço inoxidável baseado em analogias da EN1993-1-4 [9].

Estrutura da dissertação

O capítulo introdutório apresentou a contextualização do aço inoxidável, princípios motivacionais e objetivos acerca do tema proposto neste trabalho, bem como, a estrutura básica do que será tratado nesta dissertação.

O capítulo 1 apresenta algumas considerações gerais sobre os parâmetros das ligações aparafusadas e possíveis modos de ruptura dessas ligações. Também são apresentados de forma detalhada, o dimensionamento das placas pertencentes as ligações segundo as recomendações do EN 1993-1-4 [9], além de alguns dos principais estudos já realizados sobre o tema proposto nesta dissertação.

O segundo capítulo aborda sobre os procedimentos, características e detalhes para a caracterização dos materiais utilizados nos ensaios experimentais, e que será utilizado posteriormente na modelagem numérica. Serão também abordadas as justificativas para a escolha dos parâmetros adotados da ligação nos ensaios experimentais. Além disso, são apresentadas a preparação e instrumentação dos ensaios. Ao final deste capítulo, são reportadas as características e dificuldades enfrentadas nos ensaios.

No capítulo 3 são apresentados os resultados experimentais, conforme o tipo de ligação e o aço inoxidável utilizado. E no capítulo 4, o desenvolvimento dos modelos da análise numérica, com base nos dados obtidos na caracterização dos materiais e nos ensaios experimentais, é reportado. São apresentados alguns modelos que foram utilizados para calibração, comparando as análises experimentais com as simulações numéricas.

O capítulo 5 apresenta um estudo paramétrico para comparar o comportamento das ligações aparafusadas observando e analisando os valores finais obtidos. Logo em seguida, o último capítulo apresenta todas as conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho juntamente com algumas sugestões para trabalhos futuros.

1. LIGAÇÕES APARAFUSADAS

Os projetos estruturais envolvem especificações e cálculos de como as diversas peças estruturais (vigas, colunas, tirantes, lajes, etc.) são ligadas entre si. As ligações aparafusadas têm a função de ligar e transferir esforços entre peças estruturais, e por isso, é muito importante ter atenção no dimensionamento desses elementos e garantir que esses sejam seguros. A Figura 3 apresenta um exemplo de ligação aparafusada localizada no aeroporto Sá Carneiro, na cidade do Porto, em Portugal, e a Figura 4 ilustra um outro exemplo de uma estrutura global em que apresenta algumas partes em aço inoxidável, cuja ligação também é aparafusada, localizada na ponte Helix, em Cingapura.



Figura 3 – Ligação aparafusada em estrutura de aço inoxidável [5].



Figura 4 – Ponte Hélix, para pedestres, localizada em Cingapura [10].

Os tipos de elementos mais comuns para ligações de estruturas são o rebite, parafuso e solda. O rebite tem caído em desuso, sendo então, as ligações aparafusadas e soldadas as alternativas para execução de ligações estruturais em aço. As ligações aparafusadas tendem a diminuir a resistência da seção a esforços normais, pois a existência de furos modifica a configuração do elemento estrutural. A solda não tem este problema, porém, é um processo que demanda um custo maior para execução, necessitando assim, de mão de obra especializada e maior tempo na montagem da estrutura.

Neste trabalho será avaliada a resistência de chapas aparafusadas sob tração usando aço inoxidável. Os possíveis modos de ruptura destas chapas aparafusadas são:

- a) A ruptura da área líquida conforme pode ser observado na Figura 5. Isto acontece porque a existência de furos causa uma diminuição na seção transversal efetiva, ocasionando perda de resistência na seção;

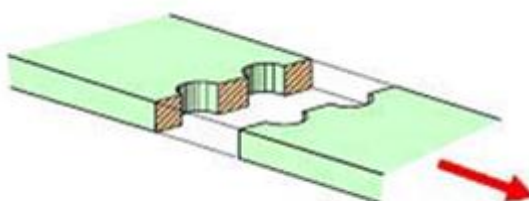


Figura 5 – Ruptura na área líquida [5].

- b) Na Figura 6, observa-se o rasgamento da chapa. Este modo de ruptura ocorre quando o parafuso possui resistência maior que a chapa, provocando assim, tensões cisalhantes na mesma. Só ocorre este tipo de ruptura caso a distância entre a borda e o furo seja muito pequena;

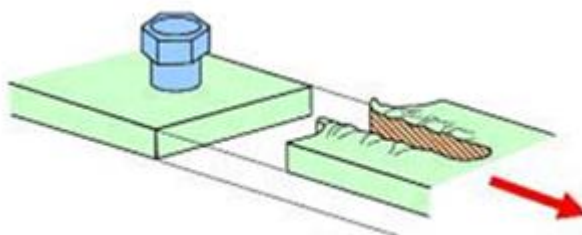


Figura 6 – Rasgamento da chapa [5].

- c) Na Figura 7, observa-se o esmagamento da chapa devido à alta tensão de compressão existente na região de contato entre o parafuso e a chapa. Neste caso a distância entre a borda e o furo é suficientemente grande para impedir o rasgamento da chapa;

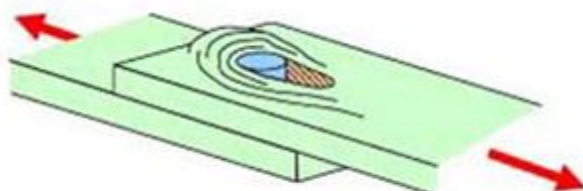


Figura 7 – Esmagamento da chapa [5].

- d) O corte do parafuso é um outro modo de falha conforme pode ser observado na Figura 8. Neste caso, há uma ruptura por cisalhamento no parafuso, em sua parte rosqueável;

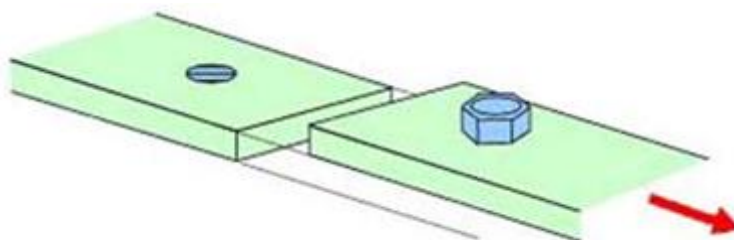


Figura 8 – Corte do parafuso [5].

- e) Na Figura 9, é descrito o escoamento da seção bruta da chapa caracterizado pela diminuição da seção transversal bruta. Este modo de falha tem como ponto de destaque a elevada relação entre a tensão de ruptura e a de escoamento.

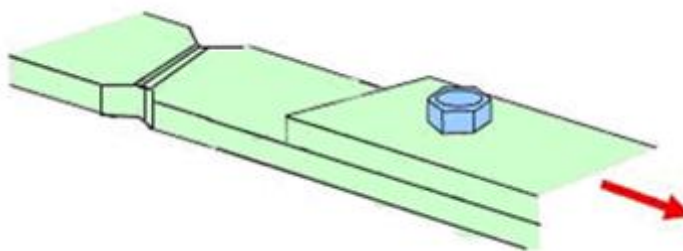


Figura 9 – Escoamento da seção bruta [5].

- f) Ainda pode ser citado o modo de falha ligado a ruptura em bloco, que é caracterizado pelo cisalhamento da placa fora da seção líquida como é mostrado na Figura 10;

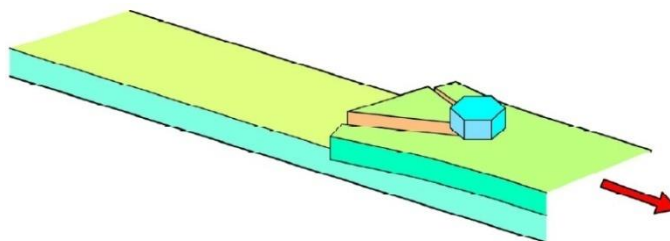


Figura 10 – Ruptura em bloco [5].

- g) O efeito *curling* corresponde a uma deformação da borda final de chapa para fora do plano. Pode ocorrer quando a distância entre o furo e a borda da chapa é muito grande, conforme apresentado na Figura 11.

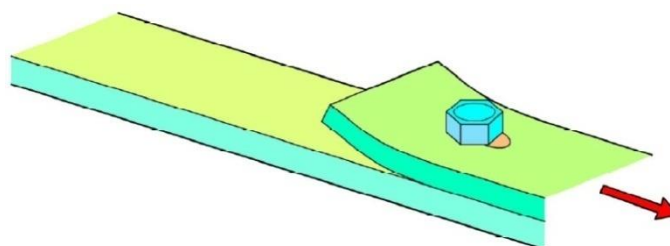


Figura 11 – Efeito *curling* [5].

A Tabela 1 resume os possíveis modos de falha abordados acima para esta dissertação e a nomenclatura que será atribuída a cada um deles.

Tabela 1 – Modos de falha possíveis.

Modo de Falha A	Ruptura da Área Líquida
Modo de Falha B	Rasgamento da Chapa
Modo de Falha C	Esmagamento da Chapa
Modo de Falha D	Corte do Parafuso
Modo de Falha E	Escoamento da seção bruta
Modo de Falha F	Ruptura em bloco

1.1. Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada

Na Figura 12 são apresentados alguns parâmetros geométricos que representam as dimensões importantes da ligação aparafusada, submetida a esforço normal, sendo eles: t a espessura da chapa; L a largura da chapa; d_o o diâmetro do furo destinado ao parafuso; e_1 a distância longitudinal entre a borda final da chapa e o centro do furo destinado ao parafuso; e_2 a distância transversal entre a borda lateral da chapa e o centro do furo destinado ao parafuso; P_1 a distância longitudinal entre os centros dos furos destinados aos parafusos, quando houver mais de um furo nesta mesma direção.

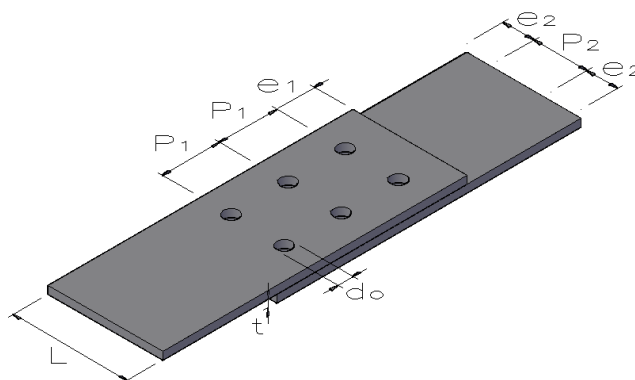
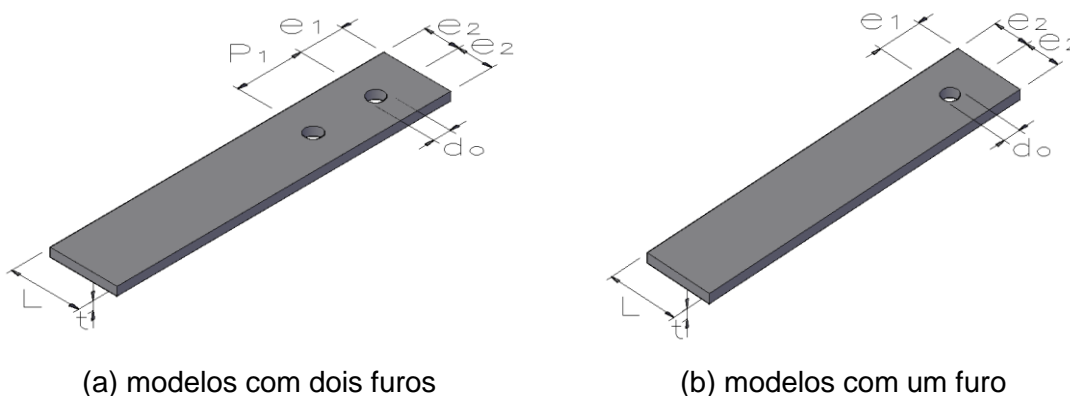


Figura 12 – Definição de parâmetros básicos.

Dependendo do número de furos na linha da ligação, poderá ocorrer a eliminação do parâmetro P_1 , como mostra a Figura 13(b).



(a) modelos com dois furos

(b) modelos com um furo

Figura 13 – Parâmetros presentes na ligação estudada.

A norma europeia EN 1993-1-4 [9] faz algumas recomendações para valores da dimensão, e_1 que devem ser empregados conforme a Equação (1) e a Equação (2).

$$1,2 \times d_0 \leq e_1 \leq 4t + 40 \text{ mm} \quad (1)$$

$$1,2 \times d_0 \leq e_2 \leq 4t + 40 \text{ mm} \quad (2)$$

1.2. Dimensionamento das ligações

Seguem algumas recomendações utilizadas para o dimensionamento de uma ligação aparafusada submetida à tração. Aqui será dado ênfase à EN 1993-1-4 [9] para fins de dimensionamento e comparação de resultados.

Será apresentado o cálculo proposto na EN 1993-1-4 [9], onde em seu item 5.3.1 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 por meio das Equações (3) e (4), respectivamente.

Resistência plástica para escoamento da seção bruta (modo E)

$$N_{pl,Rd} = \frac{(A_g \times f_y)}{\gamma_{m0}} \quad (3)$$

Resistência última para ruptura da seção líquida (modo A)

$$N_{u,Rd} = \frac{(k_r \times A_{net} \times f_u)}{\gamma_{m2}} \quad (4)$$

onde,

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

A_{net} é área líquida da barra, sendo obtida por meio das Equações(5) e (6);

n é a quantidade de furos contidos na seção de ruptura da seção transversal, geralmente ocorrendo ortogonalmente ao sentido do carregamento;

f_y e a tensão limite de escoamento;

f_u é a tensão limite última a tração da chapa;

γ_{m0} e γ_{m2} são coeficientes de resistência, sendo seus valores baseados no item 5.1 da norma europeia iguais a 1,10 e 1,25, respectivamente;

k_r é o fator de redução para minorar a carga, obtido pela Equação (7).

$$A_{net} = A - n \times d_o \times t \quad (5)$$

$$A = L \times t \quad (6)$$

$$k_r = \left[1 + 3r \left(\frac{d_o}{u} - 0,3 \right) \right] \leq 1,0 \quad (7)$$

onde,

r é o número de parafusos na seção transversal dividido pelo total de parafusos da ligação;

$u = 2e_2 \leq P_2$; para o caso de $P_2 = 0$ não há o limite por este parâmetro, ficando assim $u = 2e_2$;

e_2 é a distância transversal entre a borda lateral da chapa e o centro do furo destinado ao parafuso.

Ressalta-se que os coeficientes de resistência não serão incluídos no dimensionamento deste trabalho, uma vez que os materiais empregados serão caracterizados, sendo utilizado o valor obtido nesses ensaios.

Para garantir que as análises executadas não terão sua ruína no parafuso, pois este não é objetivo desta dissertação, será necessário saber a resistência do mesmo e assim, escolher o modelo que não ocorrerá a ruptura do parafuso antes da placa de aço inoxidável. Então, foram utilizados os critérios para avaliar a resistência do

parafuso, segundo a EN 1993-1-8 [11], conforme a tabela 3.4 dessa norma, que estuda o critério de ruína (modo de falha D) de corte do parafuso, descrito na Equação (8).

Resistência ao corte do parafuso (modo D)

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{up} \times A}{\gamma_{m2}} \quad (8)$$

onde,

f_{up} é a tensão última do parafuso;

α_v é o Parâmetro definido pelo tipo de parafuso e onde ocorre o plano de corte.

Para o estudo do modo de falha B, que corresponde ao rasgamento da chapa, e para o modo de falha C, referente ao esmagamento da chapa, é utilizado a Equação (9) para o cálculo da resistência oriunda da EN 1993-1-8 [11]. Observa-se que, apesar de serem modos de falhas distintos, segundo a norma europeia, a resistência de ambos é dada por esta mesma equação.

Resistência ao rasgamento da parte final da chapa (modo B ou C)

$$F_{b,Rd} = \frac{(k_1 \times \alpha_d \times f_{u,red} \times d \times t)}{\gamma_{m2}} \quad (9)$$

onde,

α_d é o parâmetro analisado na direção da transferência da força; sendo para a distância entre a borda e o furo (e_1) igual a $e_1/3d_0$, e entre furos (P_1) igual a $P_1/3d_0 - 1/4$, devendo ser adotado o menor valor entre $[f_{ub}/f_u; \alpha_d; 1]$;

k_1 é o parâmetro analisado na direção perpendicular à transferência da força sendo definido para a distância entre a borda e furo (e_1) por $2,8e_2/d_0 - 1,7 \leq 2,5$, e entre furos (P_1) por $1,4P_2/d_0 - 1,7 \leq 2,5$;

$f_{u,red}$ é dado pela equação (10), sendo que para ligações em aço inoxidável, o valor de f_u deve ser substituído por $f_{u,red}$ para o cálculo de capacidade de carga.

$$f_{u,red}=0,5 \times f_y + 0,6 \times f_u \quad (10)$$

A resistência ao esmagamento de uma ligação aparafusada em aço inoxidável normalmente é governada pela necessidade de limitar o alongamento do furo, devendo ser realizada uma verificação para prevenir esse efeito no seu estado limite último, conforme Equação (10), sendo que para austenítico é $f_{u,red}=643,19$ MPa e para ferrítico seria $f_{u,red}=418,05$ MPa.

1.3. Estudos acerca do comportamento das ligações aparafusadas

São apresentados, a seguir, em ordem cronológica, resumos de trabalhos experimentais e teóricos de sistemas de ligações estruturais, realizados ao longo dos anos, do assunto em estudo.

Santos [5], em 2008, analisou o comportamento estrutural de elementos em aço inoxidável. Ele elaborou um estudo experimental para analisar o comportamento de ligações aparafusadas em aço inoxidável S304 e aço carbono USI300, com furação defasada, submetido a um esforço axial de tração. O autor concluiu que as comparações de resultados mostraram-se efetivamente úteis na visualização dos comportamentos apresentados pelo ensaio com mesmas características geométricas. As cargas últimas de ruptura encontradas para o aço carbono são coerentes quando comparadas aos resultados segundo a EN 1993-1-8 [11]. Para os ensaios em aço inoxidável, verificou-se grandes deformações e uma maior capacidade de absorção de energia, devida sua capacidade de encruamento. O modo de ruína e carga última esperada não se confirmaram, apresentando grande diferença entre as cargas de ruptura experimental e a normativa para as ligações em aço inoxidável.

Kim et al. [12] fizeram um estudo paramétrico sobre as deformações de ligações aparafusadas, com o efeito *curling*, por meio de uma avaliação computacional utilizando o método dos elementos finitos. Esse estudo faz uma variação da espessura e distância entre a borda e o furo da chapa, feita em aço inoxidável. Foram analisados, basicamente, três critérios de ruína da ligação, de acordo com a influência do efeito *curling*:

- Ruptura da seção líquida: a Figura 14 apresenta os efeitos deste modo de falha.

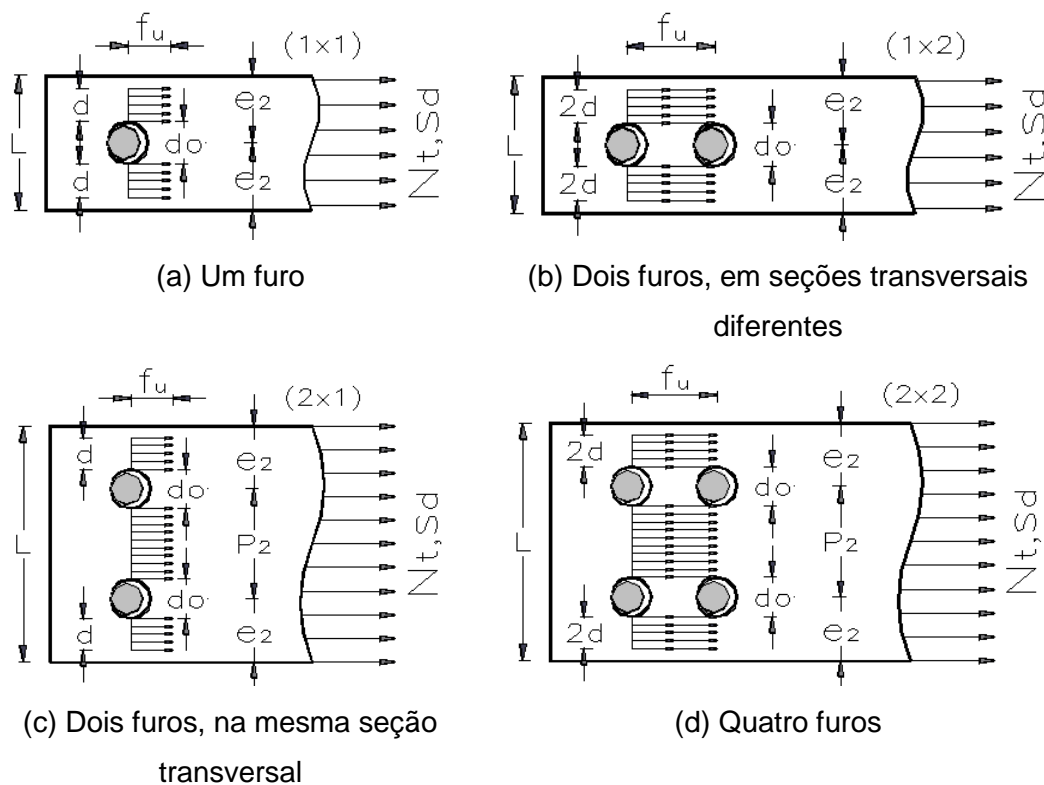


Figura 14 – Efeito na seção líquida [12].

A Equação (11) é utilizada para ruptura a seção líquida - modo de falha A - (P_{u1}).

$$P_{u1} = b_e \times t \times f_u \quad (11)$$

onde,

b_e é o somatório do efeito da tensão última em torno do furo, obtido por meio da Figura 14, sendo: para a Figura 14 (a) igual a $b_e = 2d$, se $b_e \leq L - d_o$; para a Figura 14 (b) igual a $b_e = 4d$, se $b_e \leq L - d_o$; para a Figura 14 (c) igual a $b_e = 2d + P_2 - d_o$, se $b_e \leq L - 2d_o$; e para a Figura 14 (d) igual a $b_e = 4d + P_2 - d_o$, se $b_e \leq L - 2d_o$.

- Rasgamento da parte final da chapa: as considerações são divididas em dois grupos. Para o caso de $2e_0 \leq P_2$, deve usar as Equações (12) e (13).

$$\text{Para } 2e_0 \leq d_0 \rightarrow \text{Faça: } P_{u2b} = n_t \times \left(\frac{4 \times t \times e_0^2}{d_0} \right) \times f_u \quad (12)$$

$$\text{Para } 2e_0 > d_0 \rightarrow \text{Faça: } P_{u2b} = n_t \times \left(\frac{4 \times t \times e_0^2}{4 \times e_0 - d_0} \right) \times f_u \quad (13)$$

Quando $2e_0 > P_2$, utiliza-se a Equação (14), onde os valores de e_0 , P_0 e n_t são obtidos pela Equação (15), Equação (16) e Equação (17), respectivamente.

$$P_{u2b} = n_t \times \left[e_0 + \left(1 + \frac{P_2 + d_0}{4 \times e_0} \right) \times P_0 \right] \times f_u \quad (14)$$

$$e_0 = e_2 - \frac{d_0}{2} \quad (15)$$

$$P_0 = P_2 - d_0 \quad (16)$$

$$n_t = n_1 \times n_2 \quad (17)$$

em que,

n_1 é igual ao número de parafusos na direção da força, na direção longitudinal;
 n_2 corresponde ao número de parafusos perpendicular à força, na direção transversal.

Desta forma o valor da resistência é dado pela Equação (18), limitado pela relação apresentada na Equação (19).

$$P_{u,2s} = n_t \times \left(\frac{2 \times t \times e_1}{\sqrt{3}} \right) \times f_u \quad (18)$$

$$e_1 = \min(e_1, 13t, P_2) \quad (19)$$

- Ruptura do bloco de cisalhamento: baseada em uma sequência de falhas com fratura transversal a direção da força aplicada.

Bouchair *et al.* [13] analisaram o comportamento de ligações aparafusadas de aço inoxidável, focando basicamente em dois tipos de ligações aparafusadas entre placas e cantoneiras de aço inoxidável tipo austenítico com chapas grossas, e seus modos de falhas, em especial, o modo *T-Stub*. Seus experimentos mostraram a ocorrência de grandes deformações que provocam uma redistribuição dos esforços denotando, com isso, uma vantagem nesta redistribuição. Porém, esta análise deixa em aberto a necessidade de um estudo mais amplo, referente a análise global da ligação, como uma ligação viga-pilar, para confirmar os resultados preliminares.

Kim *et al.* [14] investigaram a resistência final de placa fina em ligações aparafusada com uma linha de parafusos, utilizando análise de elementos finitos. Eles estudaram a influência do efeito *curling* na redução da resistência da ligação por meio de uma análise paramétrica, a fim de verificar um fator de redução proposto e avaliar o quanto que as normas estão distantes do real comportamento da estrutura em estudo. Foram feitas análises de elementos finitos em cerca de 115 modelos variando as espessuras (1,5, 3,0 e 6,0mm) e a distância entre a borda e o parafuso (e_1). Em alguns desses modelos também foram analisados o efeito *curling*, utilizando uma constante que minimizasse a resistência devido a tal efeito. Verificou-se que existe um limite na distância e_1 em que não há tanta diferença na alteração da capacidade de carga da ligação. Desta forma, são sugeridas equações baseadas na espessura da placa para estabelecer um limite mínimo desta distância final entre borda e furo, assim como fez nos estudos anteriores realizados por Kim *et al.*[12], mas agora considerando o tipo de ligação apresentado na Figura 14 (b). Nos modelos em que não ocorreu o efeito *curling*, a comparação com normas da *Stainless Steel Building Association*, do Japão (SSBA) [18] mostrou ser satisfatória para descrever os esforços de tração na ligação.

Silva [15] realizou uma modelagem numérica de elementos tracionados em aço inoxidável com parafusos defasados, por meio de uma avaliação do comportamento de chapas constituídas em aço inoxidável submetidas à tração por meio do método dos elementos finitos realizado no programa Ansys [19]. Com o estudo de malha adequada (com elementos com dimensões da ordem de 2 ou 3 mm), foram comparados os resultados numéricos com os ensaios experimentais de placas de aço

inoxidável de espessura de 3 mm submetidas à tração com furação alternada. Também, comparou os modos de falha proposto no EN 1993-1-8 [11]. Com esse trabalho, concluiu-se que para diferentes valores do parâmetro, S , não ocorrem 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. Os modelos com menor valor do parâmetro, S , apresentaram uma menor deformação na seção com dois furos, em comparação com outra ligação com configuração maior. No entanto, não houve uma diferença considerável de deformações nos modelos com espaçamento de 50 mm e 70 mm.

Em 2010, Salih *et al.* [7] elaboraram um estudo que mostra como o comportamento de ligações aparafusadas em aço inoxidável é diferente do aço carbono, devido ao encruamento do material inoxidável, apresentando uma curva tensão *versus* deformação do aço inoxidável que não apresenta patamar de escoamento tão bem definida como no aço carbono.

Os autores concluíram que a fundamental diferença entre os aços carbono e o inoxidável é a curva carregamento *versus* deformação. O aço carbono apresenta suas fases (elásticas e plásticas) bem definidas, enquanto a do aço inoxidável é expressa de forma contínua devido a um encruamento, não sendo possível evidenciar as mudanças de fases, como mostrado no Gráfico 2 desta dissertação. Portanto, para tal comportamento do aço inoxidável, há a necessidade de definir novos modelos de falhas. Ao final, esse estudo propõe regras para o comportamento de placas com dois furos e efeitos provocados pelo carregamento com base gráfica entre razão dos parâmetros e_1 e e_2 com o valor de d_0 , conforme apresentado na Tabela 2.

Salih *et al.* [8] estudaram falhas na seção líquida da ligação aparafusada feita em aço inoxidável. Este trabalho fez uma abordagem em duas fases para validar este estudo:

- Deformação provocada pela carga - utilizada para obter um gráfico de estudo a partir de elementos finitos (FE);
- Capacidade de resistência da ligação - análise de elementos finitos com base estatística de 0,99 e um desvio padrão de 0,03.

Desta forma foi possível validar os estudos apresentados, e assim, credibilizaram a realização dos demais modelos. Por meio desses estudos paramétricos validados e do fator de redução mostrado, foram determinados pela EN 1993-1-4 [9] a capacidade da seção líquida de ligações aparafusadas de aços inoxidáveis para material grosso e fino. Ao estudar a distribuição de tensões ao longo da seção líquida para diferentes distâncias da borda e arranjos de parafuso, verificou-se que a ductilidade do aço inoxidável é suficiente para assegurar uma grande redistribuição de tensões antes da fratura. Este estudo sugere melhorias modestas e mais simples para utilizar a capacidade de resistência quando comparado com o EN 1993-1-4 [9], baseando em ensaios e resultados numéricos gerados para comprovar a adoção de um coeficiente de segurança. Ao final, esse estudo propõe regras para o comportamento de placas com um furo e efeitos provocados pelo carregamento com base gráfica entre razão dos parâmetros e_1 e e_2 com o valor de d_0 . A Equação (20) apresenta a proposta dos autores.

Tabela 2 – Resumo das equações de projetos propostas neste em Salih *et al.* [7].

	Ligações de chapas grossas	Ligações de chapas finas	
		Ligações assimétricas, parafuso com um plano de corte	Ligações com simetria, parafuso com dois planos de corte
Não considerando deformações provocadas pelo carregamento aplicado	$N_{b,frac,prop} = \alpha_1 \times t \times d \times f_u$ <p>Onde:</p> $\alpha_1 = \begin{cases} 2.5 \times \left(\frac{e_1}{3 \times d_0} \right) \leq 2.5 & \text{para } e_2/d_0 > 1.5 \\ 2.5 \times \left(\frac{e_1}{3 \times d_0} \right) \leq 2 & \text{para } e_2/d_0 \leq 1.5 \end{cases}$	$N_{b,frac,prop,c} = \alpha_3 \times t \times d \times f_u$ <p>Onde:</p> $\alpha_3 = 1.6 \times \left(\frac{e_1}{2 \times d_0} \right) \leq 1.6$	
Considerando deformações provocadas pelo carregamento aplicado	$N_{b,def,prop} = \alpha_2 \times t \times d \times f_u$ <p>Onde: $\alpha_2 = 1.25 \times \left(\frac{e_1}{2 \times d_0} \right) \leq 1,25$</p>		

$$N_{u,Prop} = A_{net} \times f_u \quad (20)$$

Moze e Beg [16], em 2013, fizeram um estudo completo de tensões em ligações aparafusadas com parafuso disposto em uma seção. Desta forma, forneceram informações sobre resistência do material, a capacidade de corte do parafuso ou da resistência à tração da seção líquida. Foi realizada uma comparação entre EN 1993-1-4 [9], experimento e uma modelagem computacional que usou larguras diferentes. Conclui-se que a resistência da ligação e seu modo de falha estão ligados à distância entre a borda e o furo da chapa, também sendo influenciada pelo tipo de aço usado. É descrita uma fórmula modificada e simples para avaliar a resistência da ligação em aço carbono.

Kim *et al.* [17], em 2015, fizeram uma investigação experimental sobre a influência da força e do efeito *curling* em ligações aparafusadas de aço de placas finas, com espessuras de 1,5, 3,0 e 6,0mm, com quatro parafusos de diâmetro de 12mm, dispostos em duas linhas, conforme Figura 14 (d), solicitados à tração. Variando a distância final da placa, entre borda e parafuso (e_1), verificou-se que para distâncias curtas entre a borda e o parafuso, o limite de resistência é dado pela ruptura da parte final da ligação, uma vez que nos ensaios com valores de $e_1 \leq 36$ mm, e espessuras de 1,50 mm e 3,0 mm e para valores de $e_1 \leq 48$ mm, com espessura de 6,0 mm, foram obtidos a falha esperada, sendo a ruptura na seção final da placa. Para valores finais maiores, notou-se a ocorrência do efeito *curling*. Os resultados foram comparados com as normas vigentes e foi constatado que os projetos elaborados por estas normas são conservadores, quando comparado com os testes propostos neste trabalho, independentemente da ocorrência de efeito *curling*.

Freire [3] fez um estudo experimental e numérico do comportamento de peças tracionadas em aço inoxidável avaliando chapas constituídas em aço inoxidável dos tipos austenítico, ferrítico e duplex, submetidas à tração, por meio dos resultados obtidos por um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos desenvolvido no programa Abaqus [6]. Foram comparadas a resistência da ligação em aço inoxidável, que foi calculado por meio do método de resistência contínua, que considera a fase plástica do aço inoxidável.

2. ANÁLISES EXPERIMENTAIS

O uso de ensaios em laboratório contribui de forma significativa para compreender o comportamento das estruturas ou elementos estruturais, em especial, as ligações aparafusadas. Deste modo, é importante compreender qualquer incerteza que possa ter no material e imperfeições oriundas da fabricação ou conformação dos aços, que podem impactar nos resultados dos ensaios experimentais.

Dando foco as ligações aparafusadas com chapa submetida à tração, os ensaios têm como principais objetivos observar os modos de ruínas, de forma a caracterizar a componente mais frágil e identificar a sua capacidade resistente. Contudo, existe um cuidado com o uso dos ensaios experimentais e a restrição do número de ensaios a serem executados, devido ao alto custo de execução, além da dificuldade da medição dos resultados encontrados.

Este capítulo apresenta o estudo experimental realizado com chapas de aço inoxidável de dois tipos distintos: austenítico A304 e ferrítico 430. Será abordada a preparação e instrumentação dos ensaios, bem como, o sistema utilizado para a aplicação da carga e o registro de todos os dados investigados.

2.1. Caracterização dos materiais

Para definir as propriedades mecânicas dos materiais foram realizados ensaios de tração em corpos de provas, à temperatura ambiente, conforme a NBR 6673 [20]. Portanto, seguindo essas recomendações, a geometria dos corpos de prova, com 3mm de espessura, está representada na Figura 15.

Os testes de tração uniaxial foram realizados nas dependências do laboratório de estruturas do campus Fonseca Teles, em São Cristóvão, a uma velocidade controlada e variável em dois estágios a fim de verificar as propriedades mecânicas das chapas de aço inoxidável, conforme descrito por Huang *et al.* [21].

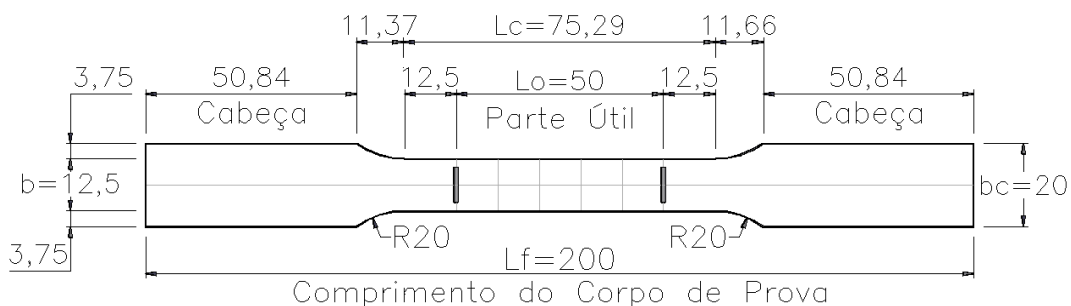


Figura 15 – Geometria do corpo de prova (valores em milímetros).

2.1.1. Confeção do corpo de prova

As confecções destes corpos de prova foram feitas na empresa Preparos Tork, que utilizou uma máquina de corte a eletro-erosão a fio computadorizado (Figura 16) com precisão de 0,02mm.



Figura 16 – Máquina para confecção dos corpos de prova.

A retirada do corpo de prova, na chapa de aço em estudo, deve ser feita no mesmo sentido da laminação da mesma, respeitando assim, a confecção dos modelos em estudo conforme apresentado na Figura 17.

No laboratório, os corpos de prova foram medidos e pesados a fim de conferir e obter a densidade dos materiais. Ao final, foi constatado que o aço inoxidável austenítico tem densidade de $7,91 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ e o aço inoxidável ferrítico tem densidade de $7,67 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$.

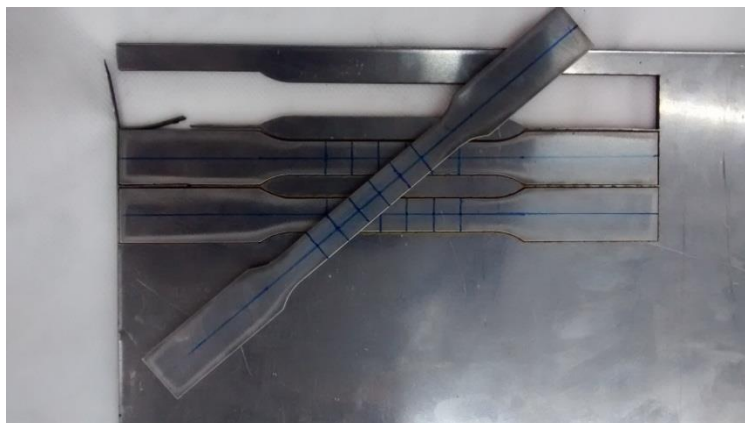


Figura 17 – Resultado final da confecção dos corpos de prova.

2.1.2. Ensaios dos corpos de prova

A nomenclatura adotada para os modelos dos corpos de prova seguirá o organograma apresentado na Figura 18.

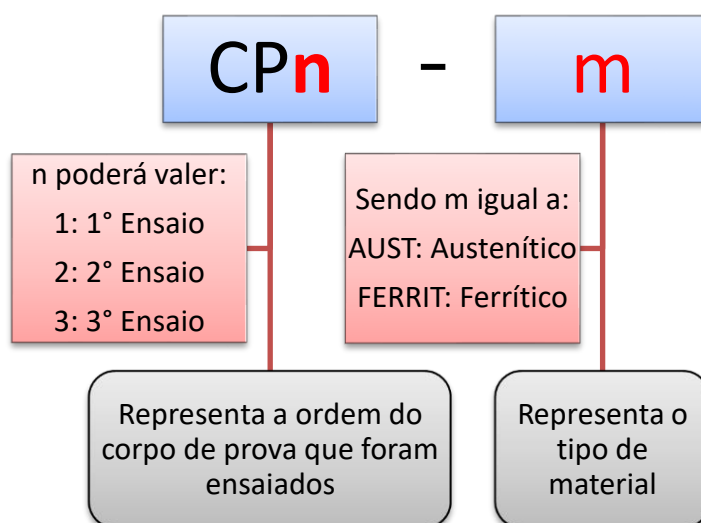


Figura 18 – Organograma para nomenclatura dos corpos de prova.

Para os ensaios de corpo de prova, foi utilizado a máquina Instron do modelo 3382 da empresa de mesmo nome, conforme Figura 19, que já tem um sistema integrado para aquisição de dados, capaz de apresentar como resultado final as tensões, cargas e deformações oriundas do ensaio. Esse equipamento tem capacidade para até 100 kN e velocidade máxima de 500 mm/min.



Figura 19 – Máquina usada no ensaio do corpo de prova (Instron 3382).

Os ensaios foram baseados em um estudo feito por Huang *et al.* [21], onde foi desenvolvido uma série de análises sobre ensaios em aço submetido à tração, em que avalia entre outras características, o comportamento estático e dinâmico. Ainda é avaliada a velocidade da execução dos ensaios desenvolvidos considerando a possibilidade de realização por meio de aplicação de dois estágios de velocidade distintos durante os testes.

2.1.3. Corpos de prova do aço austenítico

Foram realizados um total de três ensaios. No sistema de aplicação de carga, foi programado dois estágios de velocidade, corresponde a uma fase inicial, aplicada até atingir 0,2% de deformação, e a posterior, durante o restante do ensaio, após este valor, conforme mostra a Tabela 3. A Figura 20 apresenta exemplo do corpo de prova em aço inoxidável tipo austenítico.

Tabela 3 – Dados dos três ensaios do CP-AUST.

CP	Distância Útil			Dimensão da Malha			Velocidades		Tempo Ensaio [s]
	Inicial [mm]	Final [mm]	Var. [mm]	Inicial [mm]	Final [mm]	Var. [mm]	Inicial [mm/s]	Final [mm/s]	
1	50	82	32	10	16	6	0,000414	0,025980	10960
2	50	84	34	10	16	6	0,000834	0,013334	6297
3	50	81	31	10	15	5	0,000817	0,013340	6653



(a) antes do ensaio

(b) durante o ensaio

(c) após o ensaio

Figura 20 – Etapas de ensaio dos corpos de prova CP-AUST.

Como o comprimento da parte útil antes do ensaio é padrão, respeitando a norma para confecção de corpo de prova, ao final do ensaio é coletado o comprimento final da parte útil.

Os ensaios dos corpos de prova deste material geraram curvas tensão *versus* deformações parecidas, porém não idênticas, conforme Gráfico 3.

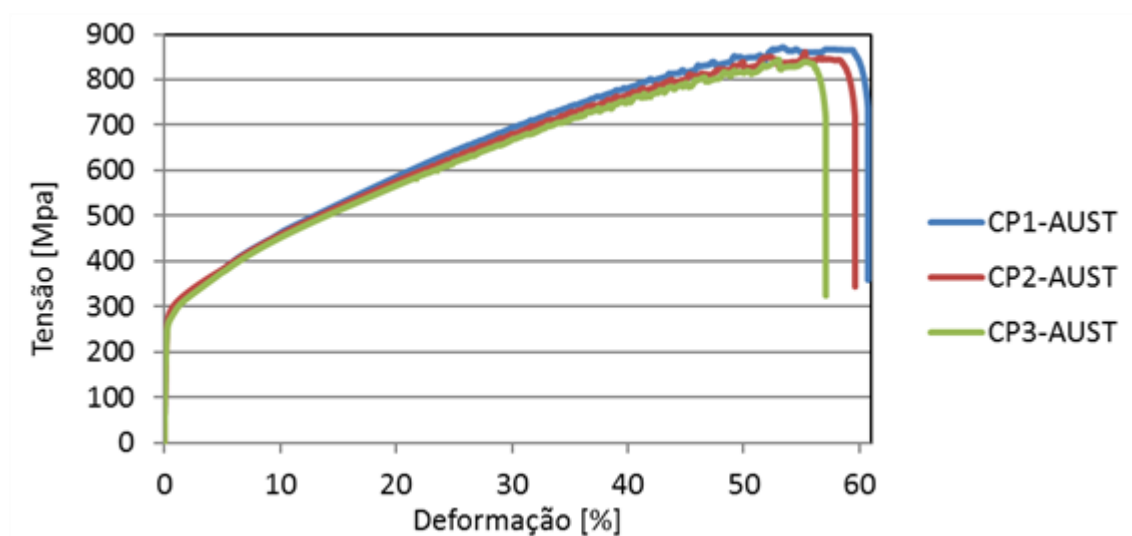


Gráfico 3 – Curva tensão *versus* deformação características dos CP-AUST.

Cada ensaio produziu características mecânicas distintas, porém relativamente próximas umas das outras, conforme mostra a Tabela 4. Para aplicação dos dados de características físicas obtidos serão considerados os dados do segundo ensaio CP2, pelo fato de ter uma curva mediana entre as outras dois corpos de prova. A escolha,

no entanto, deve-se principalmente por ter sido obtido o valor de módulo de elasticidade mais próxima ao esperado.

Tabela 4 – Características físicas obtidas nos três ensaios dos CP-AUST.

	f_y [MPa]	ϵ_{fy} [mm/mm]	f_u [MPa]	ϵ_{fu} [mm/mm]	E [GPa]
CP1-AUST	268,8	0,32	863,7	54,2	198,6
CP2-AUST	272,8	0,32	844,6	57,1	179,1
CP3-AUST	259,5	0,32	828,2	51,9	172,5

2.1.4. Corpos de prova do aço ferrítico

Assim como foi observado para o austenítico, foram também realizados três ensaios a tração para o aço inoxidável ferrítico. O sistema de aplicação de carga seguiu a mesma divisão de velocidades apresentado para os corpos de prova em aço inoxidável austenítico, conforme mostra a Tabela 5. A mostra o corpo de prova 1, em suas diferentes fases de ensaio. Na Figura 21 a medição do comprimento final foi realizada para comparação com o comprimento inicial, que segue a padronização da norma.

Os ensaios dos corpos de prova deste material geraram curvas tensão *versus* deformações aproximadas, conforme Gráfico 4.

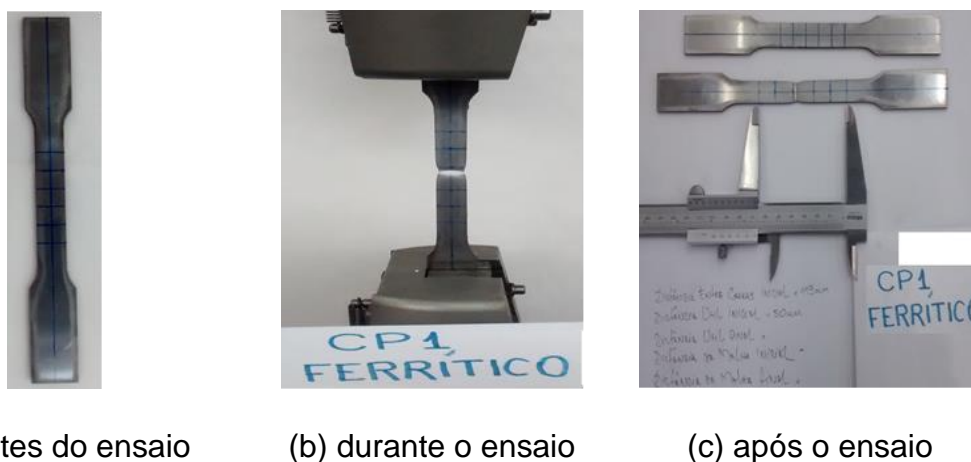


Figura 21 – Etapas de ensaio dos corpos de prova CP-FERRIT.

Tabela 5 – Dados dos três ensaios do CP-FERRIT.

CP	Distância Útil			Dimensão da Malha			Velocidades		Tempo Ensaio [s]
	Inicial [mm]	Final [mm]	Var. [mm]	Inicial [mm]	Final [mm]	Var. [mm]	Inicial [mm/s]	Final [mm/s]	
1	50	68	18	10	12,5	2,5	0,000833	0,009260	4752
2	50	62	12	10	13	3	0,000600	0,011323	3778
3	50	69	19	10	14	4	0,000833	0,013334	3397

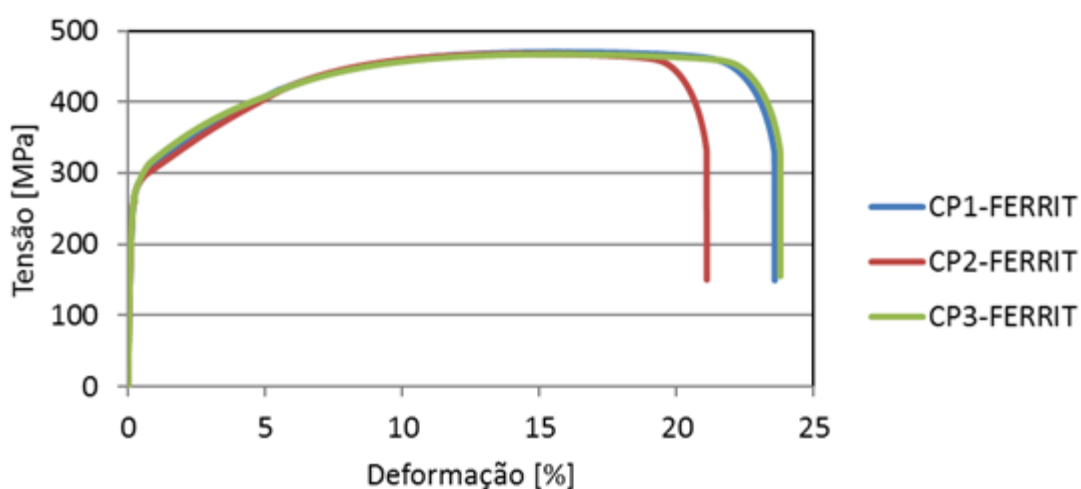


Gráfico 4 – Curva tensão versus deformação características dos CP-FERRIT.

Cada ensaio produziu características mecânicas distintas, porém relativamente próximas umas das outras, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Características físicas obtidas nos 3 ensaios dos CP-FERRIT.

	f_y [MPa]	ϵ_{fy} [mm/mm]	f_u [MPa]	ϵ_{fu} [mm/mm]	E [GPa]
CP1-FERRIT	274,08	0,28	470,43	15,87	276,5
CP2-FERRIT	274,54	0,28	467,97	14,41	222,8
CP3-FERRIT	286,87	0,38	467,41	15,71	277,3

Para aplicação, posterior, dos dados de características mecânicas obtidos, será considerado os dados do segundo ensaio CP2. Tal escolha, deve-se ao fato do valor do módulo de elasticidade ser o mais próximo do previsto, mas também por ter sido o ensaio com melhor desenvolvimento durante sua realização.

2.2. Apresentação dos ensaios experimentais

A nomenclatura adotada para os modelos experimentais, e também, para os numéricos seguirá o apresentado na Figura 22. Esta nomenclatura também será utilizada como base para o estudo paramétrico, apenas acrescentando o prefixo “EC”, que representa estudo de casos.

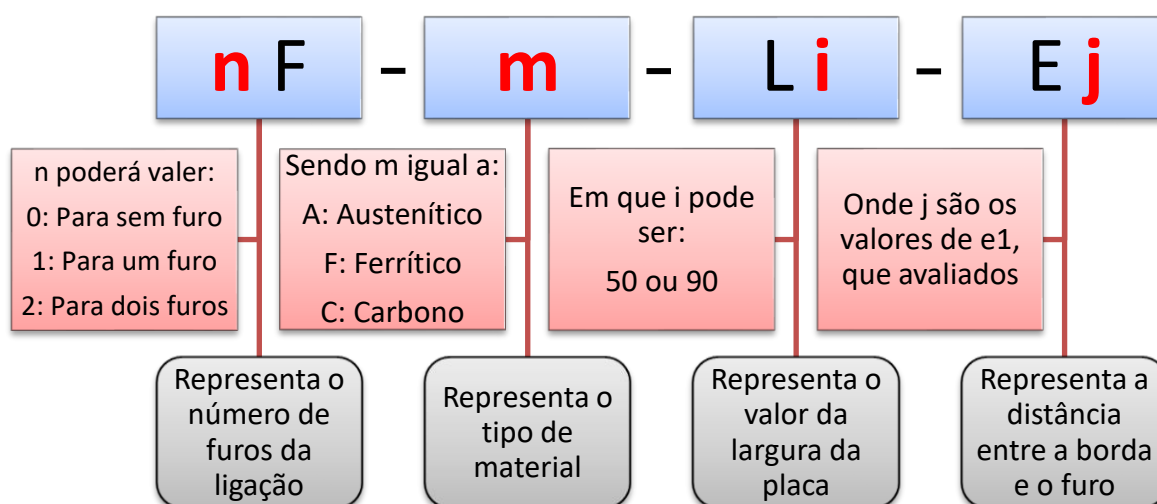


Figura 22 – Organograma para nomenclatura dos modelos ensaiados.

Os ensaios foram baseados nos modelos elaborados por Kim *et al.* [14], além de algumas variações propostas por Salih *et al.* [7] [8]. Desta forma, busca-se avaliar os parâmetros contidos em normas utilizadas e os efeitos gerados para os dois materiais em estudo.

2.2.1. Justificativas para escolha dos parâmetros adotados da ligação

Os parâmetros analisados neste trabalho foram escolhidos com o intuito de se avaliar os tipos de ruptura e as dimensões propostas pelas normas vigentes. Também será possível avaliar as diferenças entre os tipos de aços inoxidáveis aplicados, variando os parâmetros, e_1 e L , que geram alterações também no parâmetro, e_2 , e na proporção do dobro desse parâmetro.

Para avaliar o rasgamento na chapa (modo de falha B), foram utilizados modelos com um furo, apresentado na Figura 23 (a). Para a avaliação da ruptura na

seção líquida, corresponde ao modo de falha A, foram utilizados modelos com dois furos, descritos na Figura 23 (b).

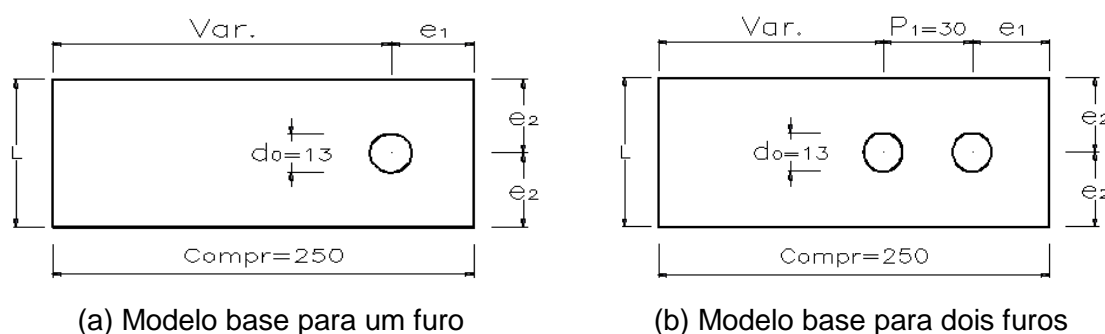


Figura 23 – Padrão base para os modelos avaliados.

A variação do parâmetro, L , foi realizada por meio de dois valores de largura, tendo como base os estudos de Moze e Beg [16], onde a primeira largura foi obtida pela relação para $e_2/d_0 = 2$ ($L = 50$ mm) e a segunda por $e_2/d_0 = 3,5$ ($L = 90$ mm). Observa-se que os parâmetros t , P_1 , o comprimento da chapa (Compr) e o diâmetro do furo (d_0) e qualquer outra característica referente ao parafuso foram mantidas constantes. Desta forma, espera-se que os resultados sejam mais conclusivos sobre os impactos dos tipos de liga de aço inoxidável e seus efeitos quando submetidos à tração.

Nas Tabela 7 e Tabela 8 estão presentes todos os 66 moldes diferentes dos modelos, e conseqüentemente, os casos estudados desta dissertação com seus parâmetros, materiais e quantidade de furos que serão avaliados. Em detalhes, a Tabela 7 mostra os modelos e os estudos paramétricos com um furo em ordem crescente de valores de e_1 , dividido pela largura L , bem como, o material do aço inoxidável em questão totalizando 26 nomenclaturas. Esses estudos estão baseados em estudos acerca do comportamento de ligações aparafusadas ([7], [8], [14], [16]). A Tabela 8 mostra os modelos e estudos paramétricos com dois furos em ordem crescente de valores de e_1 , dividido pela largura L e a diferença dos materiais utilizados, em um total de 40 nomenclaturas, também baseados em estudos prévios.

Tabela 7 – Todos os modelos e casos que serão estudados, com um furo.

	Austenítico				Ferrítico			
	Nomenclaturas	L [mm]	e ₁ [mm]	e ₂ [mm]	Nomenclaturas	L [mm]	e ₁ [mm]	e ₂ [mm]
Um Furo	1F-A-L50-E16.8	50	16,8	25	1F-F-L50-E16.8	50	16,8	25
	1F-A-L50-E18	50	18	25	1F-F-L50-E18	50	18	25
	1F-A-L50-E22	50	22	25	1F-F-L50-E22	50	22	25
	EC-1F-A-L50-E26	50	26	25	EC-1F-F-L50-E26	50	26	25
	1F-A-L50-E32	50	32	25	1F-F-L50-E32	50	32	25
	EC-1F-A-L50-E39	50	39	25	EC-1F-F-L50-E39	50	39	25
	EC-1F-A-L50-E65	50	65	25	EC-1F-F-L50-E65	50	65	25
	1F-A-L90-E16.8	90	16,8	45	1F-F-L90-E16.8	90	16,8	45
	1F-A-L90-E22	90	22	45	1F-F-L90-E22	90	22	45
	EC-1F-A-L90-E26	90	26	45	EC-1F-F-L90-E26	90	26	45
	1F-A-L90-E32	90	32	45	1F-F-L90-E32	90	32	45
	EC-1F-A-L90-E39	90	39	45	EC-1F-F-L90-E39	90	39	45
	EC-1F-A-L90-E65	90	65	45	EC-1F-F-L90-E65	90	65	45

Tabela 8 – Todos os modelos e casos que serão estudados, com dois furos.

	Austenítico				Ferrítico			
	Nomenclaturas	L [mm]	e ₁ [mm]	e ₂ [mm]	Nomenclaturas	L [mm]	e ₁ [mm]	e ₂ [mm]
Dois Furos	EC-2F-A-L26-E22	26	22	13	EC-2F-F-L26-E22	26	22	13
	EC-2F-A-L26-E55	26	55	13	EC-2F-F-L26-E55	26	55	13
	EC-2F-A-L26-E70	26	70	13	EC-2F-F-L26-E70	26	70	13
	EC-2F-A-L35-E22	35	22	17,5	EC-2F-F-L35-E22	35	22	17,5
	EC-2F-A-L35-E55	35	55	17,5	EC-2F-F-L35-E55	35	55	17,5
	EC-2F-A-L35-E70	35	70	17,5	EC-2F-F-L35-E70	35	70	17,5
	2F-A-L50-E22	50	22	25	2F-F-L50-E22	50	22	25
	2F-A-L50-E55	50	55	25	2F-F-L50-E55	50	55	25
	2F-A-L50-E60	50	60	25	2F-F-L50-E60	50	60	25
	2F-A-L50-E70	50	70	25	2F-F-L50-E70	50	70	25
	EC-2F-A-L60-E22	60	22	30	EC-2F-F-L60-E22	60	22	30
	EC-2F-A-L60-E55	60	55	30	EC-2F-F-L60-E55	60	55	30
	EC-2F-A-L60-E70	60	70	30	EC-2F-F-L60-E70	60	70	30
	EC-2F-A-L70-E55	70	55	35	EC-2F-F-L70-E55	70	55	35
	EC-2F-A-L70-E70	70	70	35	EC-2F-F-L70-E70	70	70	35
	EC-2F-A-L80-E55	80	55	40	EC-2F-F-L80-E55	80	55	40
	EC-2F-A-L80-E70	80	70	40	EC-2F-F-L80-E70	80	70	40
	2F-A-L90-E22	90	22	45	2F-F-L90-E22	90	22	45
	2F-A-L90-E55	90	55	45	2F-F-L90-E55	90	55	45
	2F-A-L90-E70	90	70	45	2F-F-L90-E70	90	70	45

2.3. Instrumentação

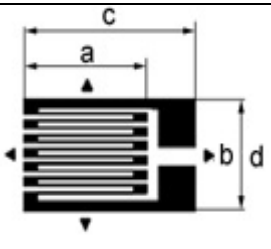
A instrumentação trata de apresentar, detalhar, especificar, entre outros, as ferramentas, máquinas, aparelhos e sistemas que serão utilizados nos ensaios experimentais.

2.3.1. Extensômetros

Extensômetros são sensores formados por fios condutores finos que acusam variação no seu comprimento por meio de variações de sua resistência elétrica, conseguindo assim medir deformações muito pequenas, que corresponde ao caso de elementos estruturais. Serão utilizados os extensômetros da Excel Sensores Indústria e Comercio de Exportação Ltda. [22], que usa em seus materiais um sistema de codificação do nome de seus extensômetros coláveis de resistência elétrica conforme as características dos mesmos.

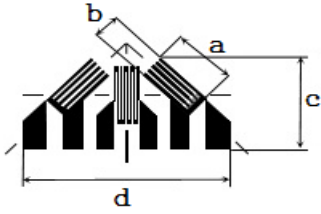
Foram utilizados os extensômetros unidirecionais simples (EXT) nos modelos de menor largura, ou seja, $L = 50$ mm. Este tipo de extensômetro consegue medir dados em uma única direção. Suas características e nomenclatura estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Características dos Extensômetros EXT [22].

	Dimensões [mm]				Fator de Sensibilidade
	Grelha		Total		
	a (Comp.)	b (Larg.)	c (Comp.)	d (Larg.)	
PA-09-250BA-350-LL	3,18	1,52	5,46	1,57	2,11
PA-09-250BA-350-SS	6,35	3,18	9,47	3,18	2,10

Os extensômetros de roseta tripla (ROS) foram aplicados nos modelos de maior largura, ou seja, $L = 90$ mm. Este tipo de extensômetro consegue medir dados em três sentidos distintos. Suas características e nomenclatura estão definidas na Tabela 10.

Tabela 10 – Características dos Extensômetros ROS [22].

	Dimensões [mm]				Fator de Sensibilidade
	Grelha		Total		
	a (Comp.)	b (Larg.)	c (Comp.)	d (Larg.)	
PA-09-125RB-120-LL	3,18	1,60	6,22	12,8	2,12

Para os ensaios experimentais, foram utilizadas as seguintes disposições:

- ROSn-0°: Medirá os dados no sentido de aplicação da carga, sendo esta medição a mais importante.
- ROSn-90°: Medirá os dados no sentido perpendicular à aplicação da carga.
- ROSn-45°: Medirá os dados no ângulo de 45° da aplicação da carga.

2.3.2. LVDT

Transdutor Linear de Deslocamento ou Transformador Diferencial Variável Linear, que em inglês corresponde a *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), é um equipamento eletromecânico usado para transformar movimento retilíneo em uma corrente elétrica variável. São geralmente usados para sistemas de controle automático para medição de deslocamento. O LVDT utilizado nos ensaios realizados é apresentado na Figura 24.

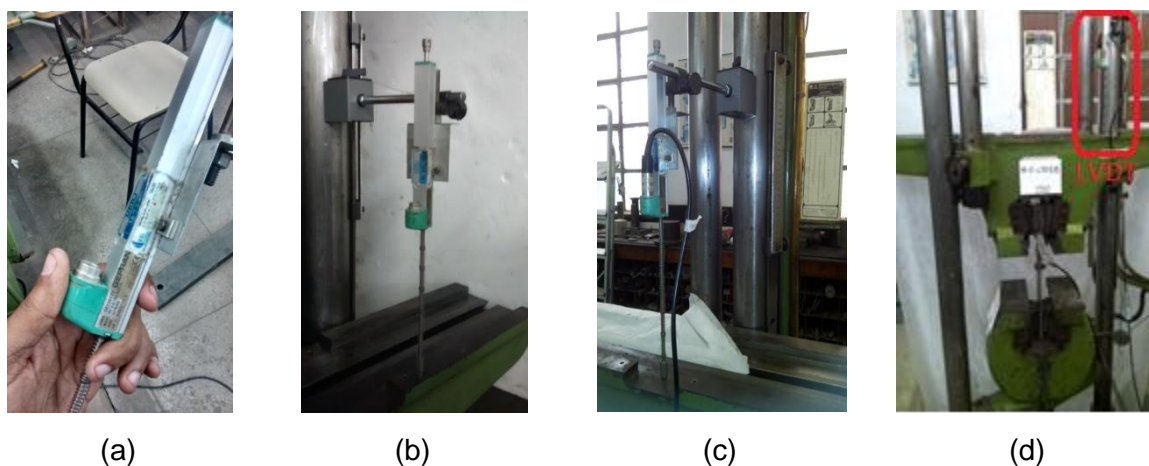


Figura 24 – Detalhe do LVDT.

Nos ensaios, o LVDT está fixado na parte superior da máquina de aplicação de carga, nivelado com alinhamento vertical, de forma a medir apenas o movimento no sentido da aplicação da carga, conforme Figura 24 (b), (c) e (d).

2.3.3. Sistema de aplicação de cargas

Foi utilizado para aplicação da carga nas ligações aparafusadas uma máquina universal de ensaios modelo Lousenhausen de 600kN, conforme a Figura 25 (b). Os canais de entrada do sistema foram atribuídos a um sensor de leitura específico por cabos devidamente identificados.

Após conectar os sensores ao sistema de aquisição de dados, foi posicionada e centralizada a chapa de aço carbono nas garras superiores da máquina. Logo em seguida, a chapa de aço inoxidável foi ligada a esta chapa de carbono, já fixada por meio do uso de parafusos, porcas e arruelas. Com o conjunto montado, fixa-se o conjunto ao equipamento, sendo nas garras inferiores a chapa de aço carbono e nas garras superiores a chapa de aço inoxidável. Após todo o conjunto posicionado, conforme a Figura 25 (a), houve a aplicação de uma pequena carga para garantir o aperto das garras.



(a) Conjunto do primeiro ensaio montado e fixado ao sistema de aplicação de carga.



(b) Máquina universal de ensaios Lousenhausen de 600kN

Figura 25 – Sistema de aplicação de carga.

Para que a leitura inicial do sistema fosse zero, os extensômetros e o transdutor de deslocamento linear, foram calibrados antes do início de cada ensaio, de forma a evitar ruídos na leitura.

2.3.4. Aquisição de dados

Para a aquisição dos dados foi utilizado o amplificador universal QuantumX MX1601B da empresa HBM *Test and Measurement*. A leitura dos dados era feita de forma automática a medida que a carga e deformações tivessem variação, durante o decorrer do ensaio. O módulo utilizado é apresentado na Figura 26.



Figura 26 – Modulo amplificador universal QuantumX MX1601B.

Desta forma, era feita a conversão entre os valores obtidos pelo transdutor de pressão em termos de carregamento, as medições dos extensômetros em deformações e os deslocamentos medidos no LVDT. O programa fornecia gráficos de carga *versus* deslocamento e carga *versus* deformação dos sensores durante a aplicação de carga nos ensaios, de forma a permitir visualizar durante a realização possíveis desvios a serem corrigidos.

2.4. Caracterização das ligações aparafusadas

Foram utilizados parafusos de aço carbono ASTM A325 M12 cl.8.8, de ½ polegada de diâmetro, que garante resistência suficiente para que não ocorra o corte no parafuso, sendo possível assim analisar somente os efeitos do ensaio a tração nas chapas de aço. O uso de arruelas junto à porca, pelo lado da chapa base, para ajuste

da ligação, sem aplicação de valores específicos de torque ou protensão durante o aperto dos parafusos, foi realizado para minimizar o efeito de atrito no resultado final das cargas de ruptura. A Figura 27 mostra alguns dados do parafuso, arruela e porca utilizados nas análises dos modelos.

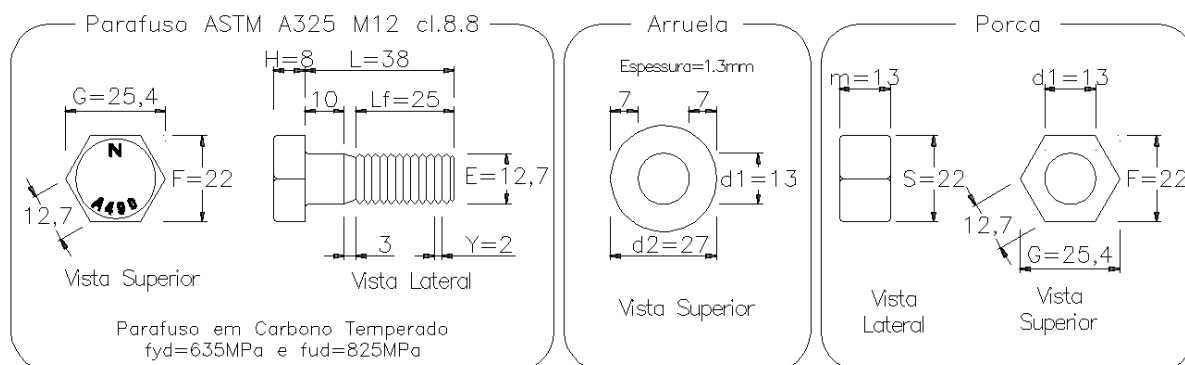


Figura 27 – Dados geométrico do parafuso, arruela e porca (em milímetros).

As características do parafuso escolhido foram calculadas pela norma europeia EN 1993-1-8 [11], apresentando resultados superiores aos esperados para a carga última do ensaio. Porém, em alguns casos, chegaram a atingir seus valores de resistência ($F_{v,Rd}$), sem no entanto, romperem, sofrendo assim as deformações plásticas no corpo do parafuso, sem atingir a ruptura do mesmo.

A Figura 28 mostra o conjunto de parafuso, porca e arruela em dois momentos: indeformada (a), e depois deformada (b). Para o prosseguimento dos ensaios, todos os parafusos que apresentaram a configuração da Figura 28 (b), indicando a deformação do mesmo e o atingimento da resistência, $F_{v,Rd}$, foram substituídos, não sendo novamente empregados.



(a) Conjunto indeformado



(b) Conjunto deformado

Figura 28 – Conjunto de parafuso, porca e arruela, depois do ensaio.

As chapas de aço inoxidável foram compradas na empresa Açotubo Aços Inoxidáveis e os modelos ensaiados foram preparados na metalúrgica METALFENAS. As chapas foram cortadas com utilização de uma guilhotina digital, com as medidas de corte inseridas no computador, sendo feita de forma automatizada, com precisão de ± 1 mm. Portanto, para utilização das recomendações sugeridas pela NBR8800 [23], item 6.3.12, este trabalho adotará suas bordas cortadas com serra ou tesoura.

Os furos na chapa foram executados com broca para aço com 13 mm de diâmetro utilizando os equipamentos do laboratório de mecânica da UERJ, unidade Fonseca Telles (Figura 29). Porém é importante ressaltar que, como existe imprecisões de ± 1 mm, este trabalho adotará o pior caso, que é se o furo final ficasse com $d_0 = 14$ mm. Tal fato considerará a diminuição da área da seção efetiva e, por conseguinte, a sua resistência na seção líquida. Porém, essa alteração se dará apenas na hora de definir o parâmetro e_1 , recomendado pela norma europeia, que seria $e_1 = 1,2 \times d_0$. Desta forma, foi utilizado $e_{1,EC3(d_0=14\text{mm})} = 16,8$ mm, mesmo que para o diâmetro do furo previsto de 13 mm este valor seria de $e_{1,EC3(d_0=13\text{mm})} = 15,6$ mm. Esta consideração influencia na resistência entre borda e parafuso, porém o modo de falha seria o mesmo para os casos em estudo, que tem espessura de 3 mm e larguras de 50 mm e 90 mm.



Figura 29 – Máquina utilizada para fazer os furos.

Foi considerado o uso de chapa base (cb) de aço carbono com espessura e geometria que garantisse resistência suficiente ao sistema, de forma que não ocorresse o escoamento da área bruta nem a ruptura na área líquida dessa chapa

durante o ensaio, sendo assim possível analisar apenas os efeitos relacionados a chapa de aço inoxidável.

A chapa base tem como propriedades: $E_{cb} = 210 \text{ GPa}$, $f_{ycb} = 943 \text{ MPa}$, $f_{ucb}=1160\text{MPa}$. A geometria é detalhada na Figura 30 e na Tabela 11, juntamente com suas respectivas resistências e modo de falhas.

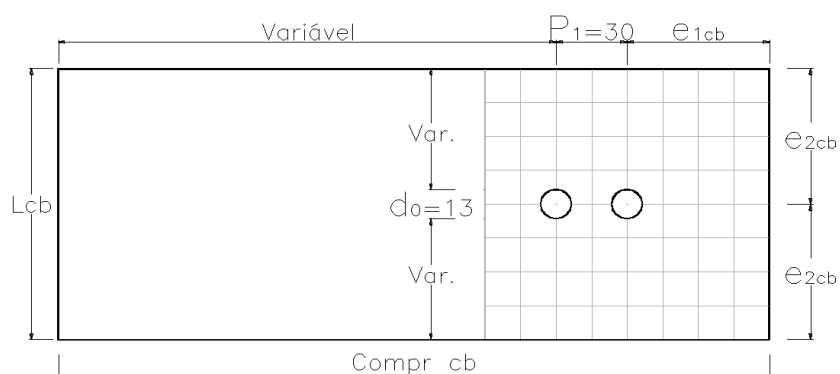


Figura 30 – Dados geométrico das chapas base, em milímetros.

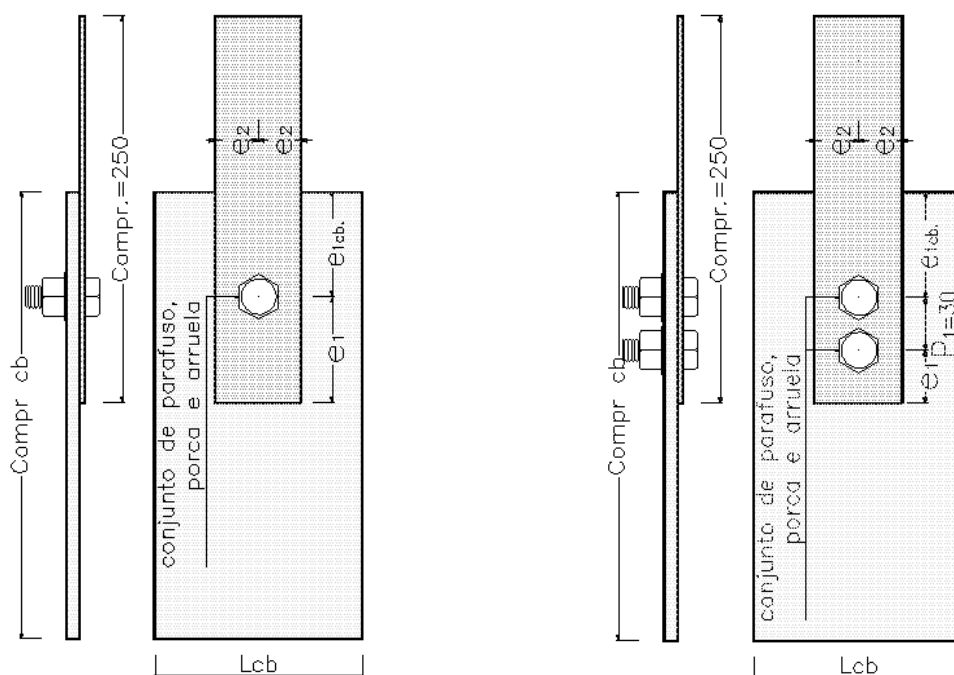
Tabela 11 – Características das chapas base.

Tipo	Compr. cb [mm]	Variável [mm]	Lcb [mm]	e1cb [mm]	e2cb [mm]	tcb [mm]	$N_{t,Rd}$ [kN]	Modo de Falha
1cb	300	210	120	60	60	6,5	200,41	B
2cb	300	210	120	60	60	13	400,82	B
3cb	400	300	120	70	60	9	277,49	B

As características do aço carbono escolhido para ser usado como chapa base, apresenta resistência satisfatória, segundo a norma europeia, EN 1993-1-4 [9]. A escolha considerou que para os ensaios em que serão submetidos essas chapas, as mesmas não deverão ultrapassar seu regime elástico. Então para garantir esse comportamento, será adotada mais de uma chapa base.

Portanto, os tipos de chapa base terão modo de falha B, isto é, está previsto que a carga referente a ruptura desta chapa aconteça devido ao esmagamento da parte final entre a borda e o furo, segundo EN 1993-1-4 [9].

Na Figura 31 ilustra-se os conjuntos das ligações aparafusadas ensaiadas a tração, para placas com um furo (Figura 31(a)) e placas com dois furos (Figura 31(b)), respectivamente. Estes conjuntos são constituídos basicamente pela placa de aço inoxidável em estudo e pela chapa base, unidas pelo conjunto de parafuso, porca e arruela.



(a) Conjunto da ligação aparafusada ensaiada com um furo

(b) Conjunto da ligação aparafusada ensaiada com dois furos

Figura 31 – Conjunto da ligação aparafusada ensaiada com um furo.

2.5. Dificuldades na preparação dos ensaios

Não foi possível instrumentar todos os ensaios com extensômetros, devido ao elevado custo que isto geraria. Tais pontos não inviabilizaram a execução e os resultados obtidos, porém foram fatores limitadores para uma pesquisa mais ampla.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais dos modelos ensaiados em laboratório. Como citado no capítulo anterior, todos os modelos têm a espessura de 3 mm. Os modelos têm 250 mm de comprimento, com detalhes dos parâmetros geométricos apresentados na Tabela 12, referente aos ensaios de um furo e a Tabela 15 para os de dois furos.

Para efeito de comparação dos resultados, a Tabela 23 apresenta os resultados obtidos a partir da EN 1993-1-4 [9], bem como, os valores de carga última das análises experimentais e numéricas.

3.1. Modelos com um furo

Seguem as análises dos resultados experimentais dos modelos com um furo, cujo objetivo era avaliar até que valor de e_1 e L ocorre ou o rasgamento da chapa (modo de falha B) ou o esmagamento da chapa (modo de falha C), bem como, quando são observados os efeitos de segunda ordem relacionados ao efeito *curling*.

A Figura 32 ilustra um esquema de modelo com um furo e a Tabela 12 mostra todos os casos que serão estudados neste subitem.

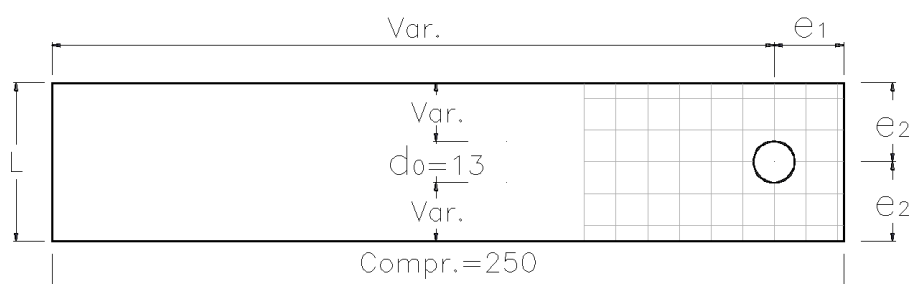


Figura 32 – Esquema das placas para modelo de um furo, em milímetros.

Tabela 12 – Dados geométricos dos modelos de um furo.

		L	t	e ₁	e ₂	Modelos
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
1 FURO	AUSTENÍTICO	50,00	3,00	16,80	25,00	1F-A-L50-E16,8
		50,00	3,00	18,00	25,00	1F-A-L50-E18
		50,00	3,00	22,00	25,00	1F-A-L50-E22
		50,00	3,00	32,00	25,00	1F-A-L50-E32
		90,00	3,00	16,80	45,00	1F-A-L90-E16,8
		90,00	3,00	22,00	45,00	1F-A-L90-E22
		90,00	3,00	32,00	45,00	1F-A-L90-E32
	FERRÍTICO	50,00	3,00	16,80	25,00	1F-F-L50-E16,8
		50,00	3,00	18,00	25,00	1F-F-L50-E18
		50,00	3,00	22,00	25,00	1F-F-L50-E22
		50,00	3,00	32,00	25,00	1F-F-L50-E32
		90,00	3,00	16,80	45,00	1F-F-L90-E16,8
		90,00	3,00	22,00	45,00	1F-F-L90-E22
		90,00	3,00	32,00	45,00	1F-F-L90-E32

3.1.1. Austenítico

A Tabela 13 mostra os resultados dos ensaios experimentais dos modelos com um furo austenítico. No Gráfico 5 são apresentados os resultados dos ensaios com um furo do material austenítico e largura de 50 mm (1F-A-L50).

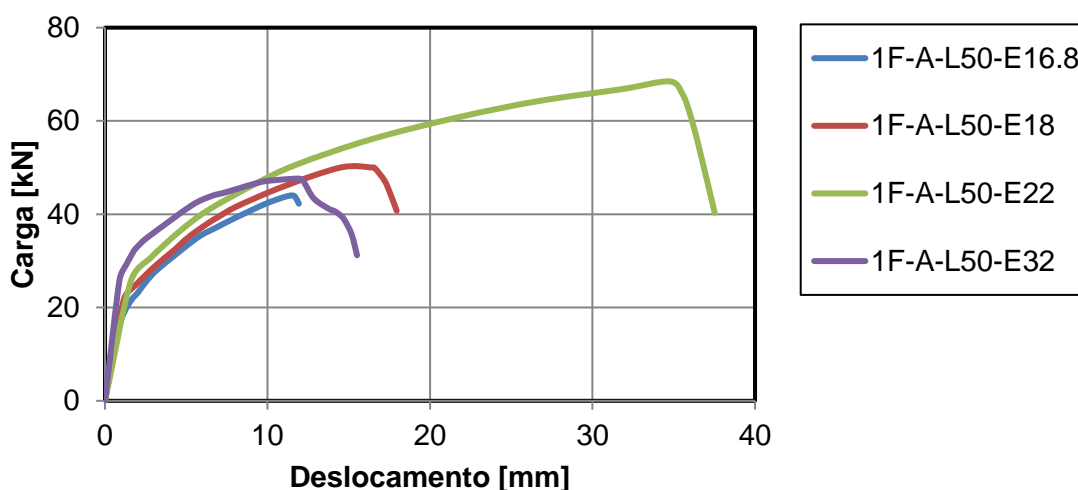
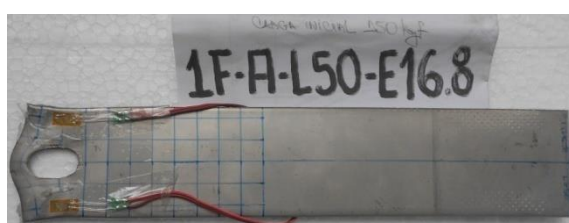


Gráfico 5 – Carga versus deslocamento, modelos com 1F-A-L50.

No Gráfico 5, os ensaios com e₁ = 16,8 mm e e₁ = 18 mm sofrem mesmo modo de falha de rasgamento da chapa (modo B), fato esperado, pois estes são os valores

mínimos de e_1 , conforme mostra Figura 33 (a) e (b), respectivamente. Para o valor de $e_1 = 22$ mm ocorre o modo de falha por esmagamento da chapa (modo C). Porém, já aparece rasgamento da seção líquida (modo A) e um princípio de efeito *curling* ao final do ensaio. Assim, o valor de $e_1 = 22$ mm foi escolhido como limite para a mudança de modo de falha, conforme mostra a Figura 33 (c). Os ensaios com $e_1 = 32$ mm primeiramente teve o modo de falha por esmagamento da chapa (modo C), porém ao seu final configurou-se pelo rasgamento na seção líquida (modo A), conforme mostra Figura 33 (d), mesmo com a ocorrência do efeito *curling*.

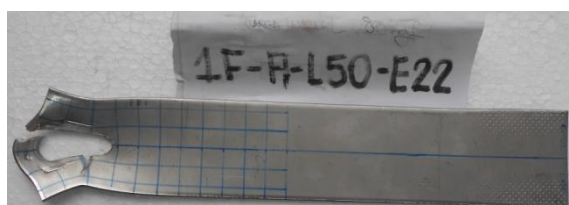
A divergência de resistência entre o modelo 1F-A-L50-E22 para os demais pode ter ocorrido porque o valor de e_1 representa o limite entre a mudança dos modos de falha (modo A e modo B).



(a) Modelo 1F-A-L50-E16.8



(b) Modelo 1F-A-L50-E18



(c) Modelo 1F-A-L50-E22



(d) Modelo 1F-A-L50-E32

Figura 33 – Modelos experimentais 1F-A-L50.

No Gráfico 6 estão presentes os resultados dos ensaios com um furo do material austenítico e largura de 90 mm (1F-A-L90). Observa-se que o ensaio com $e_1 = 16,8$ mm sofre modo de falha de rasgamento na chapa (modo B), que é esperado pois este corresponde ao valor mínimo para tal falha, conforme mostra Figura 34 (a). Para o valor de $e_1 = 22$ mm a chapa continuou sofrendo o mesmo modo de falha de

rasgamento (modo B), porém é observado um princípio de efeito *curling* nas bordas, apesar deste fato não trazer mudanças na resistência no ensaio, sendo representado o ensaio na Figura 34 (b).

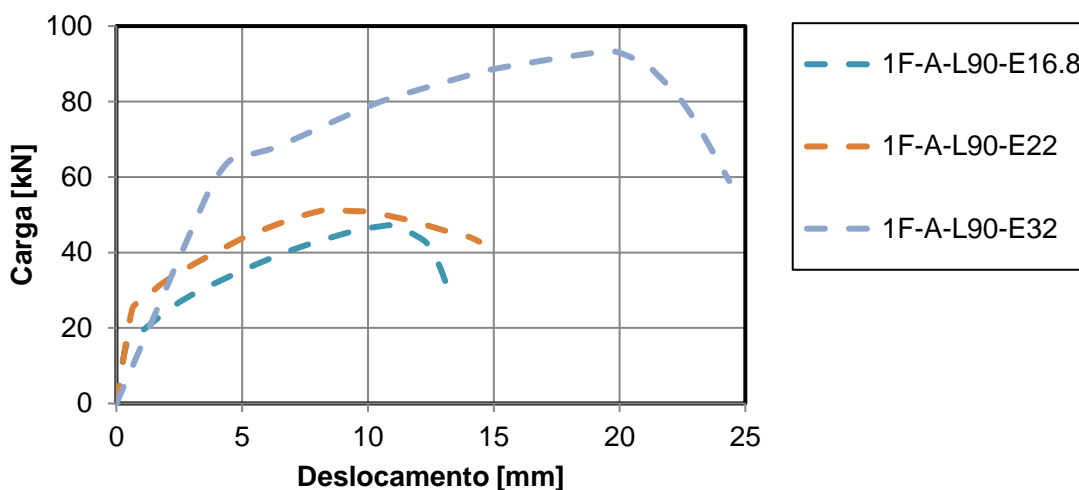


Gráfico 6 – Carga versus deslocamento, modelos com 1F-A-L90.

No Gráfico 6, os ensaios com $e_1 = 32$ mm tem o modo de falha de esmagamento da chapa (modo C), conforme mostra a Figura 34 (c). Porém, pode-se notar a ocorrência do efeito *curling* desde início do comportamento plástico.

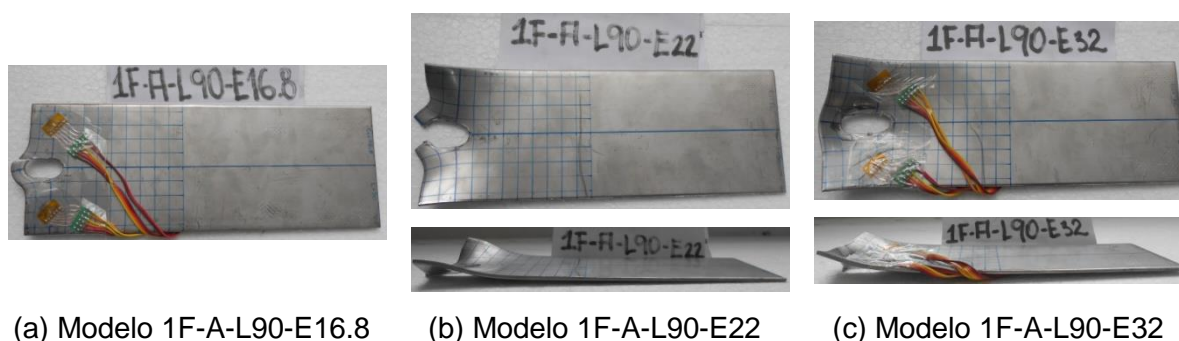


Figura 34 – Modelos experimentais 1F-A-L90.

O Gráfico 6 mostra para seus dois primeiros modelos, referentes as Figura 34 (a) e (b), curvas bem proporcionais com mesma inclinação do trecho inicial (comportamento elástico), pois, apesar do segundo (1F-A-L90-E22) ter tido um princípio de *curling* nas bordas, esse efeito não influenciou no modo de falha (modo

B). Já o modelo da Figura 34 (c) teve uma inclinação inicial totalmente diferente, com seu efeito *curling* mais bem definido.

Tabela 13 – Resistência dos modelos com um furo, austenítico.

Modelos	Análise Experimental		Modo da Ruptura
	$F_{u,exp}$ [kN]	$\delta_{u,exp}$ [mm]	
1F-A-L50-E16.8	44,02	11,55	Modo B - s/ <i>Curling</i>
1F-A-L50-E18	50,31	15,51	Modo B - s/ <i>Curling</i>
1F-A-L50-E22	68,47	34,75	Modo C - c/ <i>Curling</i>
1F-A-L50-E32	47,65	11,80	Modo C - c/ <i>Curling</i>
1F-A-L90-E16.8	46,96	11,09	Modo B - s/ <i>Curling</i>
1F-A-L90-E22	51,47	8,44	Modo B - c/ <i>Curling</i>
1F-A-L90-E32	93,07	19,94	Modo C - c/ <i>Curling</i>

3.1.2. Ferrítico

A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios experimentais dos modelos com um furo ferrítico, e no Gráfico 7 estão presentes os resultados dos ensaios com um furo do material ferrítico e largura de 50mm (1F-F-L50).

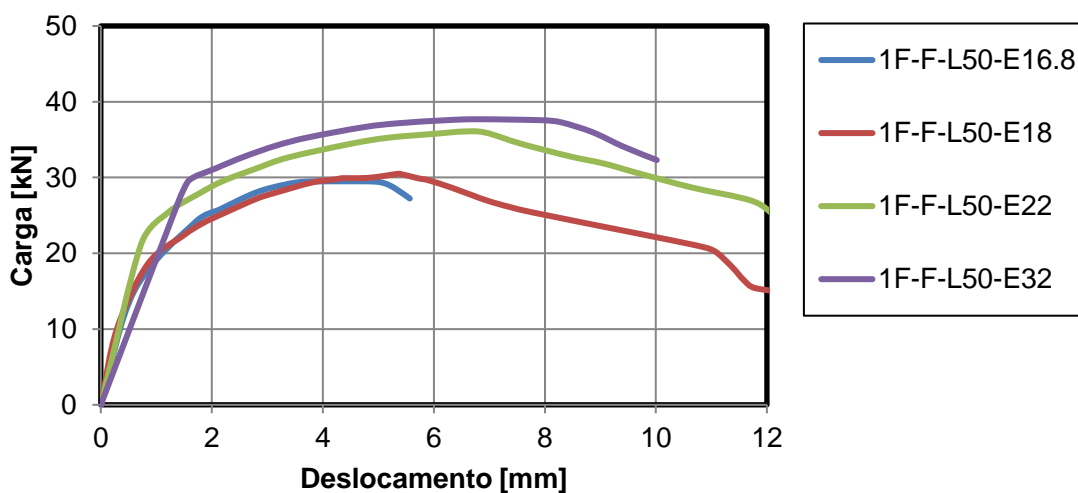
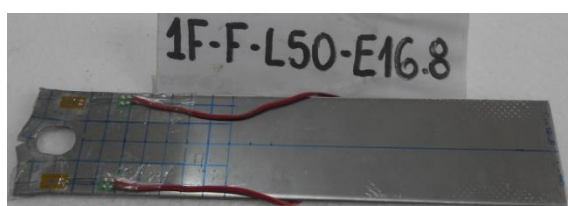


Gráfico 7 – Carga versus deslocamento, modelos com 1F-F-L50.

No Gráfico 7, os ensaios com $e_1=16,8\text{mm}$ e $e_1=18\text{mm}$ sofrem mesmo modo de falha de rasgamento da chapa (modo B), que é esperado, pois estes são os valores mínimos de parâmetro e_1 , conforme mostra Figura 35 (a) e (b), respectivamente. Esses modelos tem trecho inicial com mesma inclinação. Ainda para o valor de $e_1=22\text{mm}$, o ensaio permaneceu sofrendo o mesmo modo de falha de rasgamento da chapa (modo B), porém, já aparece um princípio de rasgamento da seção líquida (modo A), sendo esta variação já esperado, pois esse valor de $e_1=22\text{ mm}$ foi escolhido por representar o limite para a mudança de modo de falha. A Figura 35 (c) mostra que não tem o modo de falha tão claro, o que torna seu trecho inicial diferente dos dois primeiros modelos. O ensaio com $e_1=32\text{mm}$ tem o modo de falha de esmagamento da chapa (modo C) mesmo que ao seu final tenha ocorrido o rasgamento da seção líquida (modo A). Esse modelo, corresponde ao ensaio 1F-F-L50-E32, tem modo de falha totalmente diferente dos demais, possuindo assim um trecho inicial bem diferente de todos os demais ensaios, conforme mostra Figura 35 (d), mesmo com a ocorrência do efeito *curling*.



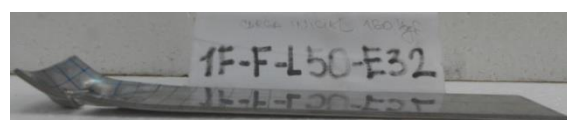
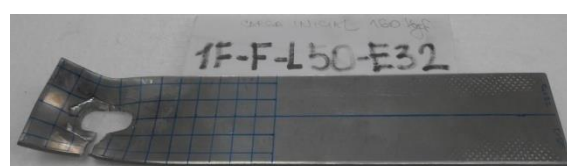
(a) Modelo 1F-F-L50-E16.8



(b) Modelo 1F-F-L50-E18



(c) Modelo 1F-F-L50-22



(d) Modelo 1F-F-L50-E32

Figura 35 – Modelos experimentais 1F-F-L50.

O Gráfico 7 mostra curvas carga *versus* deslocamento com comportamento proporcional, isto é, com o aumento do valor de e_1 aumenta o valor de resistência última. Porém, observa-se as alterações no trecho do comportamento elástico. No Gráfico 8, estão presentes os resultados dos ensaios com um furo do material ferrítico e largura de 90 mm (1F-F-L90).

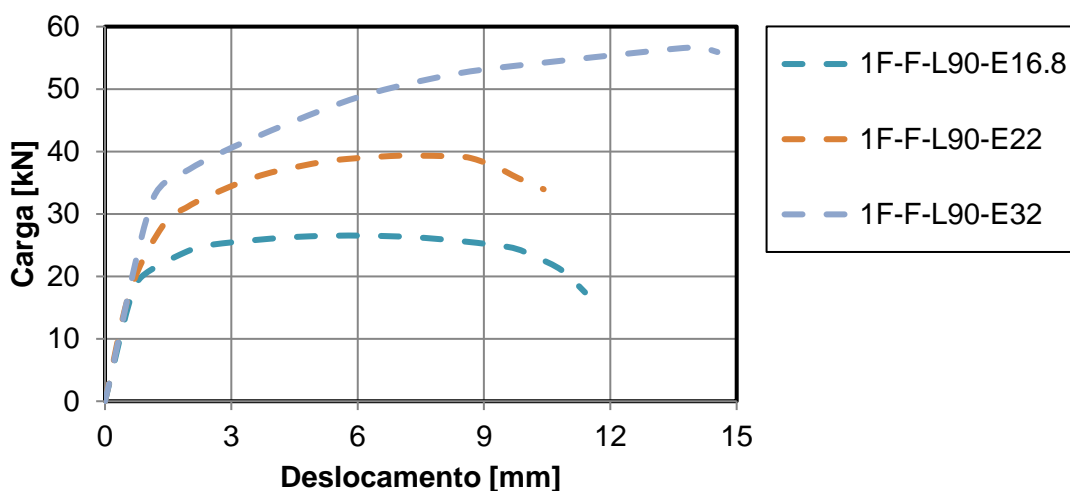
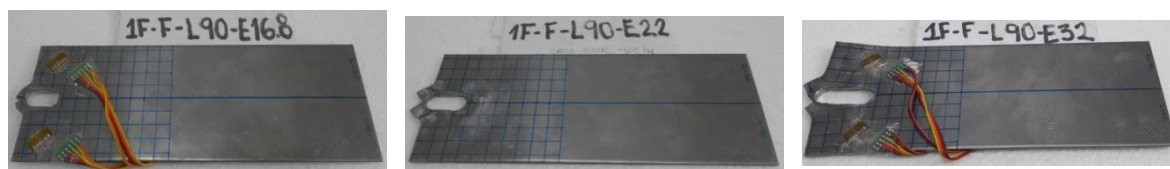


Gráfico 8 – Carga versus deslocamento, modelos com 1F-F-L90.

No Gráfico 8, o ensaio com $e_1 = 16,8\text{mm}$ sofre modo de falha de rasgamento na chapa (modo B), que por ser o valor mínimo para essa falha era esperado, conforme mostra Figura 36 (a). Ainda para o valor de $e_1 = 22\text{ mm}$ observou-se o mesmo modo de falha de rasgamento da chapa (modo B), conforme mostra Figura 36 (b). O ensaio com $e_1 = 32\text{ mm}$ permaneceu com o modo de falha B, conforme mostra Figura 36 (c).



(a) Modelo 1F-F-L90-E16.8 (b) Modelo 1F-F-L90-E22 (c) Modelo 1F-F-L90-E32

Figura 36 – Modelos experimentais 1F-F-L90.

O Gráfico 8 mostra curvas proporcionais carga *versus* deformação, isto é, com o aumento do valor de e_1 aumenta o valor de resistência última, mas o trecho de comportamento elástico tem praticamente a mesma inclinação. Isso se dá pelo fato dos modelos da Figura 36 terem o mesmo modo de falha (modo B), sem a ocorrência de efeito *curling*.

Tabela 14 – Resistência dos modelos com um furo, ferrítico.

Modelos	Análise Experimental		Modo da Ruptura
	$F_{u,exp}$ [kN]	$\delta_{u,exp}$ [mm]	
1F-F-L50-E16,8	29,50	4,60	Modo B - s/ <i>Curling</i>
1F-F-L50-E18	30,46	5,40	Modo B - s/ <i>Curling</i>
1F-F-L50-E22	36,07	6,54	Modo B - s/ <i>Curling</i>
1F-F-L50-E32	37,69	6,80	Modo C - c/ <i>Curling</i>
1F-F-L90-E16,8	26,42	4,88	Modo B - s/ <i>Curling</i>
1F-F-L90-E22	39,34	7,20	Modo B - s/ <i>Curling</i>
1F-F-L90-E32	56,64	13,89	Modo B - s/ <i>Curling</i>

3.2. Modelos com dois furos

Analisando os modelos com dois furos, onde se procurou analisar os limites de valor de e_1 e L para a ocorrência de rasgamento da seção líquida (modo de falha A) ou a ruptura em bloco (modo de falha F), bem como, o possível aparecimento dos efeitos de segunda ordem referentes ao efeito *curling*, a Figura 37 ilustra esquema do modelo com dois furos e a Tabela 15 mostra todos os casos que serão estudados neste subitem.

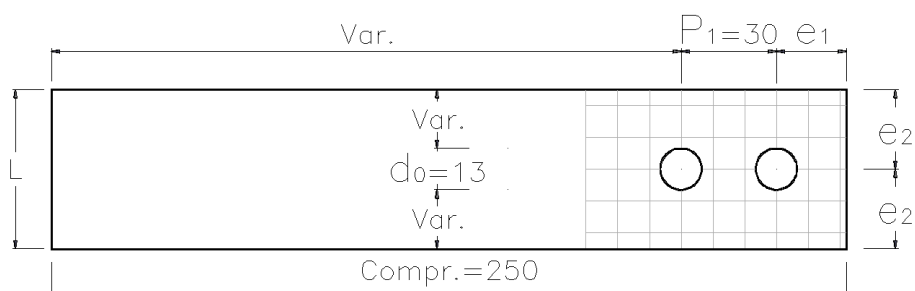


Figura 37 – Esquema das placas para modelo de dois furos, em milímetros.

Tabela 15 – Dados geométricos dos modelos de dois furos.

		L [mm]	t [mm]	e ₁ [mm]	e ₂ [mm]	Modelos
2 FURO	AUSTENÍTICO	50,00	3,00	22,00	25,00	2F-A-L50-E22
		50,00	3,00	55,00	25,00	2F-A-L50-E55
		50,00	3,00	60,00	25,00	2F-A-L50-E60
		50,00	3,00	70,00	25,00	2F-A-L50-E70
		90,00	3,00	22,00	45,00	2F-A-L90-E22
		90,00	3,00	55,00	45,00	2F-A-L90-E55
		90,00	3,00	70,00	45,00	2F-A-L90-E70
	FERRÍTICO	50,00	3,00	22,00	25,00	2F-F-L50-E22
		50,00	3,00	55,00	25,00	2F-F-L50-E55
		50,00	3,00	60,00	25,00	2F-F-L50-E60
		50,00	3,00	70,00	25,00	2F-F-L50-E70
		90,00	3,00	22,00	45,00	2F-F-L90-E22
		90,00	3,00	55,00	45,00	2F-F-L90-E55
		90,00	3,00	70,00	45,00	2F-F-L90-E70

3.2.1. Austenítico

Na Tabela 16 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais dos modelos com dois furos austenítico. No Gráfico 9 estão presentes os resultados dos ensaios com dois furos do material austenítico e largura de 50 mm (2F-A-L50).

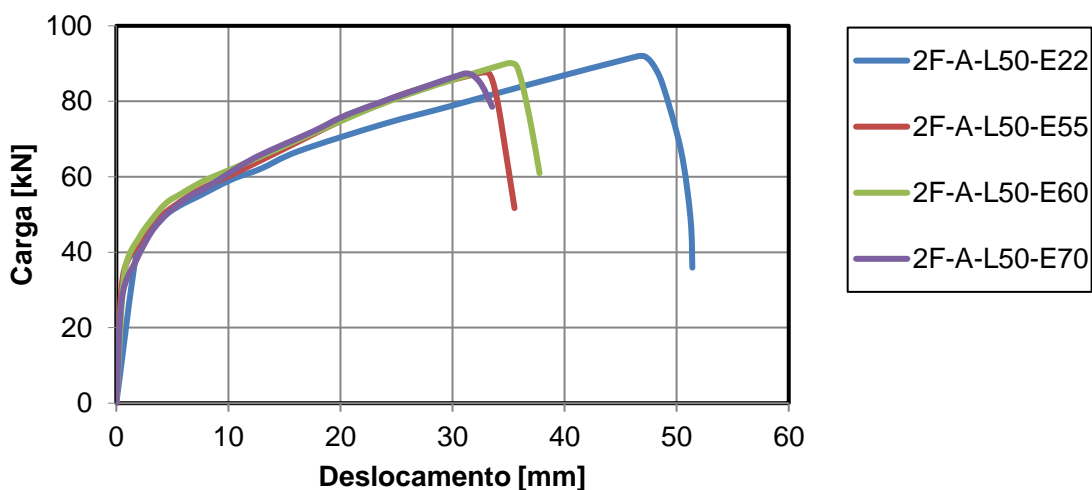


Gráfico 9 – Carga versus deslocamento, modelos com 2F-A-L50.

No Gráfico 9 é possível observar uma tendência de valores de resistência última e pequena diferença nos deslocamentos destas cargas últimas. Todos os modelos da Figura 38 apresentam o mesmo modo de falha de rasgamento da seção líquida (modo A), porém apenas nos modelos 2F-A-L50-E60 e 2F-A-L50-E70 foram observados o efeito *curling*.

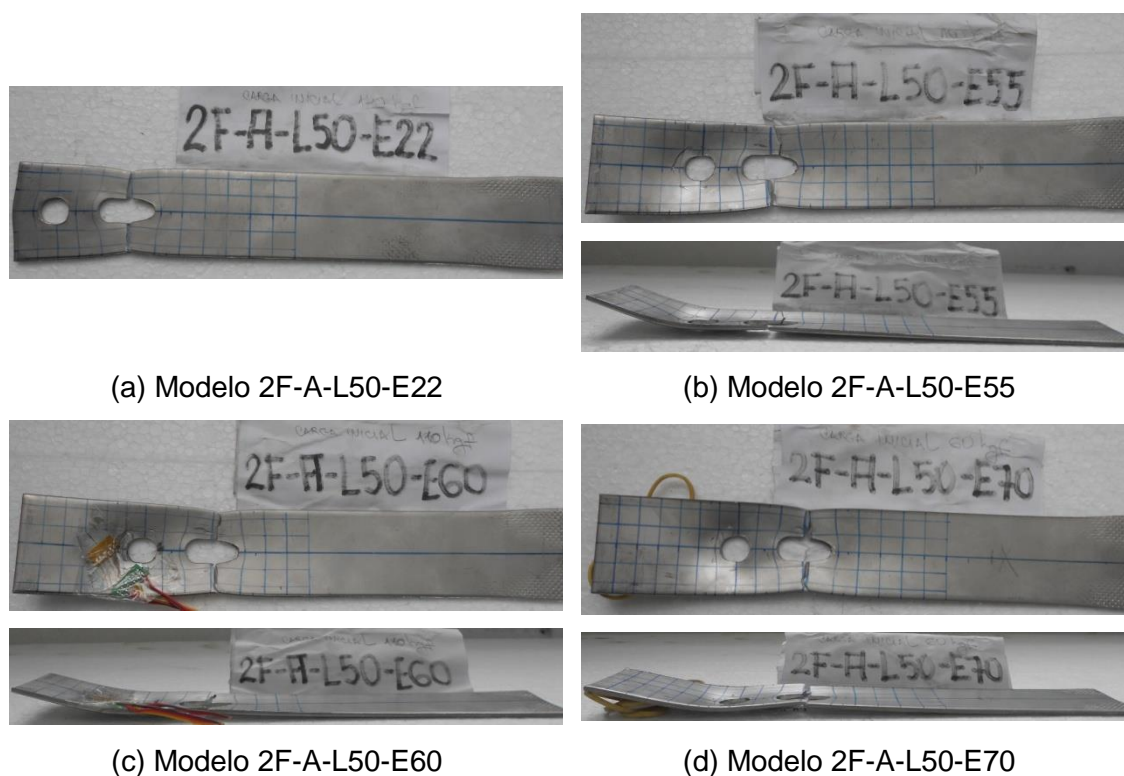


Figura 38 – Modelos experimentais 2F-A-L50.

O Gráfico 9 apresentou valores de resistência última bem próximas pelo fato do modo de falha dos modelos da Figura 38 ser o mesmo (modo A). Este fato ocorre devido a seção líquida dos modelos apresentarem o mesmo valor ($A_{net} = 111\text{mm}^2$).

No Gráfico 10, estão presentes os resultados dos ensaios com dois furos do material austenítico e largura de 90 mm (2F-A-L90). Observa-se no Gráfico 10 que o ensaio com $e_1 = 22$ mm sofre modo de falha de ruptura em bloco (modo F), conforme mostra Figura 39 (a), mesmo com um princípio de efeito *curling* no final do ensaio. Já para os valores de $e_1 = 55$ mm (Figura 39 (b)) e $e_1 = 70$ mm (Figura 39 (c)), ambos sofreram o modo de falha de rasgamento da seção líquida (modo A), mas agora com ocorrência de efeito *curling* mais evidente. Esse efeito ocorreu desde o início da parte plástica do Gráfico 10.

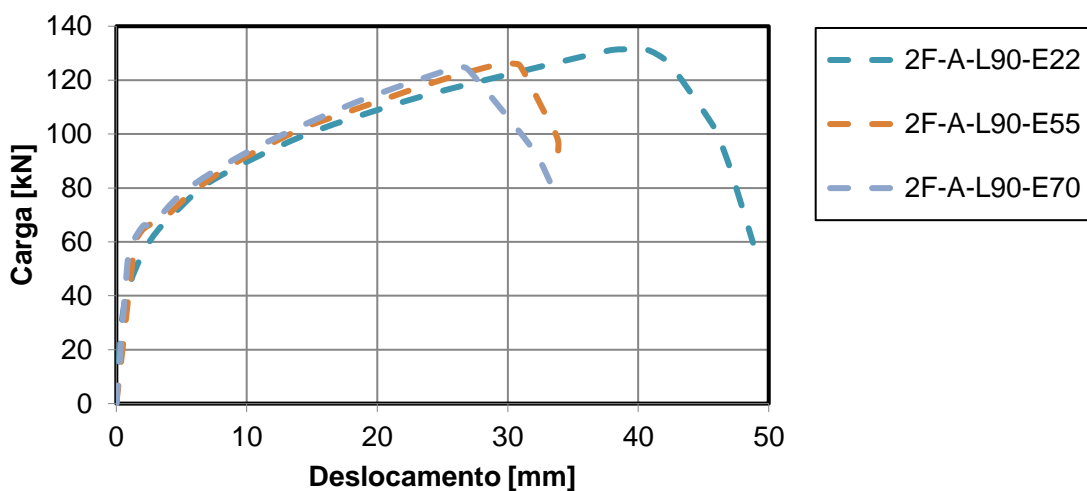


Gráfico 10 – Carga versus deslocamento, modelos com 2F-A-L90.

Neste Gráfico 10, a curva do modelo 2F-A-L90-E22 destoa das demais pelo fato de ter tido o modo de falha de ruptura em bloco (modo F). Já as outras duas, das Figura 39 (b) e Figura 39 (c), tiveram valores mais próximos, devido a terem o mesmo modo de falha (modo A) e a mesmo valor de seção líquida ($A_{net} = 231 \text{ mm}^2$).

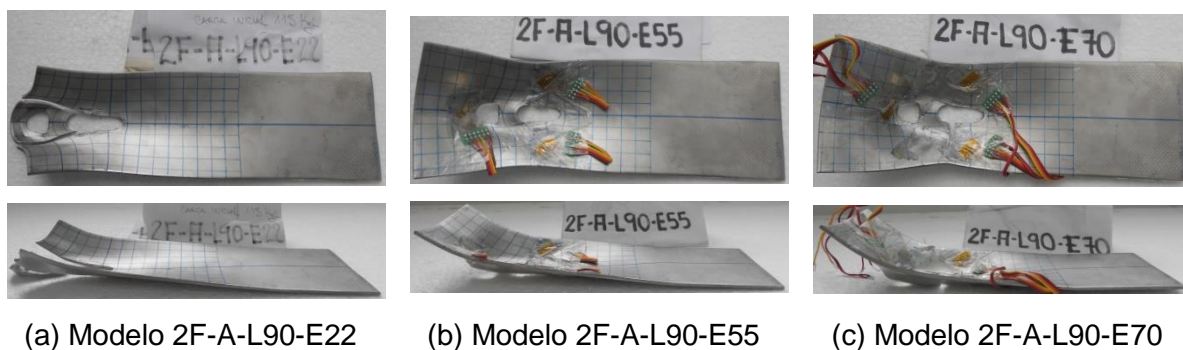


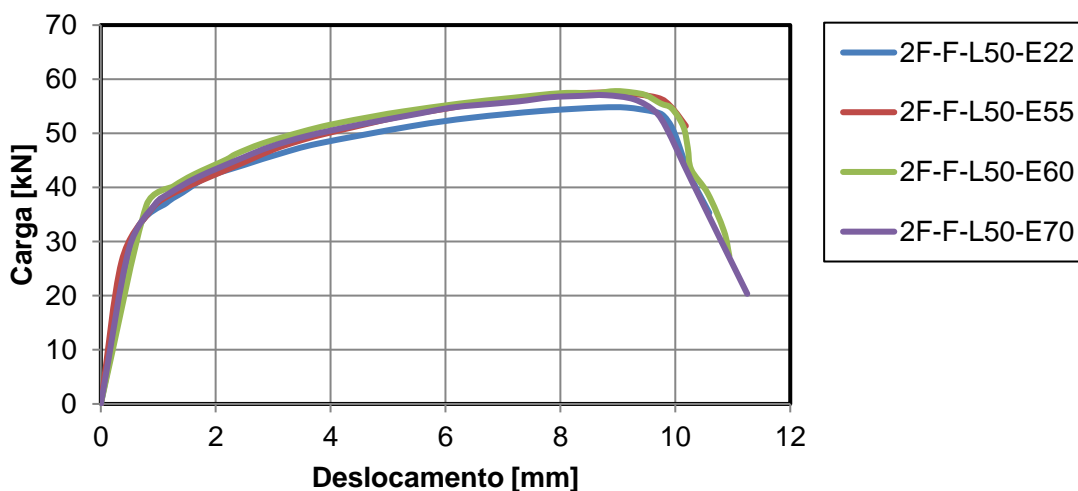
Figura 39 – Modelos experimentais 2F-A-L90.

Tabela 16 – Resistência dos modelos com dois furos, austenítico.

Modelos	Análise Experimental		Modo da Ruptura
	Fu,exp [kN]	$\delta u,exp$ [mm]	
2F-A-L50-E22	91,94	47,11	Modo A - s/Curling
2F-A-L50-E55	87,68	33,13	Modo A - c/Curling
2F-A-L50-E60	90,04	34,87	Modo A - c/Curling
2F-A-L50-E70	87,28	30,97	Modo A - c/Curling
2F-A-L90-E22	131,00	39,28	Modo F - c/Curling
2F-A-L90-E55	126,20	29,91	Modo A - c/Curling
2F-A-L90-E70	124,93	26,49	Modo A - c/Curling

3.2.2. Ferrítico

A Tabela 17 mostra os resultados dos ensaios experimentais dos modelos com dois furos ferrítico. No Gráfico 11 estão presentes os resultados dos ensaios com dois furos do material ferrítico e largura de 50 mm (2F-F-L50).

**Gráfico 11 – Carga versus deslocamento, modelos com 2F-F-L50.**

No Gráfico 11, os ensaios com $e_1 = 22$ mm, $e_1 = 55$ mm, $e_1 = 60$ mm e $e_1 = 70$ mm sofrem mesmo modo de falha de rasgamento na seção líquida (modo A), sem ocorrência de efeito *curling*, conforme mostra Figura 40.

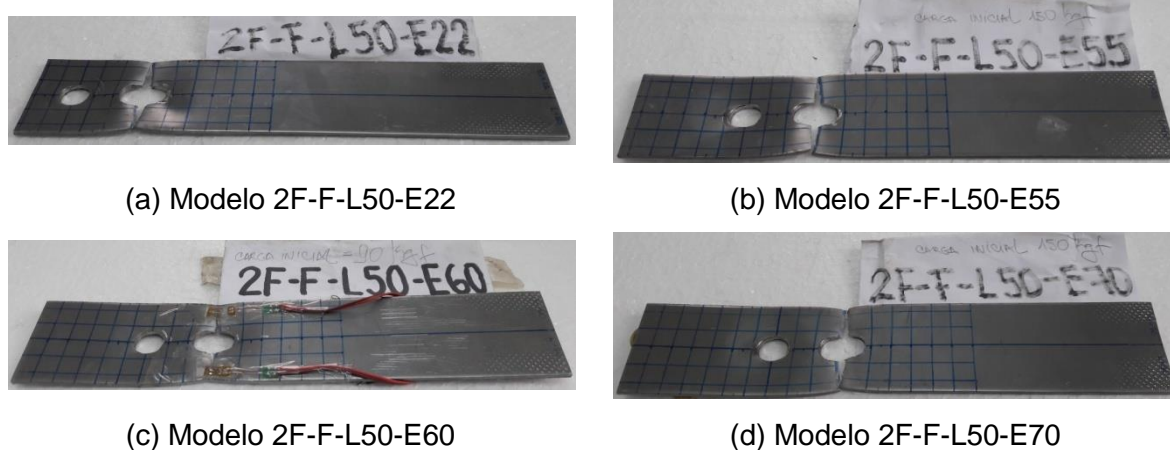


Figura 40 – Modelos experimentais 2F-F-L50.

O Gráfico 11 apresenta curvas carga *versus* deslocamento bem semelhantes, com valores de resistência última bem próximas, pelo fato do modo de falha dos modelos da Figura 40 terem sido para todos os ensaios o mesmo (modo A) e sem ocorrência de efeito *curling*. Para estes casos, a seção líquida possui os mesmo valores ($A_{net} = 111\text{mm}^2$). No Gráfico 12 estão presentes os resultados dos ensaios com um furo do material ferrítico e largura de 90 mm (12F-F-L90).

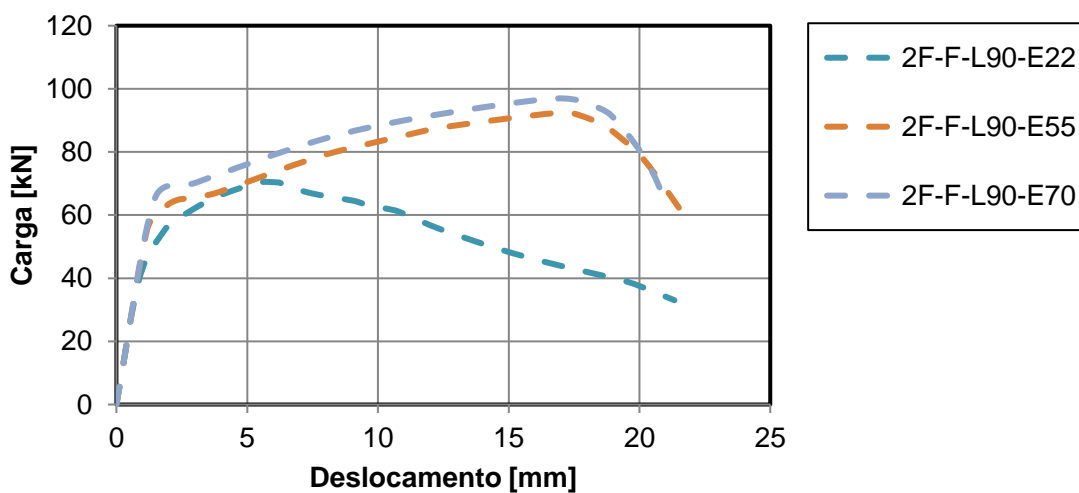


Gráfico 12 – Carga *versus* deslocamento, modelos com 2F-F-L90.

No Gráfico 12, o ensaio com $e_1 = 22$ mm sofre modo de falha de rasgamento na chapa (modo B), porém aparece também um rasgamento da seção líquida (modo A), sem que haja qualquer evidência de efeito *curling*, conforme mostra Figura 41 (a).

Então para o modelo 2F-F-L90-E22 a parte da curva referente ao comportamento plástico não está tão evidente.

Já para o valor de $e_1 = 55\text{mm}$ ocorreu o modo de falha de rasgamento da seção líquida (modo A), com efeito *curling*, conforme mostra Figura 41 (b), fato semelhante ocorreu no ensaio com $e_1 = 70\text{ mm}$, apresentado na Figura 41 (c). Então para os dois últimos modelos (2F-F-L90-E55 e 2F-F-L90-E70) tiveram suas curvas semelhantes, tanto pelo fato da ocorrência do efeito *curling* quanto pela capacidade de carga última que está relacionado em ter o mesmo modo de falha (modo A) e mesmo valor de seção líquida ($A_{\text{net}} = 231\text{ mm}^2$).

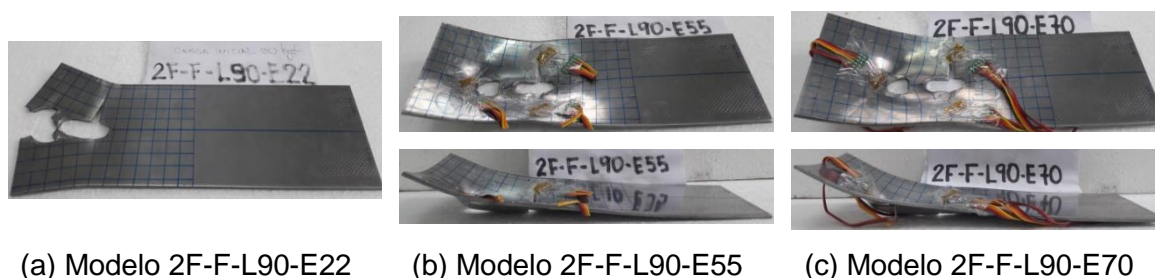


Figura 41 – Modelos experimentais 2F-F-L90.

Tabela 17 – Resistência dos modelos com dois furos, ferrítico.

Modelos	Análise Experimental		Modo da Ruptura
	$F_{u,exp}$ [kN]	$\delta_{u,exp}$ [mm]	
2F-F-L50-E22	54,76	8,67	Modo A - s/ <i>Curling</i>
2F-F-L50-E55	57,50	9,02	Modo A - s/ <i>Curling</i>
2F-F-L50-E60	57,81	8,95	Modo A - s/ <i>Curling</i>
2F-F-L50-E70	57,05	8,78	Modo A - s/ <i>Curling</i>
2F-F-L90-E22	70,49	5,55	Modo B - s/ <i>Curling</i>
2F-F-L90-E55	92,27	17,44	Modo A - c/ <i>Curling</i>
2F-F-L90-E70	96,94	16,82	Modo A - c/ <i>Curling</i>

4. ANÁLISE NUMÉRICA

Este capítulo apresenta a análise numérica aplicada, em que, são utilizados os dados obtidos na caracterização dos materiais em ensaios dos corpos de prova. A definição da lei constitutiva dos materiais estudados mostra as etapas de desenvolvimento do método de análise adotado, tipo de elemento computacional programável no software adotado. 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.

Para a reprodução dos modelos e análise dos resultados será utilizado o programa de elementos finitos Abaqus [6].

4.1. Lei constitutiva

Para a aplicação computacional da curva tensão *versus* deformação obtida por meio dos ensaios dos corpos de prova, é necessário fazer a correção dos critérios de tensão nominal (F/A_0) e deformação nominal (Δ/l_0) para tensões e deformações verdadeiras, levando assim em consideração de alteração contínua nas dimensões do CP, em regiões submetidas à tensões elevadas, à medida que o carregamento é aplicado no ensaio, denominada como a curva real do material. A caracterização do material é obtida em um ensaio uniaxial considerando-se sempre a área inicial do corpo de prova, sem levar em conta a estrição sofrida pelo mesmo. Desta forma, deve-se efetuar esta modificação da lei constitutiva do material a ser utilizada. Para esta correção será utilizado o mesmo método citado em estudos de Kim *et al.*[14], conforme equações (21) e (22).

$$\sigma_v = \sigma_n(1 + \varepsilon_n) \quad (21)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (22)$$

O sistema Abaqus [6] permite introduzir uma curva multilinear de tensão *versus* deformação. A primeira parte da curva representa o comportamento elástico do

material, sendo este limite obtido com as informações do módulo de elasticidade (E) ou módulo de Young, e o coeficiente de Poisson ($\nu=0,3$). A tensão de escoamento foi obtida por meio de uma reta paralela ao trecho inicial correspondente a 0,2% de deformação. Para obtenção desses valores foram considerados os resultados dos ensaios CP2-AUST (Gráfico 13) e o CP2-FERRIT (Gráfico 14).

Os Gráfico 15 e Gráfico 16 mostram as curvas nominal, obtida em ensaio, e verdadeiras, obtidas por meio das equações (21) e (22).

A segunda parte da curva do Abaqus [6], representa o comportamento plástico do material, para isso utiliza-se a parte da curva verdadeira em que não está o regime elástico. Para otimizar a programação da curva verdadeira, utiliza-se apenas alguns pontos específicos dessa curva, de forma ainda a manter o seu formato, mas diminuir a quantidade de coordenadas. Assim serão usados os dados da Tabela 18.

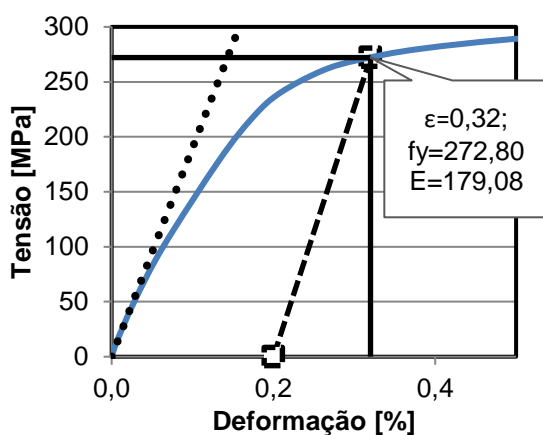


Gráfico 13 – Trecho inicial, tensão versus deformação do CP2-AUST.

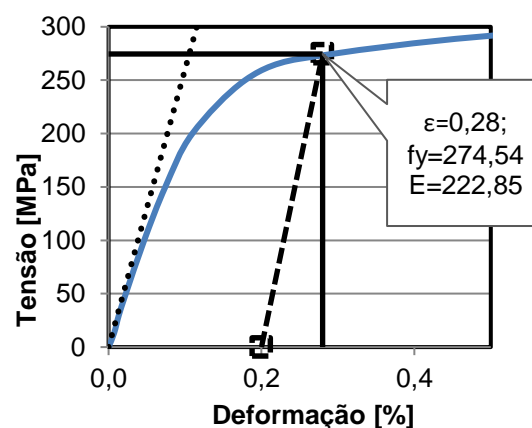


Gráfico 14 – Trecho inicial, tensão versus deformação do CP2-FERRIT.

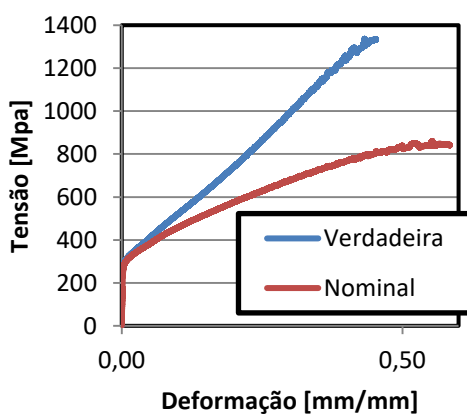


Gráfico 15 – Tensão versus deformação CP2-AUST.

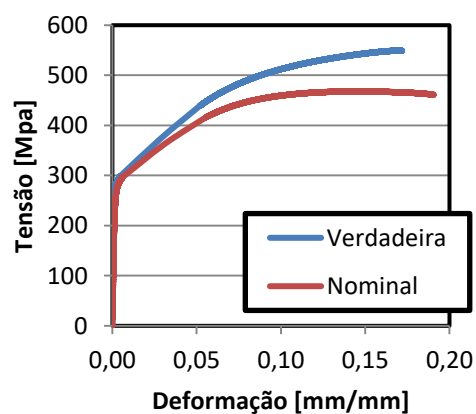


Gráfico 16 – Tensão versus deformação CP2-FERRIT.

Tabela 18 – Propriedades para as premissas do programa.

Austenítico - Verdadeiro Parte plástica			Ferrítico - Verdadeiro Parte plástica		
Pontos	Tensão [MPa]	Deform. [mm/mm]	Pontos	Tensão [MPa]	Deform. [mm/mm]
1	218,74	0,0000	1	250,44	0,0000
2	240,55	0,0007	2	270,66	0,0012
3	270,81	0,0015	3	298,80	0,0047
4	281,09	0,0022	4	373,78	0,0287
5	291,65	0,0035	5	439,39	0,0520
6	360,54	0,0276	6	487,58	0,0780
7	566,86	0,1223	7	521,32	0,1109
8	733,54	0,1968	8	535,37	0,1322
9	925,60	0,2741	9	542,00	0,1459
10	1158,90	0,3641	10	547,98	0,1630
11	1282,42	0,4172	11	549,41	0,1696

A deformação da placa de aço inoxidável na região do furo em contato com o parafuso é demasiada excessiva. Devido a isso, a plasticidade do material incorpora-se aos critérios de escoamento de von Mises e a regra de fluxo de Prandtl-Reus, para comportamento elasto-plástico com encruamento isotrópico ([24], [25], [26]). O critério de escoamento de von Mises determina o nível de tensão no início do escoamento e o fluxo plástico associado relaciona ao incremento de tensão à incrementos de deformação durante a deformação plástica. Já a regra de encruamento isotrópico permite que a superfície de escoamento sofra alternância de suas dimensões de maneira uniforme em todas as direções, de tal forma que, a tensão de escoamento aumente, ou diminua, em todas as direções à medida que as deformações plásticas ocorram ([24], [25]).

Na caracterização da lei constitutiva do material, também, coloca-se os valores da densidade, já citadas no capítulo de caracterização do material. Isto porque a análise adotada no Abaqus [6], *Dynamic Explicit*, requer que seja acrescentado esse dado. Para aplicação do modo *Dynamic Explicit* é necessário fazer algumas considerações para tornar a análise estática, como por exemplo, a amplitude e a frequência escolhidas. Para se obter os resultados é recomendado uma quantidade razoável de pontos durante a aplicação do carregamento.

Os dados da lei constitutiva dos demais materiais utilizados, como a chapa base, parafuso, porca e arruela, quando não forem citados anteriormente, serão considerados como: $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$, densidade de $7,85 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ e pontos da curva verdadeira plástica sendo PT1(958;0), PT2(962;0,0154) e PT3(1800;0,1268).

4.2. Análise não linear

Para este trabalho foi feita uma simplificação de forma a transformar a análise explícita dinâmica em implícita estática (quase-estática), alterando período e definições de fator da escala de massa, além de modificar características da sua amplitude e frequência no carregamento, o que acarretará em uma diferenciação na aquisição de dados de tal forma que simule uma análise estática. Este método *explicit* é um modo de solução especial desenvolvida para solução mais rápida de problemas dinâmicos com grandes deformações e deslocamentos. Assim, é determinada a solução sem a necessidade de fazer as interações por meio de integrações utilizando energia, o que requer menor esforço computacional. Para esse tipo de análise quase estática, o ETOTAL é próximo de zero.

Para a análise dos modelos e os estudos de casos será utilizado um método de integração do balanço energético, isto é, por meio de um equilíbrio quase-dinâmico em que a massa e a inércia do elemento são consideradas. O somatório de energia total (ETOTAL) deve ser constante, pois não haverá energia “criada” em todas as análises, apenas transferida de uma forma para outra. Mas não é necessário que este balanço seja zero. Será zero apenas para análise estática e análise quase estática, e o ETOTAL será aproximadamente zero ou quase zero. Geralmente, todo o trabalho externo deve ser cancelado pelas energias internas e energias cinéticas. O ETOTAL pode variar devido a alguns motivos [27], como:

- Não linearidade do programa.
- As considerações feitas MEF e/ou na malha.
- Energias não consideradas na modelagem da simulação.
- Capacidades do programa Abaqus.

Como regra geral, a energia cinética do material de deformação não deve exceder uma pequena fração (entre 5% a 10%) de sua energia interna durante a maior parte do processo.

A aplicação deste tipo de análise quase estática leva em conta que, computacionalmente, é importante controlar o tempo de aplicação da carga de forma a não prejudicar o resultado final. Para aplicar um deslocamento prescrito será utilizado o *Mass Scaling*, que aumenta artificialmente a densidade do material, que

garante um aumento do incremento de tempo necessário para a análise do modelo, reduzindo drasticamente o tempo de processamento sem comprometer a qualidade dos resultados. Será utilizada uma amplitude tal que torne esta análise a menos dinâmica possível e escolhido uma determinada quantidade de pontos de forma a obter os resultados finais claros ou pelo menos com uma tendência aceitável.

4.3. Tipo de elemento

O Abaqus [6] permite escolher vários tipos de elementos para análise de elementos finitos, tais como, elementos sólidos, elemento de viga, elemento de casca e elemento de treliça. Neste trabalho, foi escolhido o elemento sólido (C3D8R), que é definido como um hexaedro, tridimensional, com oito nós, cada nó possui três graus de liberdade referentes a translação das coordenadas globais X, Y e Z. Também para este trabalho, mais especificamente no parafuso, foi utilizado o elemento sólido (C3D10M), que é definido como um tetraedro quadrático, tridimensional, com quatro nós, cada nó possui três graus de liberdade referentes a translação das coordenadas globais X, Y e Z. Os elementos sólidos podem ser usados em análises lineares e não lineares que envolvam contato, plasticidade e grandes deformações [6]. Estes elementos possuem características de plasticidade, admitindo a utilização de um diagrama multilinear para a representação do material, além de trabalhar com grandes deformações. A Figura 42 apresenta o elemento utilizado.

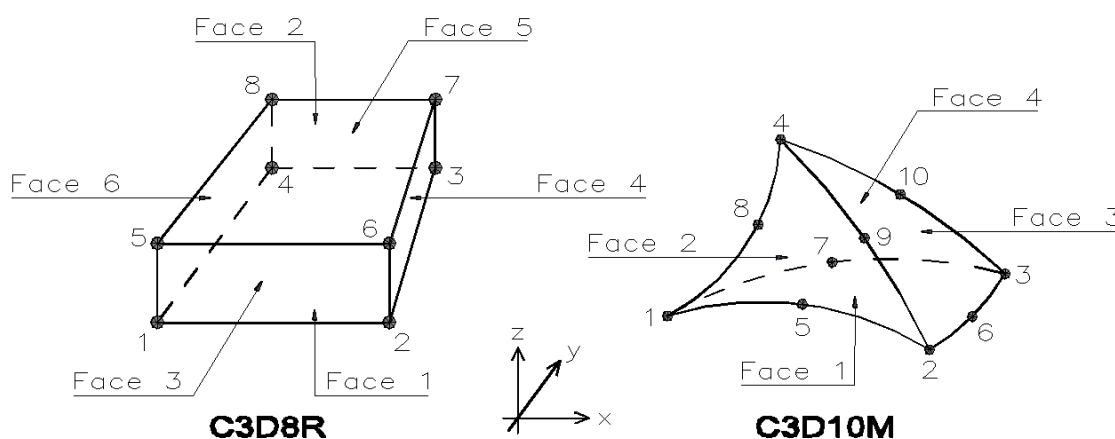


Figura 42 – Tipos de elementos.

4.4. Geometria e simplificação do modelo

A análise de elementos finitos permite simular a execução de ensaios experimentais obtendo resultados muito próximos da realidade. Sendo assim, foi criado um modelo simplificado do ensaio, calibrado com os dados experimentais, que simulasse o comportamento da placa de aço inoxidável submetida à tração. A Figura 43 apresenta o modelo desenvolvido e a malha empregada. A Figura 44 apresenta a malha dos demais elementos envolvidos neste modelo numérico.

Nesta dissertação, o objetivo é verificar as falhas e efeitos que ocorrem nas placas de aço inoxidável em estudo. Sendo assim, as demais partes (chapa base, arruelas e parafusos com suas porcas) não serão analisadas profundamente, mas na medida do possível terão suas características geométricas incluídas no modelo. Apenas no caso do parafuso, foi feita uma consideração que esse está junto com a porca e a parte rosqueável do parafuso foi considerada lisa. E para o conjunto parafuso-porca o tipo de elemento utilizado na malha é o tetraédrico quadrático (C3D10M).

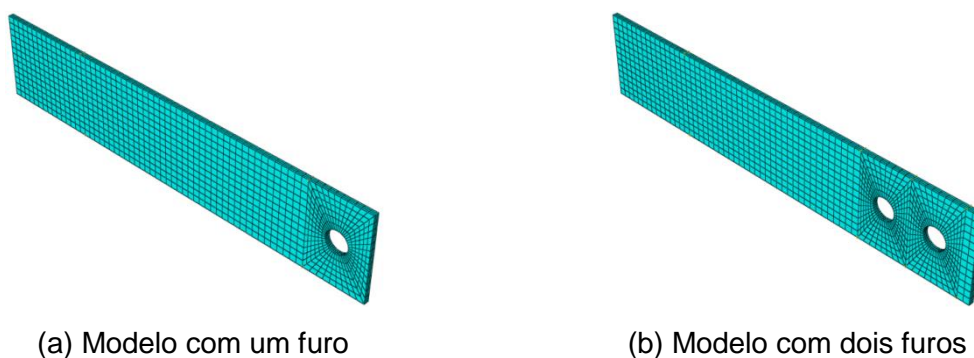


Figura 43 – Malha dos modelos analisados.

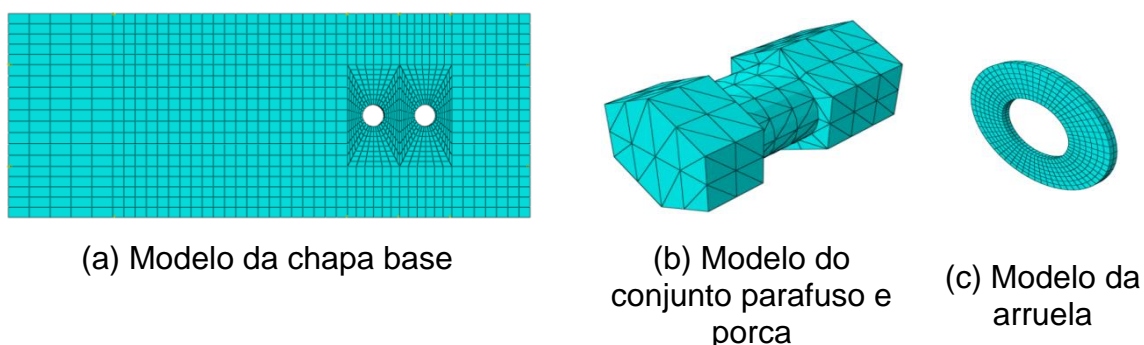


Figura 44 – Malha das demais peças envolvidas.

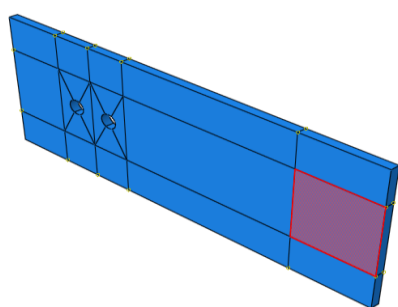
São adicionados pontos de referência (RP), que tem a função de transferir as condições desse ponto para toda a região a ele ligado. Desta forma facilita a aplicação das condições de contorno, de cargas e coleta de dados.

4.5. Elemento de contato

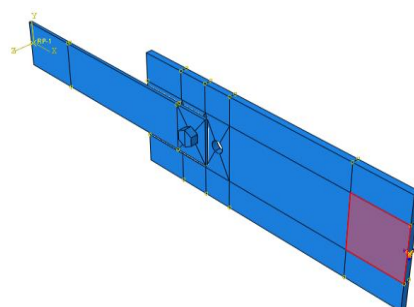
Os elementos de contato são utilizados para representar a interação entre as partes criadas (placas de aço inoxidável, chapa base, arruelas e parafusos com suas porcas). Com base em escolhas adotadas na simplificação dos modelos, é aplicado um contato geral, dinamicamente explícito, com comportamento normal (contato difícil na cobertura) e tangencial (coeficiente de fricção de 0,25). Estes dados estão baseados em estudos de Silva [15].

4.6. Condições de contorno

Para todos os modelos desenvolvidos, as condições de contorno e carregamento foram adotadas em concordância com a análise experimental. No laboratório, a garra inferior do sistema de aplicação de cargas, ligada a chapa base impede o deslocamento e rotação em todas as direções, isto é, simula o engaste desta região. Para simular este efeito, são aplicadas as condições na superfície que está selecionada da chapa base e do CP, conforme mostra a Figura 45. Esta condição aplicada na superfície é transferida para um “referencial point” (RP) criado para facilitar a análise computacional.



(a) Local onde será aplicada a condição de contorno na chapa base



(b) Local onde será aplicada a condição de contorno no conjunto

Figura 45 – Zonas de aplicação das condições de contorno.

4.7. Carregamento

O carregamento é aplicado por meio de deslocamento prescrito, na região de contato com a garra superior do sistema de aplicação de cargas, ligada a placa de aço inoxidável em estudo, gerando, com esse movimento, uma tração no conjunto em análise. Para simular este efeito, são aplicadas as condições na superfície que está selecionada das placas de aço inox e do CP, conforme mostra a Figura 46 e a Figura 47. Esta condição aplicada na superfície é também foi transferida por meio de um “referencial point” (RP).

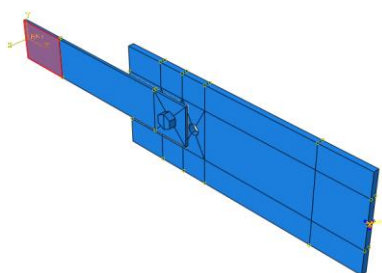


(a) Local onde será aplicada o carregamento na placa, com dois furos

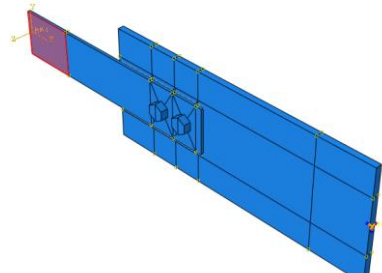


(b) Local onde será aplicada o carregamento na placa, com um furo

Figura 46 – Zonas de aplicação do carregamento - Parte 1.



(a) Local onde será aplicada o carregamento no conjunto, com um furo



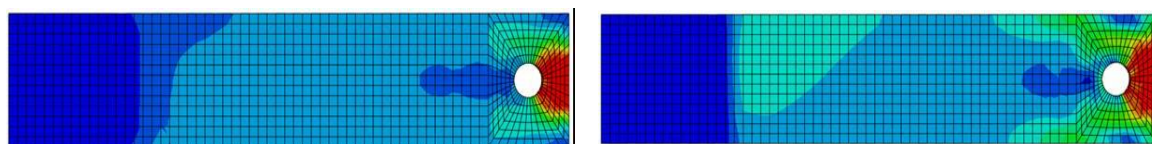
(b) Local onde será aplicada o carregamento no conjunto, com dois furos

Figura 47 – Zonas de aplicação do carregamento - Parte 2.

4.8. Estudo da malha

Para definições dos elementos de malha foram utilizadas as recomendações utilizadas no estudo Silva [15], que utiliza três elementos por espessura e, a partir das dimensões geradas com essa divisão na espessura, aplica-se proporcionalmente, nos locais onde mais há acumulo de tensões e no local de objetivo de estudo. Sendo assim, as dimensões dos elementos terão aproximadamente 1 mm. Nos demais pontos do modelo poderá ser utilizado uma malha menos refinada, para assim otimizar o tempo de convergência computacional exigida.

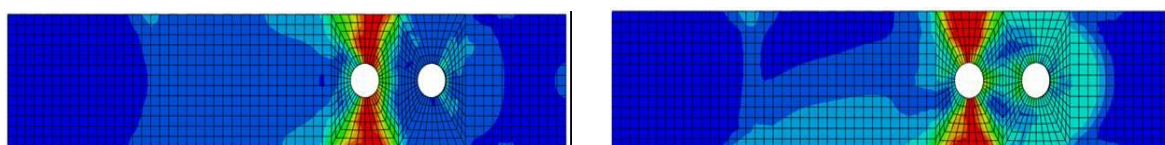
Na Figura 48 apresenta-se os modelos de um furo, em aspecto indeformado mais as tensões geradas, com suas malhas finais, com três elementos na espessura também. A Figura 49 apresenta o mesmo detalhe, para os modelos com dois furos.



(a) Modelo austenítico

(a) Modelo Ferrítico

Figura 48 – Estado final da malha dos modelos com um furo.



(a) Modelo austenítico

(a) Modelo Ferrítico

Figura 49 – Estado final da malha dos modelos com dois furos.

4.9. Comparação dos modelos numéricos com os experimentais

A realização de ensaios experimentais permite obter, de forma confiável e precisa, o comportamento real das estruturas e ligações. Com base nos resultados obtidos nesses ensaios, é possível calibrar um modelo numérico, e no caso das ligações, determinarem o momento resistente, rigidez inicial, capacidade de rotação e outros dados a partir das propriedades mecânicas e geométricas destas ligações. Após essa calibração, utilizando certos critérios, é possível extrapolar os dados para

a análise de outras estruturas diversas, mas que mantêm algum grau de similaridade com o experimento original.

4.9.1. Modelo: 1F-A-L50-E18

Este modelo repetirá a geometria do ensaio proposto por Kim *et al.* [14], a fim de poder avaliar os resultados. Os extensômetros, EXT1 e EXT2, foram colocados na seção líquida, em torno do furo, para comparar as variações de deformações que ocorrem dos lados, podendo gerar certo tipo de rotação desta seção, conforme Figura 50.

O Gráfico 17 mostra a curva carga *versus* deslocamento para simples comparação das análises e o resultado obtido por Kim *et al.* [14], sendo possível observar uma boa convergência entre as mesmas.

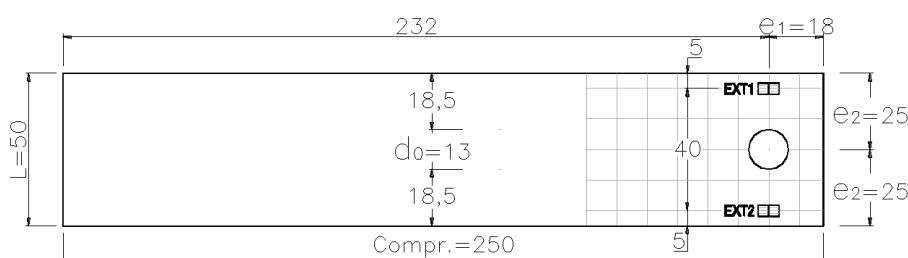


Figura 50 – Geometria do modelo 1F-A-L50-F18, em milímetros.

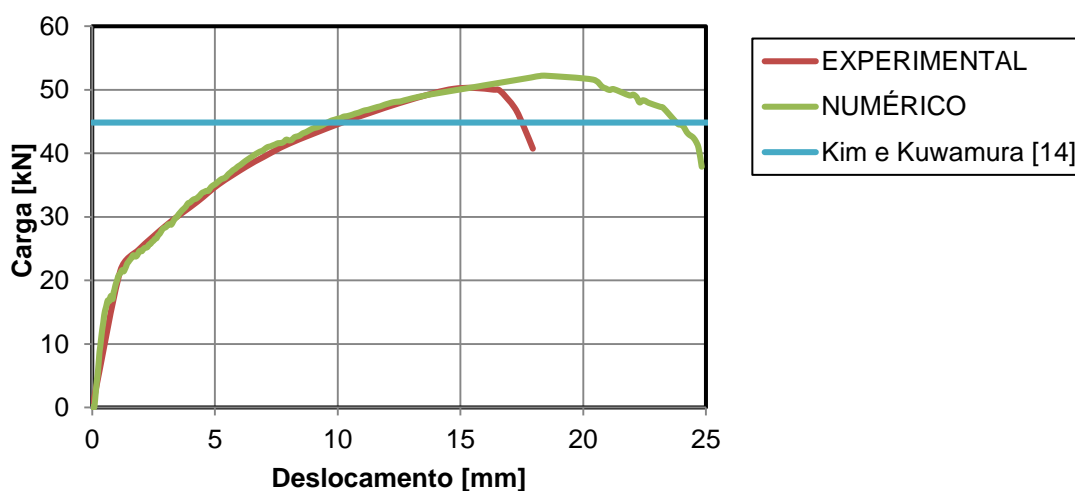
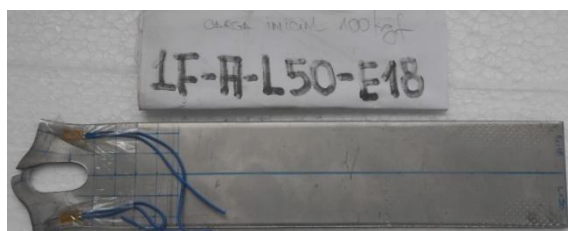


Gráfico 17 – Carga *versus* deslocamento, do modelo 1F-A-L50-E18.

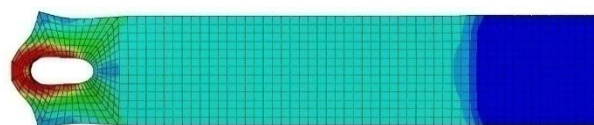
Os estudos de Kim *et al.* [14] alcançaram uma carga última de 44,85 kN para a expressão proposta, quando comparado com esse estudo experimental obtém o erro percentual de 16,47% com a carga última da análise numérica. A comparação do resultado experimental e numérico é apresentado na Tabela 19. Comparando os resultados, evidencia-se que o tipo de modo de falha foi por rasgamento da parte final da chapa, conforme previa os cálculos da norma, porém com uma diferença entre cargas últimas de 3,83% entre análises experimental e numérica, sem que tenha ocorrido o efeito *curling*. A Figura 51 apresenta a comparação dos resultados de deformações.

Tabela 19 – Comparação entre análises do modelo 1F-A-L50-E18.

Modelos	Análise Experimental		Análise Numérica		Dif, Fu [%]	Modo da Ruptura
	$F_{u,exp}$ [kN]	$\delta_{u,exp}$ [mm]	$F_{u,num}$ [kN]	$\delta_{u,num}$ [mm]		
1F-A-L50-E18	50,31	15,51	52,24	18,42	3,83	Modo B - s/ <i>Curling</i>



(a) ensaiado experimentalmente



(b) analisado numericamente

Figura 51 – Modelo 1F-A-L50-E18.

O Gráfico 18 mostra uma diferença de rigidez na zona de transição entre a parte elástica e a parte plástica. Porém, fora desta zona foram obtidos praticamente os mesmos valores de carga e de deformação, o que mostra estar havendo uma deformação simétrica. Como não há uma queda na curva, conclui-se que os extensômetros não funcionaram até a carga máxima.

Para a carga experimental obtida, o parafuso ultrapassou a resistência ao escoamento, mas não houve a ruptura, atingindo assim seu comportamento plástico, não podendo ser utilizado em outro ensaio (Figura 28 (b)). Para este modelo, o modo de falha se deu conforme o esperado.

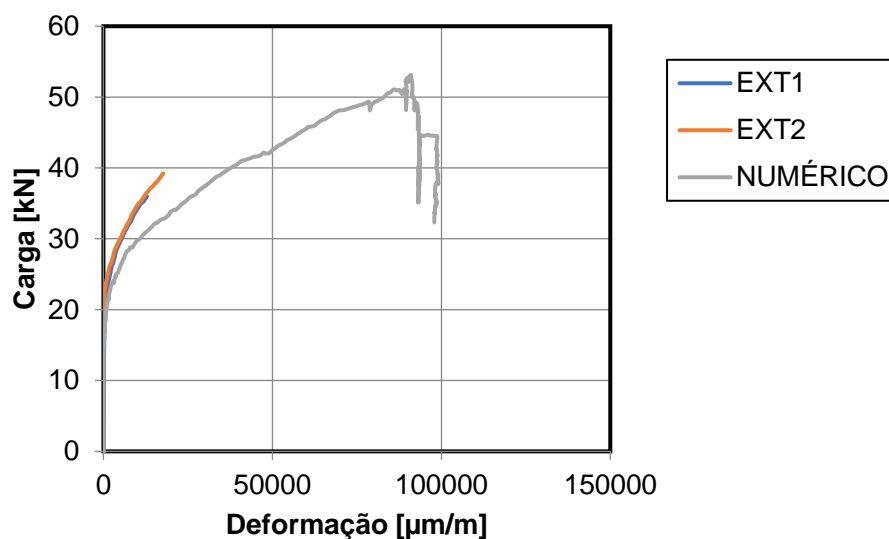


Gráfico 18 – Carga versus deformação dos extensômetro do modelo 1F-A-L50-E18.

4.9.2. Modelo: 1F-F-L50-E18

Este modelo repetirá a geometria do ensaio proposto por Kim *et al.*[14], a fim de poder avaliar os resultados. Os extensômetros, EXT1 e EXT2, foram colocados na seção líquida, em torno do furo, para comparar as variações de deformações que ocorrem dos lados, podendo gerar certo tipo de rotação desta seção, conforme apresentado na Figura 52.

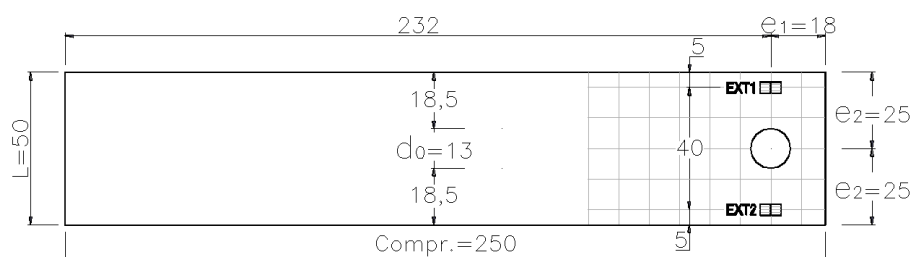


Figura 52 – Geometria do modelo 1F-F-L50-F18, em milímetros.

O Gráfico 19 mostra a curva carga versus deslocamento para simples comparação das análises, observando-se uma boa convergência entre os resultados. A Tabela 20 apresenta a comparação dos resultados numéricos e experimentais. Estes resultados evidenciaram que o tipo de modo de falha foi por rasgamento da parte final da chapa, conforme previa cálculos da norma, observado na Figura 53, porém com uma diferença entre carga última numérica e experimental de 9,52%, sem que tenha ocorrido o efeito *curling*.

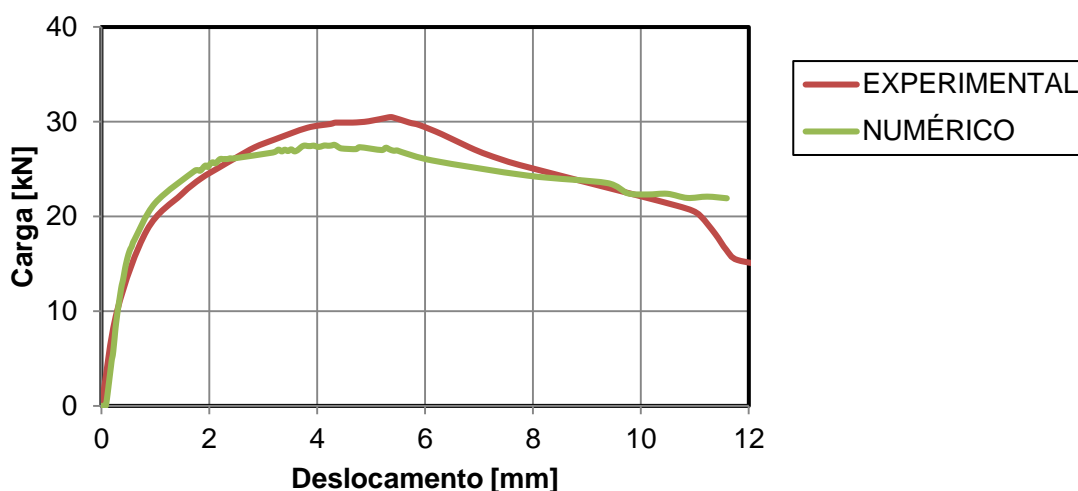


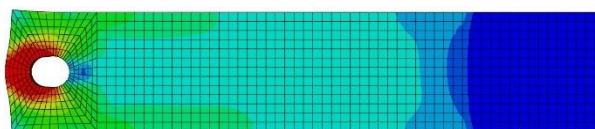
Gráfico 19 – Carga versus deslocamento, do modelo 1F-F-L50-E18.

Tabela 20 – Comparação entre análises do modelo 1F-F-L50-E18.

Modelos	Análise Experimental		Análise Numérica		Dif, Fu [%]	Modo da Ruptura
	$F_{u,exp}$ [kN]	$\delta_{u,exp}$ [mm]	$F_{u,num}$ [kN]	$\delta_{u,num}$ [mm]		
1F-F-L50-E18	30,46	5,40	27,56	4,32	9,52	Modo B - s/Curling



(a) ensaiado experimentalmente



(b) analisado numericamente

Figura 53 – Modelo 1F-F-L50-E18.

O Gráfico 20 mostra uma boa equivalência de valores de carga e deformação entre os extensômetros até próximo a carga máxima, onde começa a ter uma diferença de deformação, apesar de manterem os mesmos valores de carga. Alguma deformação não simétrica pode ter ocorrido no ensaio, porém tão inconsistência não foi perceptível. Como há uma inflexão na curva, conclui-se que os extensômetros funcionariam até depois da carga máxima. Para este ensaio não foram verificados problemas em relação aos parafusos utilizados.

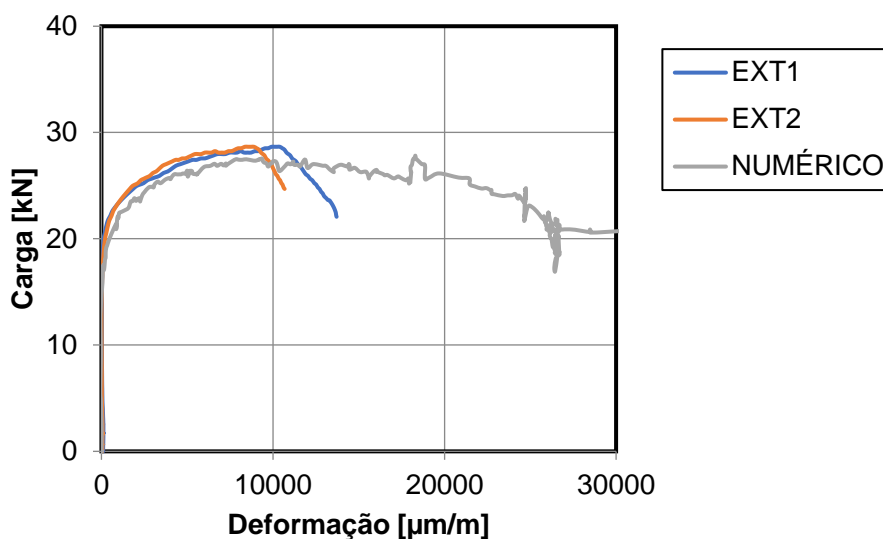


Gráfico 20 – Carga versus deformação dos extensômetro do modelo 1F-F-L50-E18.

4.9.3. Modelo:2F-A-L50-E60

A geometria do modelo é apresentada na Figura 54, onde os extensômetros, EXT1 e EXT2, foram colocados na seção líquida, em torno do furo mais solicitado, para se poder comparar as variações de deformações que ocorrem dos dois lados, onde pode ocorrer certo tipo de rotação desta seção, onde poderá ocorrer a ruptura do modelo. No Gráfico 21, mostra-se a curva carga *versus* deslocamento para comparação das análises e o resultado obtido por Kim *et al.* [14]. Observa-se que os resultados obtidos pelo proposto por Kim *et al.* [14] foram de 85,60kN, quando comparado com esse estudo experimental obtém uma diferença de 0,48% com a carga última da análise numérica. A Tabela 21 apresenta a comparação dos resultados.

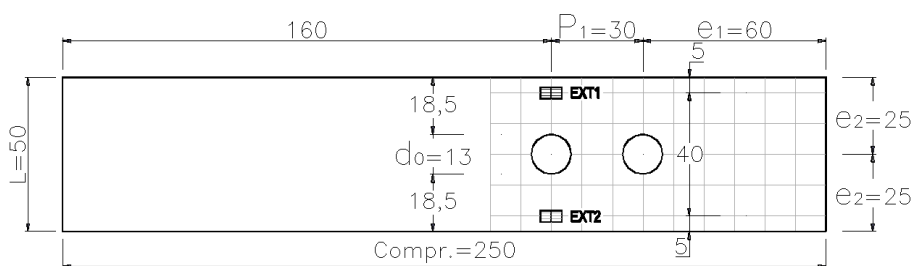


Figura 54 – Geometria do modelo 2F-A-L50-F60, em milímetros.

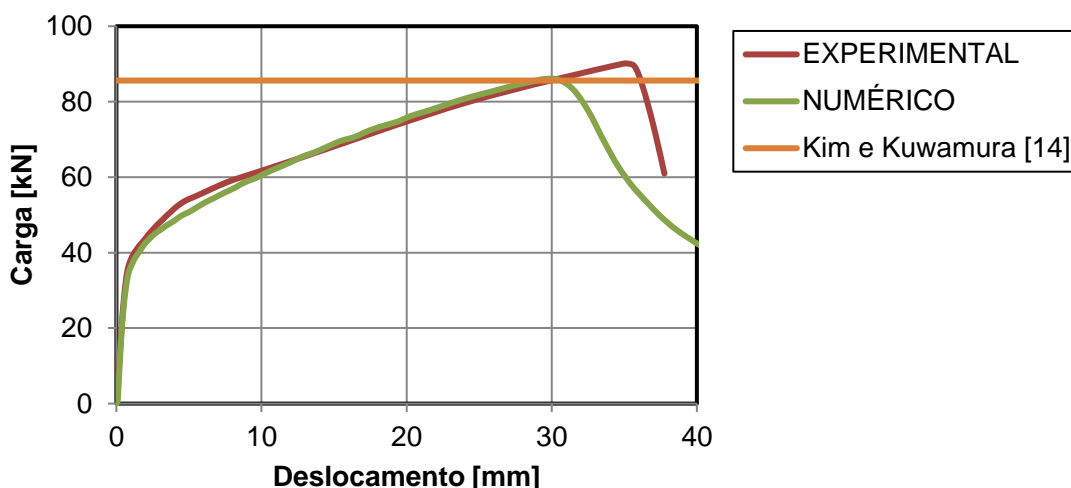


Gráfico 21 – Carga versus deslocamento, do modelo 2F-A-L50-E60.

Tabela 21 – Comparação entre análises do modelo 2F-A-L50-E60.

Modelos	Análise Experimental		Análise Numérica		Dif, Fu [%]	Modo da Ruptura
	$F_{u,exp}$ [kN]	$\delta_{u,exp}$ [mm]	$F_{u,num}$ [kN]	$\delta_{u,num}$ [mm]		
2F-A-L50-E60	90,04	34,87	86,01	29,49	4,47	Modo A - c/Curling

Estes resultados evidenciaram que o tipo de modo de falha foi por ruptura da área líquida da chapa, porém com uma diferença na carga última de 4,47% entre análises numérica e experimental, além da ocorrência do efeito *curling* desde o início de sua parte plástica. Notou-se, também, que o rasgamento da seção líquida se deu perpendicularmente (Figura 55), mas não se deu em um mesmo plano, no furo mais solicitado, onde ocorreu uma maior deformação. Não foram observadas deformações nos parafusos utilizados. Neste modelo o efeito *curling* ficou evidenciado.

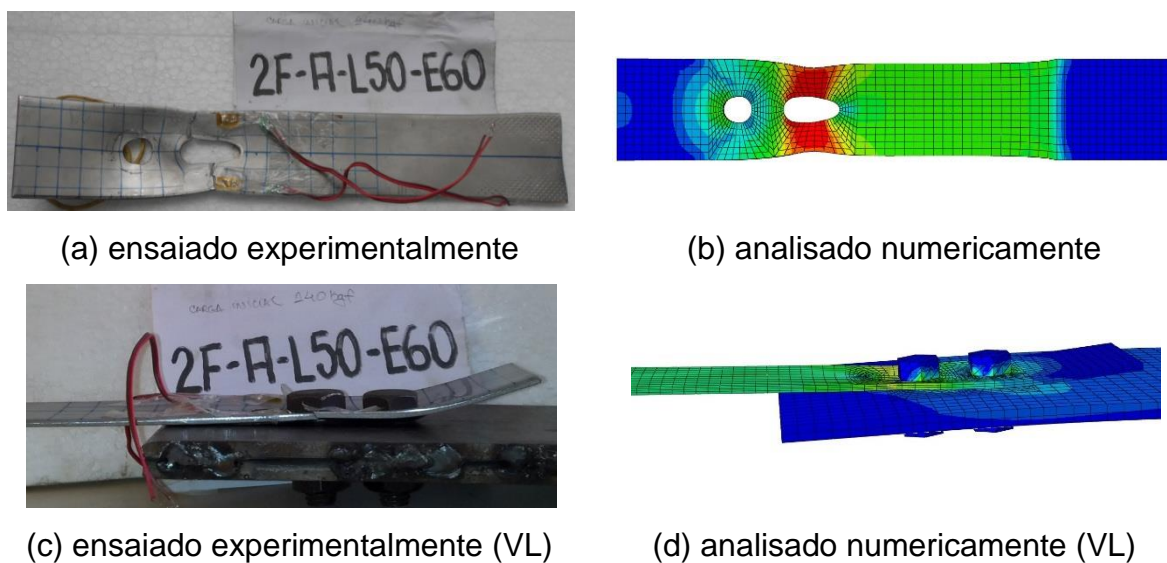


Figura 55 – Modelo 2F-A-L50-E60.

O Gráfico 22 mostra uma diferença nos dados coletados fora da parte elástica até os extensômetros pararem seu funcionamento. Pelo fato da ruptura ter ocorrido em planos perpendiculares distintas, foram coletados uma diferença de deformação entre extensômetro grande, em que o EXT1 que está mais próximo da ruptura mostra uma maior deformação do que o EXT2. O Gráfico 22 está mostrando a ocorrência de uma deformação não simétrica com uma mudança de tangente próximo a carga de 40 kN. Como não há uma inflexão na curva, conclui-se que os extensômetros pararam de funcionar antes de atingir a carga máxima.

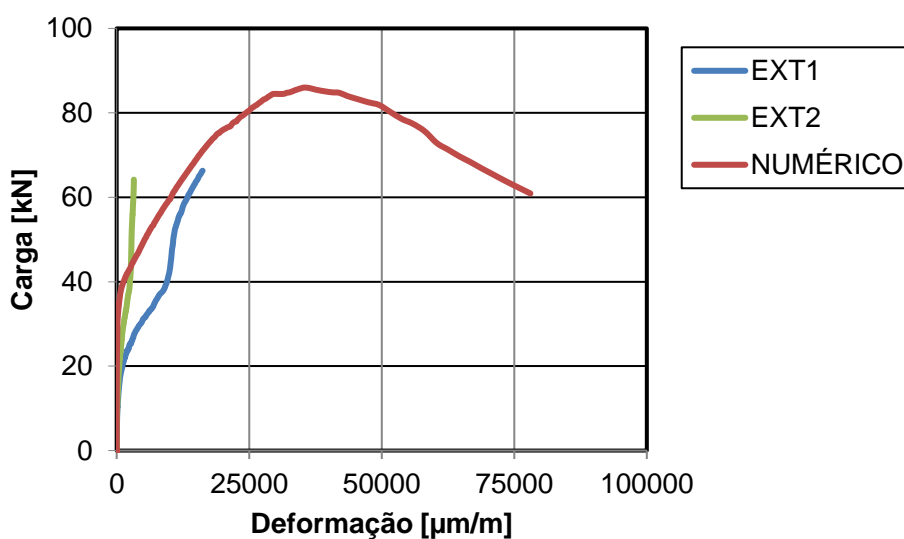


Gráfico 22 – Carga versus deformação dos extensômetro do modelo 2F-A-L50-E60.

4.9.4. Modelo: 2F-F-L50-E60

A Figura 56 apresenta a geometria do modelo, sendo baseado no ensaio proposto por Kim *et al.* [14], tendo como modo de falha esperado a ruptura da seção líquida.

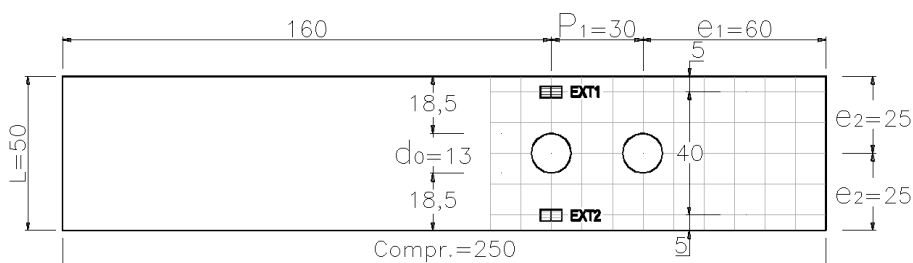


Figura 56 – Geometria do modelo 2F-F-L50-F60, em milímetros.

O Gráfico 23 mostra a curva carga *versus* deslocamento para simples comparação das análises feitas, apresentando boa convergência entre o modelo numérico e experimental. Estes resultados evidenciaram que o tipo de modo de falha foi por ruptura da área líquida da chapa, conforme previsto, porém com uma diferença de erros na carga última de 8,94% entre análises, sem que tenha ocorrido o efeito *curling*. Notou-se, também, que o rasgamento da seção líquida se deu perpendicularmente, no furo mais solicitado, onde ocorreu uma maior deformação, como observado na Figura 57.

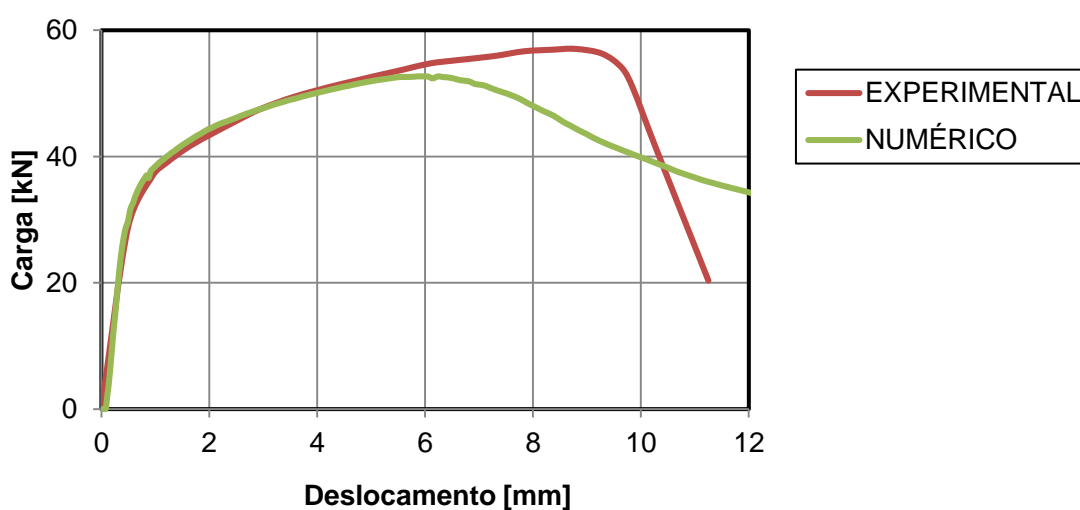


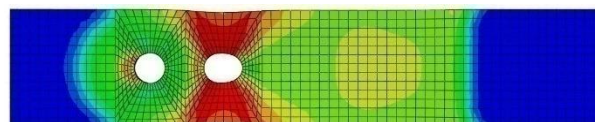
Gráfico 23 – Carga *versus* deslocamento, do modelo 2F-F-L50-E60.

Tabela 22 – Comparação entre análises do modelo 2F-F-L50-E60.

Modelos	Análise Experimental		Análise Numérica		Dif, Fu [%]	Modo da Ruptura
	$F_{u,exp}$ [kN]	$\delta_{u,exp}$ [mm]	$F_{u,num}$ [kN]	$\delta_{u,num}$ [mm]		
2F-F-L50-E60	57,81	8,95	52,64	6,14	8,94	Modo A - s/Curling



(a) ensaiado experimentalmente.



(b) analisado numericamente.

Figura 57 – Modelo 2F-A-L50-E60.

No Gráfico 24 mostra uma diferença nos dados coletados até os extensômetros pararem seu funcionamento. O gráfico mostra a ocorrência de uma deformação não simétrica. Como não há uma inflexão na curva, conclui-se que os extensômetros pararam de funcionar antes de atingir a carga máxima. Os parafusos não sofreram deformações, e o modo de falha esperado foi obtido.

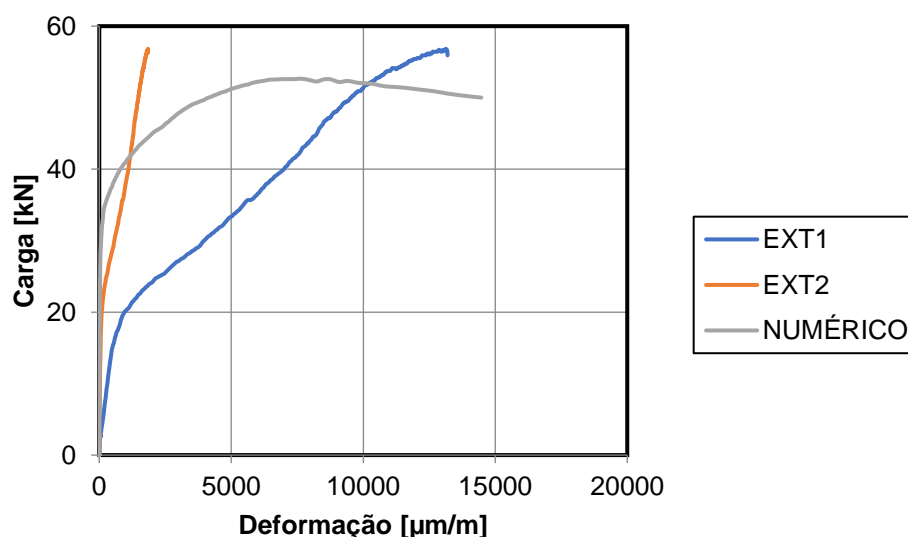


Gráfico 24 – Carga versus deformação dos extensômetro do modelo 2F-F-L50-E60.

4.10. Resultados das análises numéricas

Nesta seção, são apresentados os resultados divididos em blocos para poder facilitar as análises gerais e observações de comportamentos. Estas separações podem ser pelo tipo de material, quantidade de furos e até mesmo por parâmetros analisados, como largura e distâncias entre borda e furos.

A Tabela 23 apresenta os resultados das cargas máximas e seus respectivos deslocamentos para as análises experimentais e numéricas de cada modelo juntamente com a diferença percentual entre análises. Mostram também os valores da EN 1993-1-4 [9] e modo de ruptura baseados nesta norma, além de ocorrência ou não o efeito *curling*.

A Tabela 23, para um furo, mostra a diferença percentual entre análises, não tendo uma tendência clara no seu valor, sendo que a diferença é maior nos modelos em que de e_1 limite ($e_1 = 22$ mm e 32 mm) e que alguns destes aparece o efeito *curling*. Tirando os resultados deste e_1 limite, os resultados numéricos para um furo do material austenítico tiveram suas análises numéricas maiores do que a experimental. Já para o material ferrítico ocorreu o inverso. A média das diferenças entre análises experimental e numérica é de 11,72 % e seu desvio padrão é de 8,15 %.

Já a mesma Tabela 23, para dois furos, mostra a diferença percentual entre análises, também se apresenta uma tendência de evento. Os resultados numéricos para dois furos com largura menor ($L = 50$ mm), para ambos os materiais, tiveram suas análises numéricas menores do que a experimental, já para os com larguras maiores ($L = 90$ mm) não tiveram uma regularidade em cada caso. A média das diferenças entre análises experimental e numérica é de 5,86 % e seu desvio padrão é de 3,16 %.

Para esta análise numérica a utilização da simplificação do modelo “dinamic-explicit” (quase-estático) teve uma boa convergência, apesar de ter ocorrido, em sua maioria, na parte plástica e principalmente nos modelos com um furo, certa incerteza nessa zona dos gráficos carga *versus* deslocamento.

Tabela 23 – Comparativos das análises dos modelos.

Modelos		EC3	Análise Experimental		Dif, Fu [%]	Análise Numérica		Modo da Ruptura
		N _{t,Rd} [kN]	F _{u,exp} [kN]	δ _{u,exp} [mm]		F _{u,num} [kN]	δ _{u,num} [mm]	
Um Furo	1F-A-L50-E16,8	26,39	44,02	11,55	6,41	46,84	13,18	B - s/Curling
	1F-A-L50-E18	28,28	50,31	15,51	3,83	52,24	18,42	B - s/Curling
	1F-A-L50-E22	34,56	68,47	34,75	7,89	63,07	42,17	C - c/Curling
	1F-A-L50-E32	50,27	47,65	11,80	34,54	64,11	41,45	C - c/Curling
	1F-A-L90-E16,8	26,39	46,96	11,09	7,87	50,66	11,61	B - s/Curling
	1F-A-L90-E22	34,56	51,47	8,44	19,51	61,51	13,05	B - c/Curling
	1F-A-L90-E32	50,27	93,07	19,94	18,05	76,27	29,75	C - c/Curling
	1F-F-L50-E16,8	17,15	29,50	4,60	12,27	25,88	3,63	B - s/Curling
	1F-F-L50-E18	18,38	30,46	5,40	9,52	27,56	4,32	B - s/Curling
	1F-F-L50-E22	22,46	36,07	6,54	8,68	32,94	5,56	B - s/Curling
	1F-F-L50-E32	32,67	37,69	6,80	6,22	40,04	3,82	C - c/Curling
	1F-F-L90-E16,8	17,15	26,42	4,88	3,18	25,58	2,98	B - s/Curling
	1F-F-L90-E22	22,46	39,34	7,20	13,43	34,06	4,23	B - s/Curling
1F-F-L90-E32	32,67	56,64	13,89	12,64	49,48	12,55	B - s/Curling	
Dois Furos	2F-A-L50-E22	82,51	91,94	47,11	9,19	83,49	34,23	A - s/Curling
	2F-A-L50-E55	82,51	87,68	33,13	1,59	86,29	31,06	A - c/Curling
	2F-A-L50-E60	82,51	90,04	34,87	4,47	86,01	29,49	A - c/Curling
	2F-A-L50-E70	82,51	87,28	30,97	3,93	83,85	25,60	A - c/Curling
	2F-A-L90-E22	93,79	131,00	39,28	0,57	131,74	39,41	F - c/Curling
	2F-A-L90-E55	104,06	126,20	29,91	6,93	134,94	36,56	A - c/Curling
	2F-A-L90-E70	104,06	124,93	26,49	8,58	135,65	33,67	A - c/Curling
	2F-F-L50-E22	45,71	54,76	8,67	4,00	52,57	7,33	A - s/Curling
	2F-F-L50-E55	45,71	57,50	9,02	8,29	52,74	6,42	A - s/Curling
	2F-F-L50-E60	45,71	57,81	8,95	8,94	52,64	6,14	A - s/Curling
	2F-F-L50-E70	45,71	57,05	8,78	7,64	52,69	6,23	A - s/Curling
	2F-F-L90-E22	33,34	70,49	5,55	1,54	69,40	7,38	B - s/Curling
	2F-F-L90-E55	57,65	92,27	17,44	6,47	86,30	21,03	A - c/Curling
2F-F-L90-E70	57,65	96,94	16,82	9,97	87,27	20,98	A - c/Curling	

5. ESTUDO PARAMÉTRICO

Com o intuito de investigar as recomendações dos estudos de Salih *et al.* [7][8] foram criados mais modelos numéricos para uma breve análise paramétrica. A nomenclatura respeitará o organograma da Figura 22, porém com um prefixo “EC” que se trata de uma referência ao estudo de caso. Serão elaborados mais modelos computacionais com valores diferentes de largura (L) e distância final entre borda e furo (e_1) que serão divididas entre tipo de material (aço inoxidável austenítico ou ferrítico) e ligação aparafusada com um ou dois furos, totalizando 38 modelos a mais do que os ensaiados em laboratórios.

A Tabela 24 apresenta os resultados das cargas máximas e seus respectivos deslocamentos para as análises numéricas de cada estudo de caso com um furo, de ambos materiais em estudo, mostrando também os valores da EN 1993-1-4 [9]. O Gráfico 25 mostra os resultados dos casos, com um furo, para os aços inoxidáveis austenítico.

Tabela 24 – Dados geométricos, nomenclatura e alguns outros dados dos modelos em estudos de casos, para um furo.

	L [mm]	e_1 [mm]	A_{net} [mm ²]	Modelos	Análise Numérica		EC3 $N_{t,Rd}$ [kN]	Rácio F_u e N_t [%]	Desvio Padrão
					$F_{u,num}$ [kN]	$\delta_{u,num}$ [mm]			
AUSTENÍTICO	50	26	111	EC-1F-A-L50-E26	66,81	46,60	40,84	1,64	5,05
	50	39	111	EC-1F-A-L50-E39	62,90	46,88	59,84	1,05	
	50	65	111	EC-1F-A-L50-E65	65,40	44,90	59,84	1,09	
	90	26	231	EC-1F-A-L90-E26	73,56	32,94	40,84	1,80	
	90	39	231	EC-1F-A-L90-E39	70,28	22,13	59,84	1,17	
	90	65	231	EC-1F-A-L90-E65	75,28	31,75	59,84	1,26	
FERRÍTICO	50	26	111	EC-1F-F-L50-E26	38,42	6,75	26,55	1,45	4,27
	50	39	111	EC-1F-F-L50-E39	40,10	3,33	39,82	1,01	
	50	65	111	EC-1F-F-L50-E65	39,81	3,16	33,34	1,19	
	90	26	231	EC-1F-F-L90-E26	40,53	10,28	26,55	1,53	
	90	39	231	EC-1F-F-L90-E39	47,19	2,20	39,82	1,19	
	90	65	231	EC-1F-F-L90-E65	47,18	2,21	33,34	1,42	

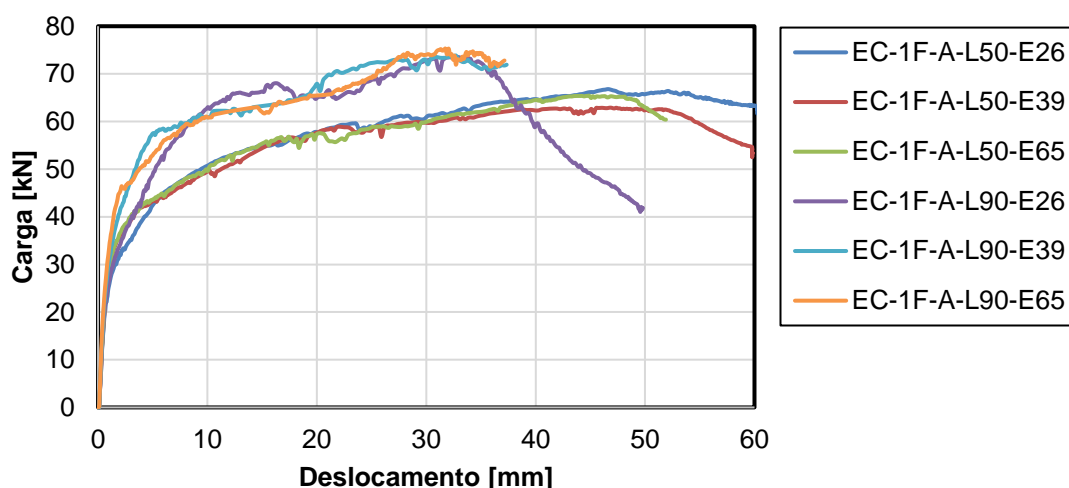


Gráfico 25 – Carga versus deslocamento dos estudos de caso austenítico com um furo.

As Figura 58 e Figura 59 mostram os estudos de caso com apenas um furo austenítico, na configuração de sua carga última do seu modelo numérico. O Gráfico 26 mostra os resultados dos casos, com um furo, para os aços inoxidáveis ferrítico.

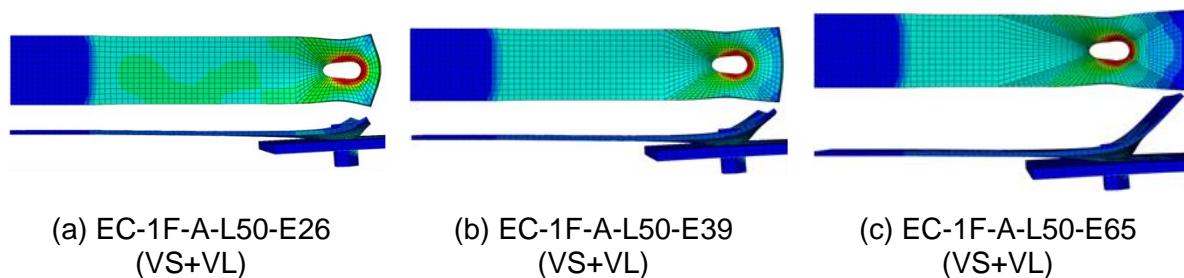


Figura 58 – Estudo de casos com um furo, austenítico e largura de 50 mm.

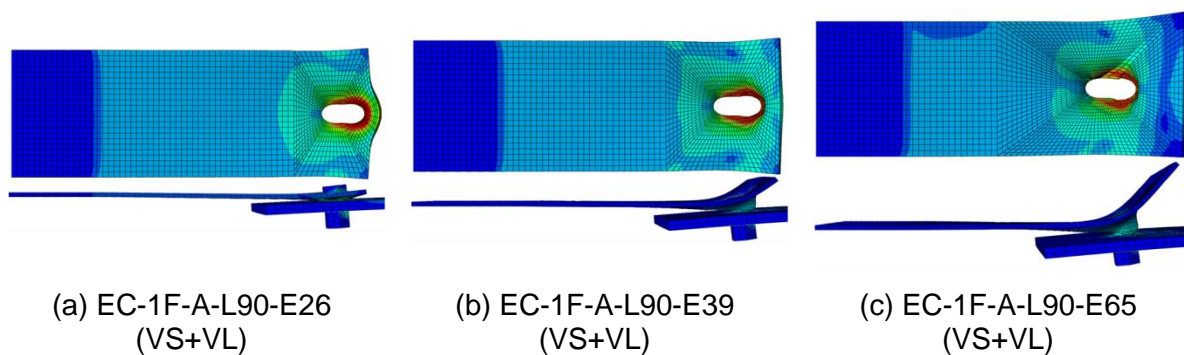


Figura 59 – Estudo de casos com um furo, austenítico e largura de 90 mm.

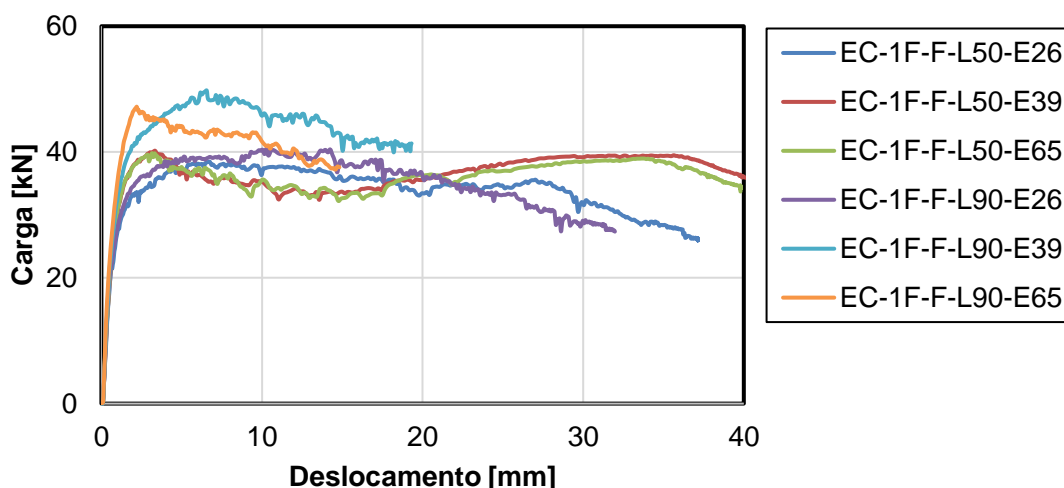
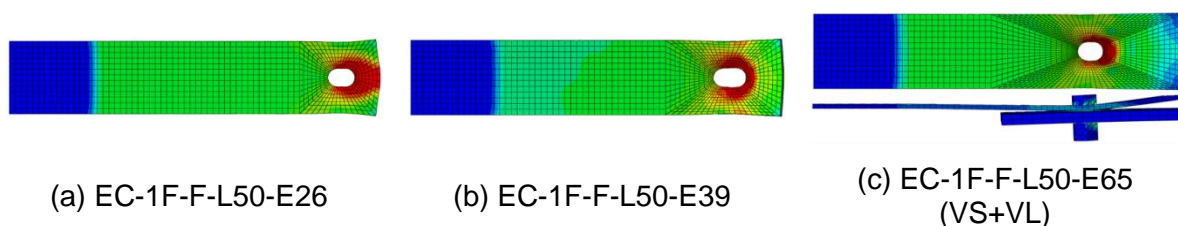


Gráfico 26 – Carga versus deslocamento dos estudos de caso ferrítico com um furo.

As Figura 60 e Figura 61, que mostram os estudos de caso com apenas um furo ferrítico, na configuração de sua carga última do seu modelo numérico.

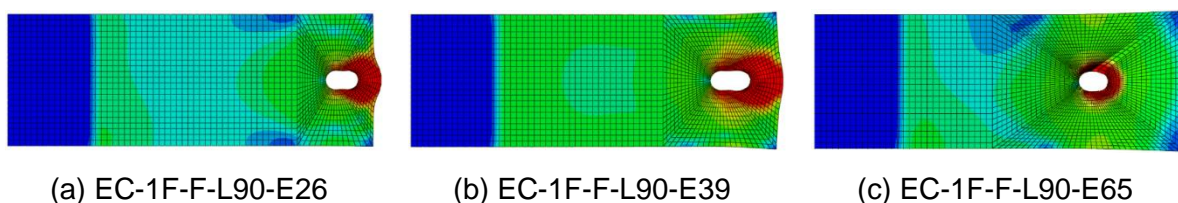


(a) EC-1F-F-L50-E26

(b) EC-1F-F-L50-E39

(c) EC-1F-F-L50-E65
(VS+VL)

Figura 60 – Estudo de casos com um furo, ferrítico e largura de 50 mm.



(a) EC-1F-F-L90-E26

(b) EC-1F-F-L90-E39

(c) EC-1F-F-L90-E65

Figura 61 – Estudo de casos com um furo, ferrítico e largura de 90 mm.

A Tabela 25 apresenta os resultados das cargas máximas e seus respectivos deslocamentos para as análises numéricas de cada estudo de caso com dois furos do material austenítico, mostram também os valores da EN 1993-1-4 [9]. Já o Gráfico 27 mostra os resultados dos casos, com dois furos, para o aço inoxidável austenítico.

Tabela 25 – Dados geométricos, nomenclatura e alguns outros dados dos modelos em estudos de casos, austenítico.

	L [mm]	e_1 [mm]	A_{net} [mm ²]	Modelos	Análise Numérica		EC3 $N_{t,Rd}$ [kN]	Rácio F_u e N_t [kN]
					$F_{u,num}$ [kN]	$\delta_{u,num}$ [mm]		
AUSTENÍTICO	26	22	39	EC-2F-A-L26-E22	32,36	16,25	32,94	0,98
	26	55	39	EC-2F-A-L26-E55	32,53	13,17	32,94	0,99
	26	70	39	EC-2F-A-L26-E70	32,53	13,17	32,94	0,99
	35	22	66	EC-2F-A-L35-E22	53,01	26,61	55,75	0,95
	35	55	66	EC-2F-A-L35-E55	52,94	21,84	55,75	0,95
	35	70	66	EC-2F-A-L35-E70	52,91	19,64	55,75	0,95
	60	22	141	EC-2F-A-L60-E22	104,42	44,22	89,32	1,17
	60	55	141	EC-2F-A-L60-E55	105,36	35,85	89,32	1,18
	60	70	141	EC-2F-A-L60-E70	105,31	33,69	89,32	1,18
	70	55	171	EC-2F-A-L70-E55	123,90	46,45	94,91	1,31
	70	70	171	EC-2F-A-L70-E70	124,48	43,81	94,91	1,31
	80	55	201	EC-2F-A-L80-E55	128,14	35,36	99,74	1,28
	80	70	201	EC-2F-A-L80-E70	129,87	33,65	99,74	1,30
					Desvio Padrão: 33,61			

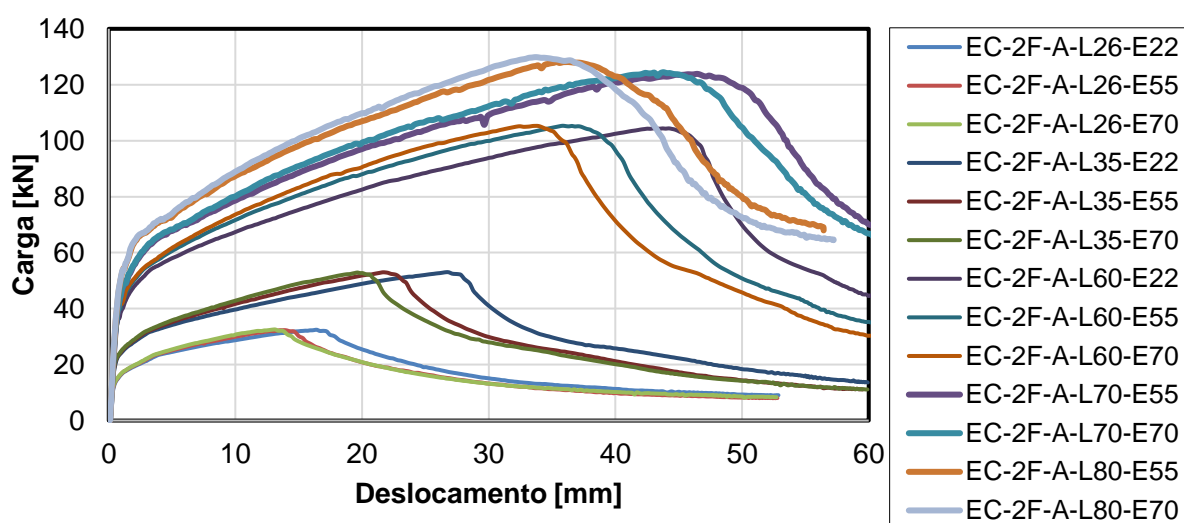


Gráfico 27 – Carga versus deslocamento dos estudos de caso com dois furos, austenítico.

Da Figura 62 a Figura 66 os estudos de caso com dois furos, na configuração de sua carga última do seu modelo numérico. A Tabela 26 apresenta os resultados das cargas máximas e seus respectivos deslocamentos para as análises numéricas de cada estudo de caso com dois furos do material ferrítico. Também são observados os valores obtidos pela EN 1993-1-4 [9].

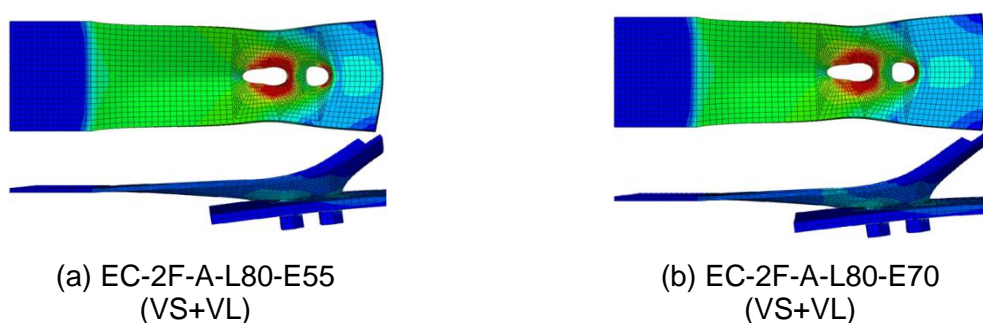
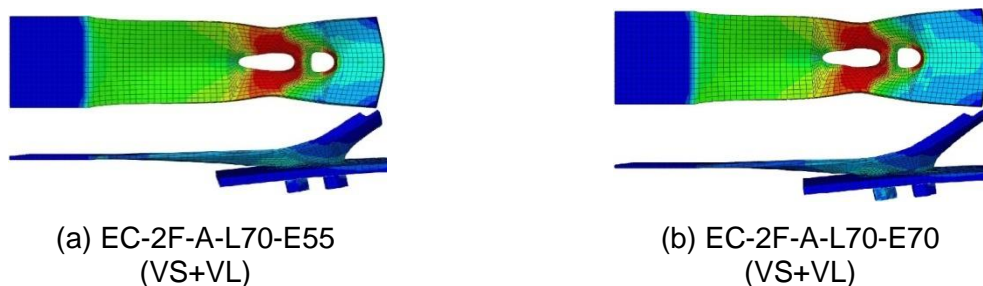
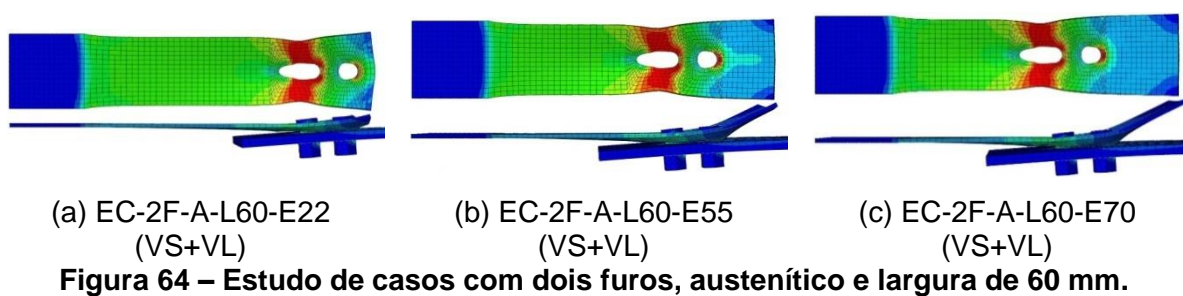
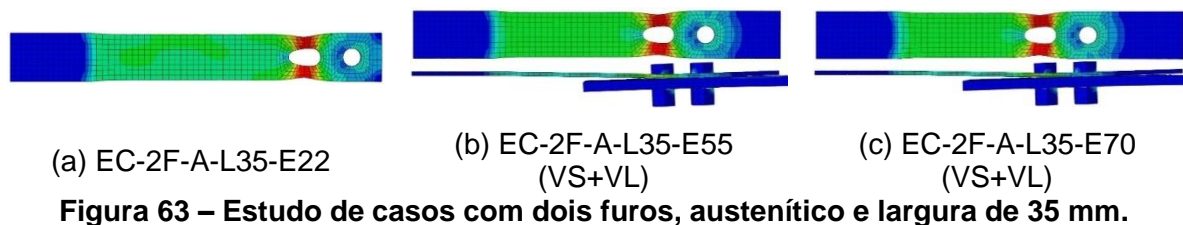
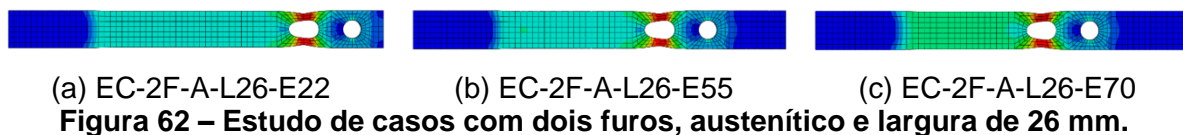


Tabela 26 – Dados geométricos, nomenclatura e alguns outros dados dos modelos em estudos de casos, ferrítico.

	L [mm]	e ₁ [mm]	A _{net} [mm ²]	Modelos	Análise Numérica		K _{r,num}	EC3 N _{t,Rd} [kN]	e ₂ /d _o	Rácio F _u e N _t [kN]
					F _{u,num} [kN]	δ _{u,num} [mm]				
FERRÍTICO	26	22	39	EC-2F-F-L26-E22	19,82	2.57	0.60	18,25	1.00	1,09
	26	55	39	EC-2F-F-L26-E55	19,80	2.50	0.60	18,25	1.00	1,08
	26	70	39	EC-2F-F-L26-E70	19,77	2.50	0.60	18,25	1.00	1,08
	35	22	66	EC-2F-F-L35-E22	32,35	4.09	0.58	30,89	1.35	1,05
	35	55	66	EC-2F-F-L35-E55	32,56	3.89	0.58	30,89	1.35	1,05
	35	70	66	EC-2F-F-L35-E70	32,56	3.70	0.58	30,89	1.35	1,05
	60	22	141	EC-2F-F-L60-E22	65,55	10.17	0.55	49,49	2.31	1,32
	60	55	141	EC-2F-F-L60-E55	65,94	7.94	0.55	49,49	2.31	1,33
	60	70	141	EC-2F-F-L60-E70	65,99	7.38	0.55	49,49	2.31	1,33
	70	55	171	EC-2F-F-L70-E55	73,99	19.84	0.51	52,59	2.69	1,41
	70	70	171	EC-2F-F-L70-E70	74,92	16.99	0.52	52,59	2.69	1,42
	80	55	201	EC-2F-F-L80-E55	80,77	16.05	0.48	55,26	3.08	1,46
	80	70	201	EC-2F-F-L80-E70	81,60	15.74	0.48	55,26	3.08	1,48

Desvio Padrão: 20,00

Já o Gráfico 28 mostra os resultados dos casos, com dois furos, para o aço inoxidável ferrítico.

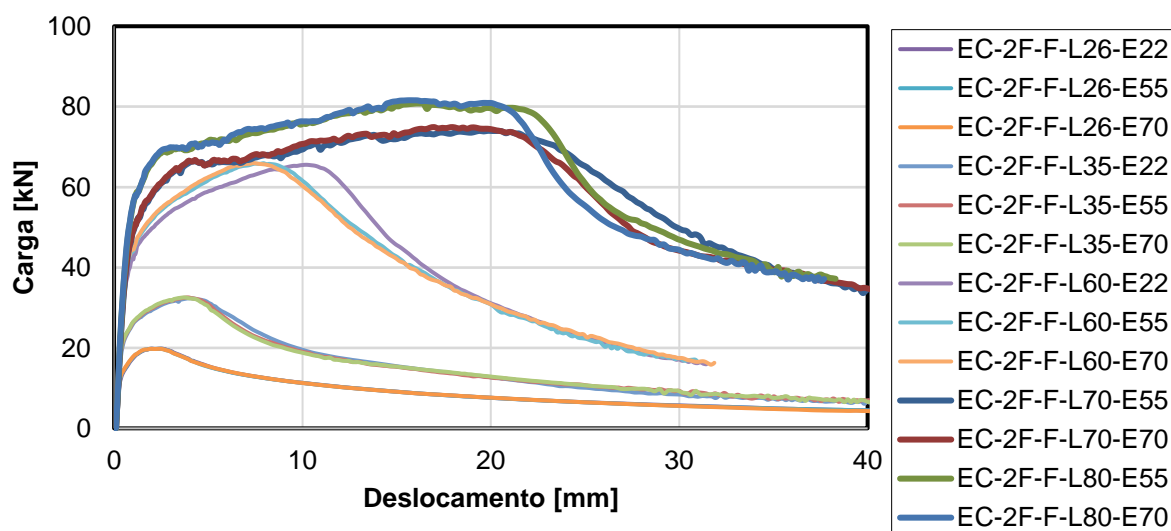
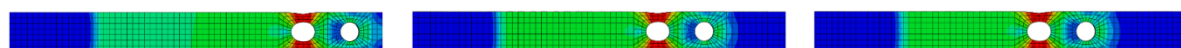


Gráfico 28 – Carga versus deslocamento dos estudos de caso com dois furos, ferrítico.

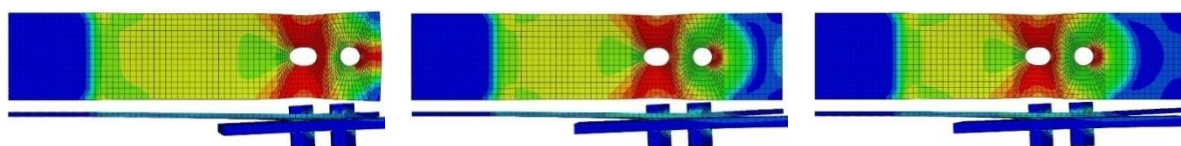
Os estudos realizados para dois furos são apresentados na Figura 67 a Figura 71, sendo a configuração referente a sua carga última.



(a) EC-2F-F-L26-E22 (b) EC-2F-F-L26-E55 (c) EC-2F-F-L26-E70
Figura 67 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 26 mm.



(a) EC-2F-F-L35-E22 (b) EC-2F-F-L35-E55 (c) EC-2F-F-L35-E70
Figura 68 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 35 mm.



(a) EC-2F-F-L60-E22 (b) EC-2F-F-L60-E55 (c) EC-2F-F-L60-E70
 (VS+VL) (VS+VL) (VS+VL)
Figura 69 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 60 mm.



(a) EC-2F-F-L70-E55 (b) EC-2F-F-L70-E70
 (VS+VL) (VS+VL)
Figura 70 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 70 mm.



(a) EC-2F-F-L80-E55 (b) EC-2F-F-L80-E70
 (VS+VL) (VS+VL)
Figura 71 – Estudo de casos com dois furos, ferrítico e largura de 80 mm.

5.1. Observações a respeito das análises numéricas

A Tabela 27 apresenta os dados de todos os modelos e estudo de caso com um furo, para comparação com o estudo base de Salih *et al.* [7], para análise das tendências segundo material utilizado e razão e_1/d_0 .

Tabela 27 – Dados do estudo numérico dos caso com um furo e razão e_1/d_0 por larguras.

Austenítico				Ferrítico			
Modelos	Análise Numérica		e_1/d_0	Modelos	Análise Numérica		e_1/d_0
	$F_{u,num}$ [kN]	$\delta_{u,num}$ [mm]			$F_{u,num}$ [kN]	$\delta_{u,num}$ [mm]	
1F-A-L50-E16.8	46,84	13,18	1,29	1F-F-L50-E16.8	25,88	3,63	1,29
1F-A-L50-E18	52,24	18,42	1,38	1F-F-L50-E18	27,56	4,32	1,38
1F-A-L50-E22	63,07	42,17	1,69	1F-F-L50-E22	32,94	5,56	1,69
EC-1F-A-L50-E26	66,81	46,60	2,00	EC-1F-F-L50-E26	38,42	6,75	2,00
1F-A-L50-E32	64,11	41,45	2,46	1F-F-L50-E32	40,04	3,82	2,46
EC-1F-A-L50-E39	62,90	46,88	3,00	EC-1F-F-L50-E39	40,10	3,33	3,00
EC-1F-A-L50-E65	65,40	44,90	5,00	EC-1F-F-L50-E65	39,81	3,16	5,00
1F-A-L90-E16.8	50,66	11,61	1,29	1F-F-L90-E16.8	25,58	2,98	1,29
1F-A-L90-E22	61,51	13,05	1,69	1F-F-L90-E22	34,06	4,23	1,69
EC-1F-A-L90-E26	73,56	32,94	2,00	EC-1F-F-L90-E26	40,53	10,28	2,00
1F-A-L90-E32	76,27	29,75	2,46	1F-F-L90-E32	49,48	12,55	2,46
EC-1F-A-L90-E39	70,28	22,13	3,00	EC-1F-F-L90-E39	47,19	2,20	3,00
EC-1F-A-L90-E65	75,28	31,75	5,00	EC-1F-F-L90-E65	47,18	2,21	5,00

Os Gráfico 29 e o Gráfico 30 apresentam dados com base na Tabela 27 que mostra uma tendência das resistências a um valor e que os valores de e_1 limites ($2 \leq e_1/d_0 \leq 3$), sendo a região de mudança da tangente do gráfico. Logo, antes desta região o modo de falha é um (modo B ou C) e depois passa a ser outro (modo A ou F). Estes gráficos mostram que em torno do valor de parâmetros de $e_1/d_0 = 2,5$ a resistência passou a ter uma tendência para valores de carga última, valor a partir do qual também ocorre o efeito *curling* e uma mudança de modos de falhas, isto é, antes de $e_1/d_0 = 2,5$ predomina o modo de falha de rasgamento da chapa (modo B) e depois deste valor, o predomínio passa a ser de esmagamento da chapa (modo C). Porém, para valores da norma, esse limite se dá um pouco depois, para valores de $e_1/d_0 \geq 3$.

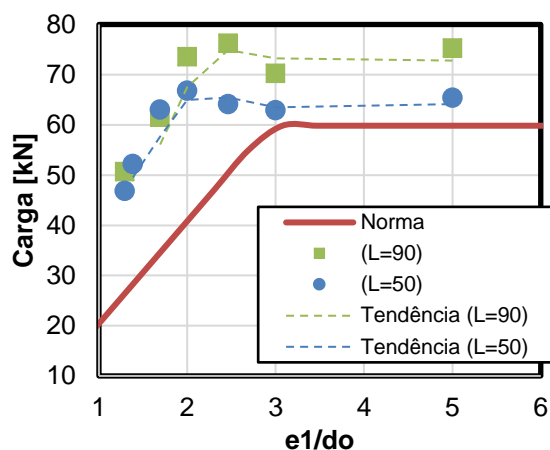


Gráfico 29 – Carga versus razão e_1/d_o , austenítico, com um furo.

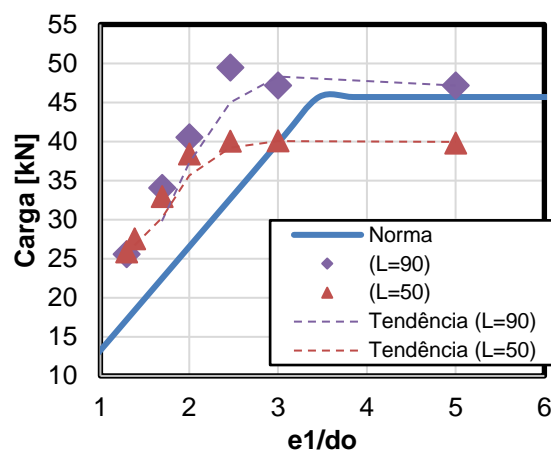


Gráfico 30 – Carga versus razão e_1/d_o , ferrítico, com um furo.

A Tabela 28 apresenta dados, de todos os modelos e estudo de caso com dois furos, para comparação com base nos estudos de Salih *et al.* [8], considerando a análise utilizando como razão e_2/d_o e $k_{r,num}$. Este valor de $k_{r,num}$ é desenvolvido da Equação (23), gerando a Equação (24), já o k_r da tabela em questão é o mesmo da Equação (25).

$$F_{u,rd} = F_{r,num} = \frac{k_{u,num} \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{m2}} \quad (23)$$

$$k_{r,num} = \left(\frac{F_{u,num}}{A_{net} \times f_u} \right) \times \gamma_{m2} \quad (24)$$

$$k_r = \left[1 + 3 \times r \left(\frac{d_o}{u} - 0,3 \right) \right] \leq 1,0 \quad (25)$$

Os Gráfico 31 e Gráfico 32 apresentam valores da Tabela 28, sendo referente a comparação com os estudos de Salih *et al.* [8] e valores de k_r da equação (25).

Tabela 28 – Dados do estudo numérico dos caso com dois furos e razão e_2/d_o com valores de $k_{r,num}$.

AUSTENÍTICO				FERRÍTICO			
Modelos	Análise Numérica	e_2/d_o	$K_{r,num}$	Modelos	Análise Numérica	e_2/d_o	$K_{r,num}$
	$F_{u,num}$ [kN]				$F_{u,num}$ [kN]		
EC-2F-A-L26-E22	32,36	1,00	0,98	EC-2F-F-L26-E22	19,82	1,00	1,09
EC-2F-A-L26-E55	32,31	1,00	0,98	EC-2F-F-L26-E55	19,80	1,00	1,08
EC-2F-A-L26-E70	32,53	1,00	0,99	EC-2F-F-L26-E70	19,77	1,00	1,08
EC-2F-A-L35-E22	53,01	1,35	0,95	EC-2F-F-L35-E22	32,35	1,35	1,05
EC-2F-A-L35-E55	52,94	1,35	0,95	EC-2F-F-L35-E55	32,56	1,35	1,05
EC-2F-A-L35-E70	52,91	1,35	0,95	EC-2F-F-L35-E70	32,56	1,35	1,05
2F-A-L50-E22	83,49	1,92	0,89	2F-F-L50-E22	52,57	1,92	1,01
2F-A-L50-E55	86,29	1,92	0,92	2F-F-L50-E55	52,74	1,92	1,02
2F-A-L50-E60	86,01	1,92	0,92	2F-F-L50-E60	52,64	1,92	1,01
2F-A-L50-E70	83,85	1,92	0,89	2F-F-L50-E70	52,69	1,92	1,01
EC-2F-A-L60-E22	104,42	2,31	0,88	EC-2F-F-L60-E22	65,55	2,31	0,99
EC-2F-A-L60-E55	105,36	2,31	0,88	EC-2F-F-L60-E55	65,94	2,31	1,00
EC-2F-A-L60-E70	105,31	2,31	0,88	EC-2F-F-L60-E70	65,99	2,31	1,00
EC-2F-A-L70-E55	123,90	2,69	0,86	EC-2F-F-L70-E55	73,99	2,69	0,92
EC-2F-A-L70-E70	124,48	2,69	0,86	EC-2F-F-L70-E70	74,92	2,69	0,94
EC-2F-A-L80-E55	128,14	3,08	0,75	EC-2F-F-L80-E55	80,77	3,08	0,86
EC-2F-A-L80-E70	129,87	3,08	0,76	EC-2F-F-L80-E70	81,60	3,08	0,87
2F-A-L90-E22	131,74	3,46	0,68	2F-F-L90-E22	69,40	3,46	0,64
2F-A-L90-E55	134,94	3,46	0,69	2F-F-L90-E55	86,30	3,46	0,80
2F-A-L90-E70	135,65	3,46	0,70	2F-F-L90-E70	87,27	3,46	0,81

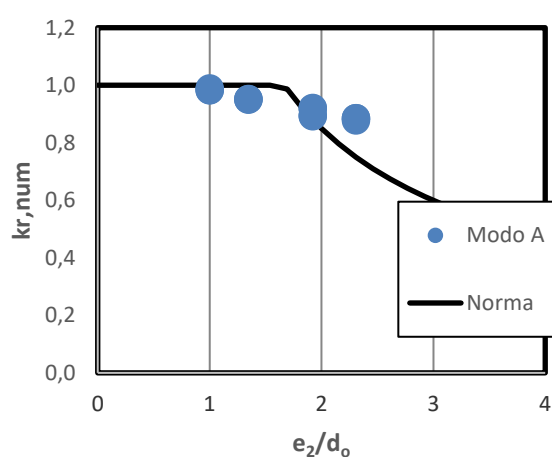


Gráfico 31 – Valores de $k_{r,num}$ versus razão e_2/d_o - austenítico.

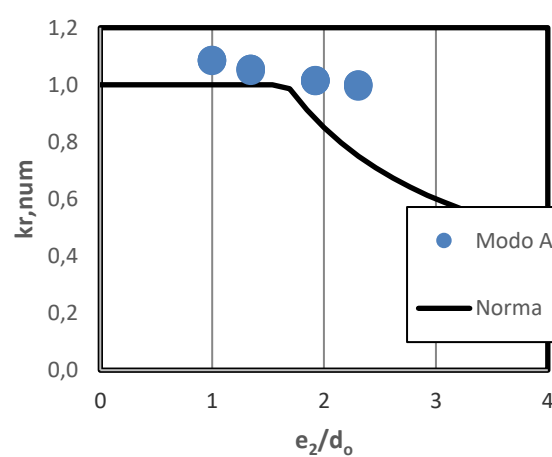


Gráfico 32 – Valores de $k_{r,num}$ versus razão e_2/d_o - ferrítico.

Os Gráfico 31 e Gráfico 32 comparam valores obtidos para modo de ruptura de rasgamento da seção líquida (modo A), conforme a norma EN 1993-1-4 [9] e os resultados das simulações numéricas, com dois furos. Pode-se concluir que para os casos em que houve o modo de falha A, os resultados foram próximos ao da norma EN 1993-1-4 [9], sendo que para o aço inoxidável ferrítico, os casos com modo A, estão acima da curva desta norma. Para os modelos fora do modo de falha A, a análise dos gráficos permite observar uma discrepância do que era esperado.

5.2. Análise dos resultados obtidos

As Tabela 29 a Tabela 32 mostram comparações de valores de resistência segundo a norma EN 1993-1-4 [9] ($N_{t,EC3}$), com os valores de carga última numéricos ($N_{u,num}$) e experimental ($N_{u,exp}$). São também comparados os valores de resistência obtidos através dos estudos de Salih *et al.* [7], [8]. A Tabela 29 mostra valores para austenítico com um furo. Observa-se que para todos os valores obtidos, a norma EN 1993-1-4 [9] se mostrou conservadora em todas as análises. Mas a comparação de $N_{u,num}/N_{t,Salih}$ com $N_{u,num}/N_{t,EC3}$ desta tabela mostra que o dimensionamento baseado em estudos de Salih *et al.* [7], [8] pode ser mais econômico do que a norma EN 1993-1-4 [9].

A Tabela 30 mostra valores para ferrítico com um furo. Pode-se verificar que o mesmo aconteceu para este conjunto de ensaios, onde todos os valores obtidos pela norma EN 1993-1-4 [9] foram conservadores. A Tabela 31 mostra valores para austenítico com dois furos, também possuindo valores conservadores para todos os casos. Porém, quando comparados com a análises numéricas não houve um padrão, sendo que para os casos com menor largura ($L = 26$ mm e 35 mm) a norma EN 1993-1-4 [9] se mostrou menor, apesar de estar próximo. Vale lembrar que nesta dissertação o coeficiente γ_{m2} é igual a 1,00, logo é esperado que tenha esta proximidade de valores. Nos demais casos, dentro desta comparação esta razão de comparação se mostrou conservadora. A comparação de $N_{u,num}/N_{t,Salih}$ com $N_{u,num}/N_{t,EC3}$ para a Tabela 31 continua mostrando que o dimensionamento baseado em estudos de Salih *et al.* [7], [8] pode ser mais econômico do que a norma EN 1993-1-4 [9].

Tabela 29 – Comparação dos valores, austenítico com um furo.

Nomenclaturas	N _{t,EC3} [KN]	Modo de Falha	N _{u,num} [KN]	N _{u,Exp} [KN]	N _{t,Salih} [KN]	$\frac{N_u, num}{N_t, EC3}$	$\frac{N_u, Exp}{N_t, EC3}$	$\frac{N_t, Salih}{N_t, EC3}$	$\frac{N_u, num}{N_t, Salih}$
1F-A-L50-E16.8	26,39	B	46,84	44,02	34,11	1,77	1,67	1,29	1,37
1F-A-L50-E18	28,28	B	52,24	50,31	36,55	1,85	1,78	1,29	1,43
1F-A-L50-E22	34,56	C	63,07	68,47	44,67	1,82	1,98	1,29	1,41
EC-1F-A-L50-E26	40,84	B	66,81		52,79	1,64		1,29	1,27
1F-A-L50-E32	50,27	C	64,11	47,65	64,97	1,28	0,95	1,29	0,99
EC-1F-A-L50-E39	59,84	C	62,90		79,19	1,05		1,32	0,79
EC-1F-A-L50-E65	59,84	C	65,40		79,19	1,09		1,32	0,83
1F-A-L90-E16.8	26,39	B	50,66	46,96	34,11	1,92	1,78	1,29	1,49
1F-A-L90-E22	34,56	B	61,51	51,47	44,67	1,78	1,49	1,29	1,38
EC-1F-A-L90-E26	40,84	B	73,56		52,79	1,80		1,29	1,39
1F-A-L90-E32	50,27	C	76,27	93,07	64,97	1,52	1,85	1,29	1,17
EC-1F-A-L90-E39	59,84	C	70,28		79,19	1,17		1,32	0,89
EC-1F-A-L90-E65	59,84	C	75,28		79,19	1,26		1,32	0,95
					Média=	1,53	1,64	1,30	1,18
					Desvio Padrão=	0,32	0,34	0,01	0,26

Tabela 30 – Comparação dos valores, ferrítico com um furo.

Nomenclaturas	N _{t,EC3} [KN]	Modo de Falha	N _{u,num} [KN]	N _{u,Exp} [KN]	N _{t,Salih} [KN]	$\frac{N_u, num}{N_t, EC3}$	$\frac{N_u, Exp}{N_t, EC3}$	$\frac{N_t, Salih}{N_t, EC3}$	$\frac{N_u, num}{N_t, Salih}$
1F-F-L50-E16.8	17,15	B	25,88	29,50	18,90	1,51	1,72	1,10	1,37
1F-F-L50-E18	18,38	B	27,56	30,46	20,25	1,50	1,66	1,10	1,36
1F-F-L50-E22	22,46	B	32,94	36,07	24,75	1,47	1,61	1,10	1,33
EC-1F-F-L50-E26	26,55	B	38,42		29,25	1,45		1,10	1,31
1F-F-L50-E32	32,67	C	40,04	37,69	36,00	1,23	1,15	1,10	1,11
EC-1F-F-L50-E39	39,82	C	40,10		43,87	1,01		1,10	0,91
EC-1F-F-L50-E65	33,34	C	39,81		43,87	1,19		1,32	0,91
1F-F-L90-E16.8	17,15	B	25,58	26,42	18,90	1,49	1,54	1,10	1,35
1F-F-L90-E22	22,46	B	34,06	39,34	24,75	1,52	1,75	1,10	1,38
EC-1F-F-L90-E26	26,55	B	40,53		29,25	1,53		1,10	1,39
1F-F-L90-E32	32,67	B	49,48	56,64	36,00	1,51	1,73	1,10	1,37
EC-1F-F-L90-E39	39,82	B	47,19		43,87	1,19		1,10	1,08
EC-1F-F-L90-E65	33,34	C	47,18		43,87	1,42		1,32	1,08
					Média=	1,39	1,59	1,13	1,23
					Desvio Padrão=	0,17	0,21	0,08	0,18

Tabela 31 – Comparação dos valores, austenítico com dois furos.

Nomenclaturas	$N_{t,EC3}$ [KN]	Modo de Falha	$N_{u,num}$ [KN]	$N_{u,Exp}$ [KN]	$N_{t,Salih}$ [KN]	$\frac{N_{u,num}}{N_{t,EC3}}$	$\frac{N_{u,Exp}}{N_{t,EC3}}$	$\frac{N_{t,Salih}}{N_{t,EC3}}$	$\frac{N_{u,num}}{N_{t,Salih}}$
EC-2F-A-L26-E22	32,94	A	32,36		32,94	0,98		1,00	0,98
EC-2F-A-L26-E55	32,94	A	32,31		32,94	0,98		1,00	0,98
EC-2F-A-L26-E70	32,94	A	32,53		32,94	0,99		1,00	0,99
EC-2F-A-L35-E22	55,75	A	53,01		55,75	0,95		1,00	0,95
EC-2F-A-L35-E55	55,75	A	52,94		55,75	0,95		1,00	0,95
EC-2F-A-L35-E70	55,75	A	52,91		55,75	0,95		1,00	0,95
2F-A-L50-E22	82,51	A	83,49	91,94	93,76	1,01	1,11	1,14	0,89
2F-A-L50-E55	82,51	A	86,29	87,68	93,76	1,05	1,06	1,14	0,92
2F-A-L50-E60	82,51	A	86,01	90,04	93,76	1,04	1,09	1,14	0,92
2F-A-L50-E70	82,51	A	83,85	87,28	93,76	1,02	1,06	1,14	0,89
EC-2F-A-L60-E22	89,32	A	104,42		119,10	1,17		1,33	0,88
EC-2F-A-L60-E55	89,32	A	105,36		119,10	1,18		1,33	0,88
EC-2F-A-L60-E70	89,32	A	105,31		119,10	1,18		1,33	0,88
EC-2F-A-L70-E55	94,91	A	123,90		144,44	1,31		1,52	0,86
EC-2F-A-L70-E70	94,91	A	124,48		144,44	1,31		1,52	0,86
EC-2F-A-L80-E55	99,74	A	128,14		169,78	1,28		1,70	0,85
EC-2F-A-L80-E70	99,74	A	129,87		169,78	1,30		1,70	0,76
2F-A-L90-E22	93,79	F	131,74		195,11	1,40		2,08	0,68
2F-A-L90-E55	104,06	A	134,94	126,20	195,11	1,30	1,21	1,88	0,69
2F-A-L90-E70	104,06	A	135,65	124,93	195,11	1,30	1,20	1,88	0,70
					Média=	1,13	1,12	1,34	0,87
					Desvio Padrão=	0,15	0,07	0,35	0,10

Para as comparações com o estudo proposto [8] a norma mostrou estar muito abaixo em todos os casos. Porém, observa-se na Tabela 31 que quase todos os modos de falha foram por rasgamento da seção líquida (modo A) e para este modo, o estudo em questão não leva em consideração o coeficiente γ_{m2} , k_r e a tensão reduzida. Conclui-se assim que para o modo de falha por rasgamento na seção líquida este estudo aumenta a insegurança no dimensionamento.

A Tabela 32 mostra valores para ferrítico com dois furos. Quando comparado com as análises experimentais e/ou numéricas, os resultados da norma EN 1993-1-4 [9] representam uma forma conservadora de análise. A comparação feita com o estudo proposto [8] também apresenta o resultado da norma EN 1993-1-4 [9] abaixo do obtido para todos os casos.

Tabela 32 – Comparação dos valores, ferrítico com dois furos.

Nomenclaturas	$N_{t,EC3}$ [KN]	Modo de Falha	$N_{u,num}$ [KN]	$N_{u,Exp}$ [KN]	$N_{t,Salih}$ [KN]	$\frac{N_{u,num}}{N_{t,EC3}}$	$\frac{N_{u,Exp}}{N_{t,EC3}}$	$\frac{N_{t,Salih}}{N_{t,EC3}}$	$\frac{N_{u,num}}{N_{t,Salih}}$
EC-2F-F-L26-E22	18,25	A	19,82		18,25	1,09		1,00	1,09
EC-2F-F-L26-E55	18,25	A	19,80		18,25	1,08		1,00	1,08
EC-2F-F-L26-E70	18,25	A	19,77		18,25	1,08		1,00	1,08
EC-2F-F-L35-E22	30,89	A	32,35		30,89	1,05		1,00	1,05
EC-2F-F-L35-E55	30,89	A	32,56		30,89	1,05		1,00	1,05
EC-2F-F-L35-E70	30,89	A	32,56		30,89	1,05		1,00	1,05
2F-F-L50-E22	45,71	A	52,57	54,76	51,94	1,15	1,20	1,14	1,01
2F-F-L50-E55	45,71	A	52,74	57,50	51,94	1,15	1,26	1,14	1,02
2F-F-L50-E60	45,71	A	52,64	57,81	51,94	1,15	1,26	1,14	1,01
2F-F-L50-E70	45,71	A	52,69	57,05	51,94	1,15	1,25	1,14	1,01
EC-2F-F-L60-E22	49,49	A	65,55		65,98	1,32		1,33	0,99
EC-2F-F-L60-E55	49,49	A	65,94		65,98	1,33		1,33	1,00
EC-2F-F-L60-E70	49,49	A	65,99		65,98	1,33		1,33	1,00
EC-2F-F-L70-E55	52,59	A	73,99		80,02	1,41		1,52	0,92
EC-2F-F-L70-E70	52,59	A	74,92		80,02	1,42		1,52	0,94
EC-2F-F-L80-E55	55,26	A	80,77		94,06	1,46		1,70	0,86
EC-2F-F-L80-E70	55,26	A	81,60		94,06	1,48		1,70	0,87
2F-F-L90-E22	33,34	B	69,40	70,49	108,10	2,08	2,11	3,24	0,64
2F-F-L90-E55	57,65	A	86,30	92,27	108,10	1,50	1,60	1,88	0,80
2F-F-L90-E70	57,65	A	87,27	96,94	108,10	1,51	1,68	1,88	0,81
					Média=	1,29	1,48	1,40	0,96
					Desvio Padrão=	0,25	0,34	0,53	0,12

Para os casos com dois furos a comparação de $N_{u,num}/N_{t,Salih}$ com $N_{u,num}/N_{t,EC3}$ da Tabela 31 e Tabela 32 tiveram quase todos os casos mostrando que o dimensionamento baseado em estudos de Salih *et al.* [7], [8] pode ser mais econômico do que a norma EN 1993-1-4 [9].

Nos Gráfico 33, Gráfico 34, Gráfico 35 e Gráfico 36 apresenta superfícies geradas numericamente pelo tipo de modelo e material. Em todos estes gráficos apresentam aumento proporcional da resistência conforme aumenta os valores dos parâmetros em estudo.

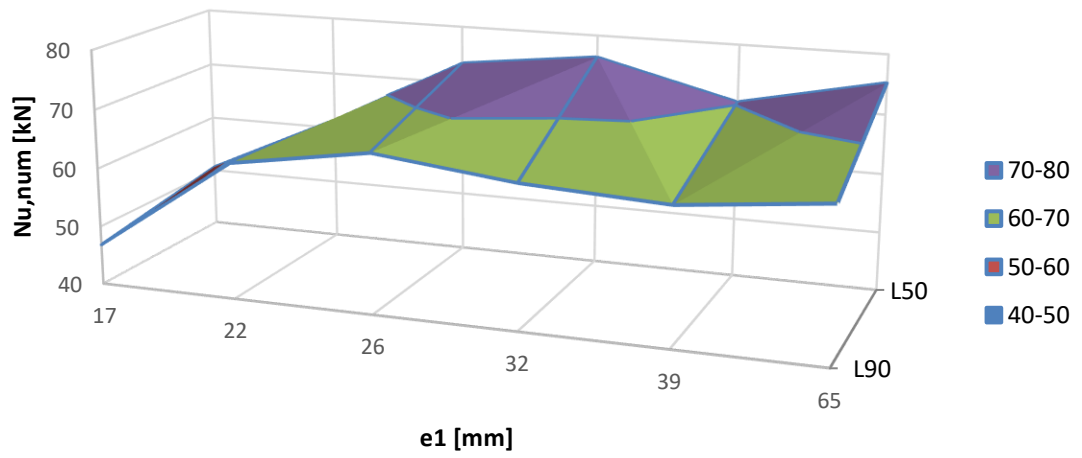


Gráfico 33 – Superfície dos modelos com um furo, austenítico

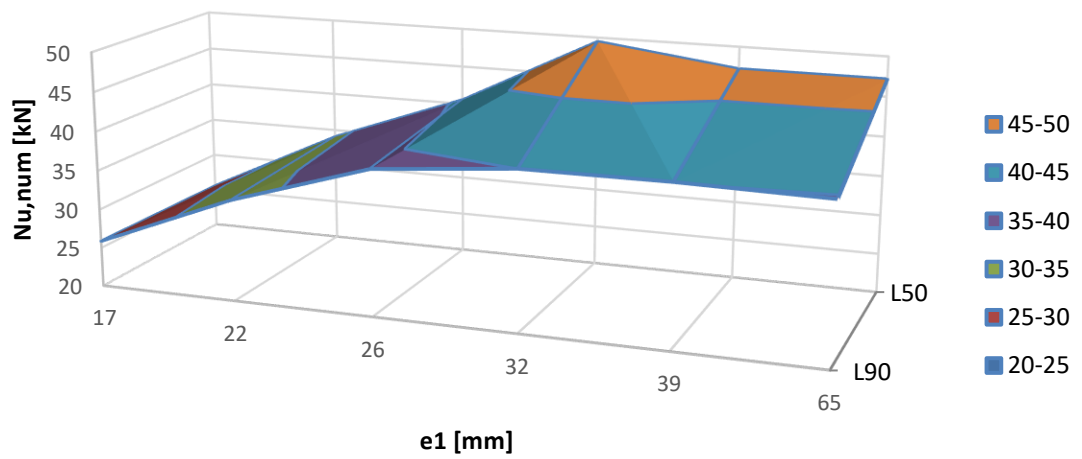


Gráfico 34 – Superfície dos modelos com um furo, ferrítico

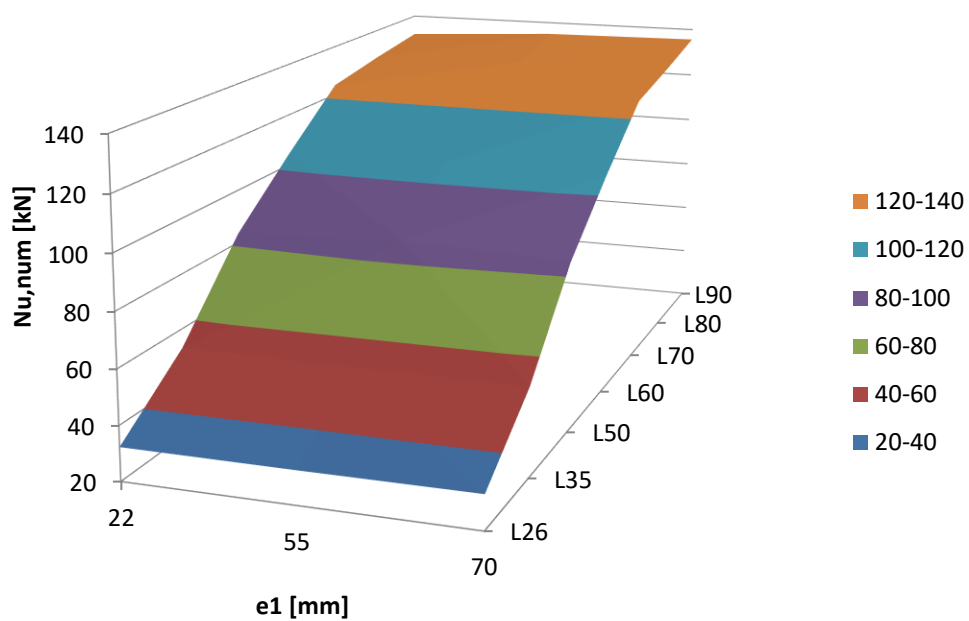


Gráfico 35 – superfície dos modelos com dois furos, austenítico

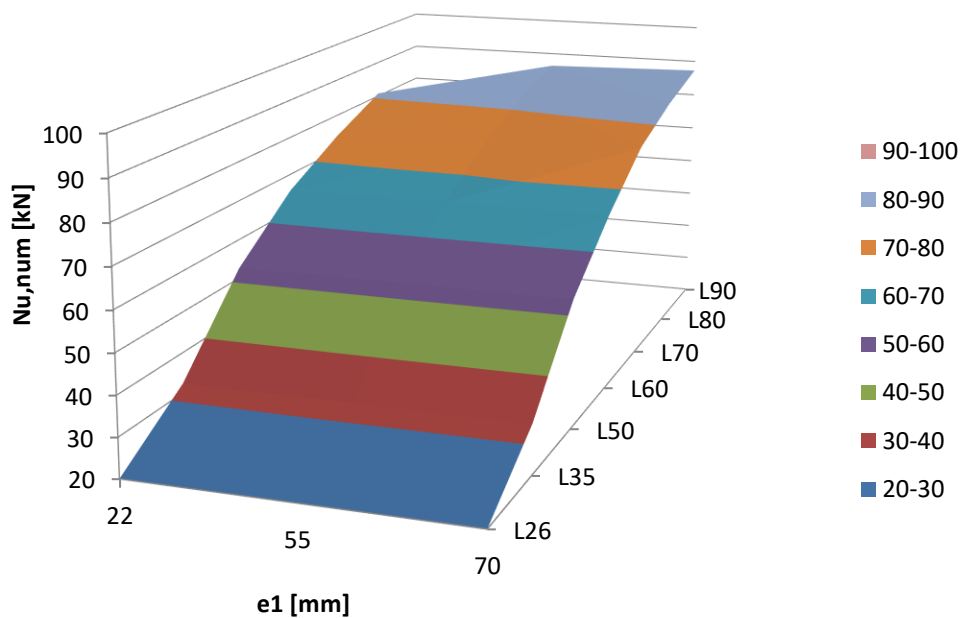


Gráfico 36 – Superfície dos modelos com dois furos, ferrítico

CONCLUSÕES

Este estudo experimental e numérico buscou estudar o comportamento estrutural de ligações aparafusadas com chapas em aço inoxidável austenítico A304 e ferrítico 430, submetidas à tração, com duas configurações aparafusadas, uma com apenas um parafuso e outra com dois parafusos, no mesmo sentido do carregamento. Foram avaliados 28 modelos experimentais e numéricos, além de 38 modelos de estudo de caso numéricos, totalizando 66 modelos diferentes. Tais modelos foram comparados as especificações normativas e estudos anteriores acerca deste assunto.

Observou-se que para modelos com um furo, a ocorrência de efeito *curling*, em geral, apresentou uma clara mudança na tangente do gráfico no momento em que tal efeito começa a ocorrer, sendo mais evidente nos aços inoxidáveis austenítico, pois o efeito ocorreu no trecho de comportamento plástico. Para os casos dos aço inoxidáveis ferríticos tal efeito não é tão claro, uma vez que ocorreu no trecho de transição de comportamento (elástico para o plástico). Observou-se que o formato da curva carga *versus* deslocamento apresentou comportamento distinto podendo ser mais retilíneo quando se trata de modo de falha por rasgamento da seção líquida (modo A), ou ser mais curvilíneo quando se trata de modo de falha por rasgamento da chapa (modo B).

A ocorrência de efeito *curling* para modelos com dois furos, apesar de quase imperceptível no gráfico, ocorreu próximo da transição do comportamento elástico para o comportamento plástico. Para ser possível notar esse efeito, deveria haver uma mudança na tangente da curva no instante em que ele ocorre, o que na maioria dos casos ensaiados com dois furos não foi notado graficamente. Tais pontos foram anotados no momento de realização do ensaio, coincidindo, na maioria dos casos, neste trecho de transição.

Na análise numérica, os modelos com um furo tiveram uma diferença percentual muito variada, sendo maior nos modelos em que de e_1 limite ($e_1 = 22$ mm e 32 mm) e que alguns destes aparece o efeito *curling*. Tirando os resultados deste e_1 limite, os resultados numéricos, para um furo, do material austenítico tiveram suas análises numéricas maiores do que a experimental. Para o material ferrítico ocorreu o inverso. Já para os modelos com dois furos a diferença percentual não tem uma

tendência no seu valor. Os resultados numéricos para dois furos com largura menor ($L = 50$ mm), para ambos os materiais, tiveram suas análises numéricas menores do que a experimental. Para o caso de larguras maiores ($L = 90$ mm) não tiveram uma regularidade em cada caso.

Com o auxílio dos estudos de Salih *et al.* [7],[8] pode-se verificar que para os valores e_1 limite, que estão entre o intervalo de $e_1/d_0 = 2$ e $e_1/d_0 = 3$, os modelos com um furo apresentam uma incerteza nos resultados, podendo ter neste caso uma diferença percentual próximo de 34% na sua carga. Porém, para as análises nos modelos com dois furos baseada nos estudos de Salih *et al.* [7], [8] há uma boa convergência em seus valores absolutos.

Para os modelos com um furo a ocorrência do efeito *curling* acaba limitando a resistência dos casos. O efeito *curling*, quando na mudança de modos de falhas A para B, pode estar ocorrendo apenas um esmagamento da chapa (modo C). Ainda na análise numérica mantiveram o mesmo modo de falha dos ensaios experimentais e seus efeitos, isto é, foram observados o surgimento do efeito *curling*.

Em termos gerais, o aço inoxidável ferrítico comporta-se mais próximos das normas em estudo do que o austenítico. Nos modelos com um furo foi observado que o efeito *curling* limita a resistência última próximo de um valor constante, já para os modelos com dois furos se observou que o coeficiente k_r estão próximos de um, assim a utilização deste coeficiente no dimensionamento, para os casos estudados, não representa a realidade para os modos de falha com rasgamento da seção líquida.

Na maioria dos casos a norma EN 1993-1-4 [9] mostrou ser conservadora quando comparadas com os ensaios experimentais e análises numéricas, mas para comparação com os estudos propostos de Salih *et al.* [7], [8] podem ser conservadores, principalmente para os casos que tenham modo de falha de rasgamento da seção líquida. Para a comparação de $N_{u,num}/N_{t,Salih}$ com $N_{u,num}/N_{t,EC3}$ dos modelos o dimensionamento baseado em estudos de Salih *et al.* [7], [8] é mais econômico do que a norma EN 1993-1-4 [9].

Trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros pode ser citada a continuação e aprofundamento do presente trabalho, com a realização de mais estudos experimentais e numéricos que possam fornecer resultados suficientes para uma melhor compreensão do comportamento de elementos estruturais em aço inoxidável. Seria muito importante estudar melhor os valores limites de modos de ruína, $22 \text{ mm} \leq e_1 \leq 32 \text{ mm}$, principalmente para um furo.

Ainda poderiam ser utilizadas outras configurações de placas para obtenção de uma gama maior de resultados para estudo mais aprofundado do comportamento individual das placas submetidas à tração, como também, poderia contemplar outras ligas de aço inoxidável, como os duplex.

Para um melhor entendimento computacional sobre comportamento plástico do material poderia ser realizado estudo do comportamento de dano deste material.

Com a realização de mais estudos experimentais, torna-se possível a execução de análises paramétricas com elementos finitos. A partir disto, seria possível propor alguma formulação nas normas de dimensionamento de estruturas em aço inoxidável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Steel rates from around the world. Disponível em: <http://www.worldsteelprices.com>. Acesso em 2017.
- [2] Focus on reval stainless steel reinforcing bar. Disponível em: <http://www.valbruna.co.uk>. Acesso em 2016.
- [3] Freire R. Estudo experimental e numérico do comportamento de peças tracionadas em aço inoxidável. 102f. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016
- [4] Tipos de aço inoxidável. Disponível em: <http://www.abinox.org.br/upfiles/arquivos/biblioteca/tipos-de-acos-inoxidaveis.pdf>. Acesso em 2016.
- [5] Santos J. Estudo do Comportamento Estrutural de Elementos em Aço Inoxidável. 259f. Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro. 2014
- [6] Abaqus, Inc. Abaqus. Ver.6.12 Analysis User's Manual. 2016.
- [7] Salih EL, Gardner L, Nethercot DA. Bearing Failure in Stainless Steel Bolted Connections. Elsevier Journal, Engineering Structure 33 (2011) 549-562.
- [8] Salih EL, Gardner L, Nethercot DA. Numerical investigation of Net Section Failure in Stainless Steel Bolted Connections. Elsevier Journal, Journal of Constructional Steel Research 66 (2010) 1455-1466.
- [9] EN 1993-1-4: Design of steel structures – Part 1–4: General rules – Supplementary rules for stainless steels. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2006.

- [10] Dados da Ponte Hélix, Portal metálica, Disponível em: www.megaengenharia.blogspot.com.br. Acesso em 2017.
- [11] EN 1993-1-8: Design of steel structures – Parte 1.8: Design of joints. CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2010.
- [12] Kim TS, Kuwamura H, Cho TJ. A parametric study on ultimate strength of single shear bolted connections with curling. Elsevier Journal, Thin-Walled Structures 46 (2008) 38-53.
- [13] Bouchair A, Avereseng J, Abidelah A. Analysis of the behaviour of stainless steel bolted connections, Elsevier Journal, Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 1264-1274.
- [14] Kim TS, Kuwamura H, Cho TJ, Kim S, Lee Y. Investigation on ultimate strength of thin-walled steel single shear bolted connections with two bolts using finite element analysis. Elsevier Journal, Thin-Walled Structures 47 (2009) 1191-1202.
- [15] Silva AT. Modelagem numérica de elementos tracionados em aço inoxidável com parafusos defasados. 133f. Dissertação de Mestrado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro. 2009.
- [16] Moze P, Beg D. A complete study of bearing stress in single bolt connections. Elsevier Journal, Journal of Constructional Steel Research 95 (2014) 126-140.
- [17] Kim TS, Yoo JH, Roeder CW. Experimental investigation on strength and curling influence of bolted connections in thin-walled carbon steel. Elsevier Journal, Thin-Walled Structures 91 (2015) 1-12.
- [18] Design Manual of Light-Weight Stainless Steel Structures. Stainless Steel Building Association of Japan (SSBA), 2006.

- [19] Ansys, Inc. Theory Reference (version 11.0), 2007.
- [20] NBR6673 – Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas a tração; Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de 1981.
- [21] Huang Y, Young B. The art of coupon teste. Journal of Constructiinal Steel Research - Departament of Civil Engineering, The University of Hong Kong, 2014.
- [22] Excel Sensores Indústria e Comercio de Exportação Ltda, Disponível em: <http://www.excelsensor.com.br/>. Acesso em 2017.
- [23] NBR8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações; Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de 2008
- [24] Fan L, Rondal J, Cescotto S. Finite element modeling of single lap screw connections in steel sheeting under static shear. Thin-Walled Structures1997;27(2):165–85.
- [25] Kamei Y, Ikehata B, Nishimura N. An analytical study on classification of limit states of hsfg bolted joints in tension. Journal of Structural and Earthquake - Engineering Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1998;584/I-42:243–53.
- [26] Design Manual of Light-Weight Stainless Steel Structures. Stainless Steel Building Association of Japan (SSBA), 2006.
- [27] Gomes V. Análise da Robustez de Pórticos de Aço com Ligação Semirrígida. 154f. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.