



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Raphael Freire

**Estudo experimental e numérico do comportamento de peças
tracionadas em aço inoxidável**

Rio de Janeiro

2016

Raphael Freire

**Estudo experimental e numérico do comportamento de peças tracionadas em
aço inoxidável**



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. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco
Prof. André Tenchini da Silva
Prof. João de Jesus dos Santos

Rio de Janeiro

2016

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

F866 Freire, Raphael.

Estudo experimental e numérico do comportamento de peças tracionadas em aço inoxidável / Raphael Freire. – 2016.
104f.

Orientadores: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, André Tenchini da Silva, João de Jesus dos Santos.

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

1. Engenharia Civil. 2. Aço inoxidável - Dissertações. 3. Ligações parafusadas - Dissertações. 4. Método dos elementos finitos - Dissertações. I. Vellasco, Pedro Colmar da Silva. II. Silva, André Tenchini da. III. Santos, João de Jesus dos. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. V. Título.

CDU 624.04

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Raphael Freire

**Estudo experimental e numérico do comportamento de peças tracionadas em
de aço inoxidável**

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.

Aprovada em:

Banca Examinadora:

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. André Tenchini da Silva
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. João de Jesus dos Santos
Departamento de Engenharia Civil - CEFET- RJ

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Faculdade de Engenharia - UERJ

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

Rio de Janeiro

2016

DEDICATÓRIA

A Deus e a minha família, por permitirem mais essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Pedro Vellasco, Prof. Dr. André Tenchini e Prof. Dr. João Santos 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 Lima e Prof. Dr. Pedro Vellasco pelo incentivo dado para que eu ingressasse no mestrado.

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

A UERJ, pois sem ela não poderia ter realizado esta conquista.

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

Aos técnicos 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.

RESUMO

FREIRE, Raphael. *Estudo experimental e numérico do comportamento de peças tracionadas em aço inoxidável*. 2016. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

O uso do aço inoxidável na construção civil vem aumentando consideravelmente nos últimos anos. Isto deve-se a preocupação do setor em projetos mais sustentáveis e ecologicamente corretos. Trata-se de um material que apresenta excelente desempenho ao longo de sua vida útil, com baixo custo de manutenção, sendo altamente reciclável. As normas atuais de projeto de aço inoxidável são, em grande parte, baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas desenvolvidas com aço carbono. Todavia, o aço inoxidável apresenta quatro curvas não lineares tensão *versus* deformação (tensão e compressão, paralela e perpendicular a laminação do material), sem patamar de escoamento e região de encruamento claramente definidos, modificando assim, o comportamento global das estruturas que o utilizam. Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de elementos estruturais aparafusados submetidos à tração, em diferentes tipos de aço inoxidável (austenítico 304, duplex 2205 e ferrítico 430). Para tal, apresenta-se um programa experimental e desenvolvimento de modelo numérico baseado no método do elementos finitos através do programa Abaqus. Foram executadas e modeladas duas configurações distintas de placa para cada tipo de material, e verificados, os estados limites últimos na ruptura. Os resultados obtidos mostram que as normas ainda são bastante conservadoras no dimensionamento de ligações em aço inoxidável, principalmente no caso do aço austenítico, que apresenta maior capacidade de deformação do que o ferrítico e duplex. Para isso o método da resistência contínua aparece como um método alternativo de dimensionamento, pois leva-se em conta o efeito benéfico do endurecimento por encruamento do material. As não linearidades do material e geométrica foram consideradas através do critério de plastificação de von Mises e curvas tensão *versus* deformação verdadeiras.

Palavras-chave: Aço Inoxidável; Ligações Aparafusadas; Ensaio Experimentais; Análise em Elementos Finitos; Análise Não Linear.

ABSTRACT

FREIRE, Raphael. *Experimental and numerical study of the behavior of stainless plates in tension*. 2016. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

The use of stainless steel in construction has increased considerably in recent years. This is due to the industry concern for more sustainable and environmentally projects. It is a material that offers excellent performance throughout its service life, low maintenance cost and highly recyclable. The stainless steel current design codes are largely based on developed analogies assumed for carbon steel structures. However, stainless steel has four nonlinear stress versus strain curves (tension and compression, parallel and perpendicular to the lamination material) without defined yielding plateau and clearly defined hardening region, thereby changing the overall behavior of structures that use. This study aimed to evaluate the structural behavior of bolted stainless plates in tension in different types of stainless steel (austenitic 304, duplex 2205 and ferritic 430). For this presents an experimental program and numerical analysis based on the finite element method using the Abaqus software. It was executed and modeled two different configurations for each type of material and checked the ultimate limit state. The results show that the codes are still quite conservative for structural design of stainless bolted plates, particularly in the case of austenitic steel which provides higher deformation ability than the ferritic and duplex. For this continuous resistance method appears as an alternative method for structural design since it takes into account the beneficial hardening effect of material. The nonlinearity of the material and the geometric nonlinearity were considered using Von Mises yielding criterion and true stress-strain curves.

Keywords: Stainless Steel; Bolted Connections; Experimental Tests; Element Finite Analysis; Nonlinear Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação do preço do aço carbono e aço inox [2].....	17
Figura 2 – Pier ‘Progresso’, México [4].....	18
Figura 3 - Curva tensão x deformação – Aço carbono e aço inoxidável	19
Figura 4 – Trecho inicial da curva tensão x deformação – Aço carbono e aço inoxidável	19
Figura 5 - Estrutura Microscópica dos Aços Austenítico, Ferrítico e Duplex [5]	20
Figura 6 – Curva tensão x deformação aço inoxidável.....	21
Figura 7 – Ligação aparafusada em estrutura de aço inoxidável	24
Figura 8 – Estados limites últimos em chapa aparafusada (www.chasqueweb.ufrgs.br).....	25
Figura 9 – Definição dos parâmetros L e t (www.chasqueweb.ufrgs.br)	28
Figura 10 – Definição dos parâmetros e1, e2, s e p (www.chasqueweb.ufrgs.br)....	28
Figura 11 – Limitação de parâmetros geométricos [17]	29
Figura 12 – Limitação de parâmetros geométricos [17]	29
Figura 13 – (a) Ensaio sem excentricidade; (b) Ensaio com excentricidade.	35
Figura 14 – Esquema das ligações aparafusadas ensaiadas	36
Figura 15 – Corpo de prova [5].....	37
Figura 16 – Curva tensão <i>versus</i> deformação do aço inoxidável austenítico.....	37
Figura 17 – Posicionamento dos extensômetros de resistência elétrica	40
Figura 18 – Transdutor linear de deslocamento, LVDT	41
Figura 19 – Máquina universal de ensaios Lousenhausen de 600kN	42
Figura 20 – Geometria dos modelos ensaiados [14].....	43
Figura 21 – Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável austenítico, um furo	45
Figura 22 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável austenítico, um furo	46
Figura 23 - Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável duplex, um furo	47
Figura 24 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável duplex, um furo ...	47
Figura 25 - Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável ferrítico, um furo	48
Figura 26 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável ferrítico, um furo..	49

Figura 27 – (a) Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável austenítico, dois furos; (b) Efeito Curling	50
Figura 28 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável austenítico, dois furos	50
Figura 29 – Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável duplex, dois furos ..	51
Figura 30 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável duplex, dois furos	52
Figura 31 – Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável ferrítico, dois furos.	53
Figura 32 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável ferrítico, dois furos	53
Figura 33 – Gráfico tensão <i>versus</i> deformação nominal e verdadeira – Aço inox duplex.....	56
Figura 34 - Gráfico tensão <i>versus</i> deformação nominal e verdadeira – Aço inox ferrítico	57
Figura 35 - Gráfico tensão <i>versus</i> deformação nominal e verdadeira – Aço inox austenítico.....	57
Figura 36 – Método de Newton Raphson para um incremento de carga [16]	59
Figura 37 – Interação seguinte [16].....	60
Figura 38 – Geometria do elemento solido C3D8 [20]	61
Figura 39 – (a) Discretização do parafuso; (b) Condição de contorno do parafuso ..	62
Figura 40 – Elemento de contato entre o parafuso e a borda do furo	62
Figura 41 – (a) Detalhe das condições de contorno, (b) Nó de aplicação do deslocamento.....	63
Figura 42 – Discretização da malha de elementos finitos (a) Um furo; (b) Dois furos	63
Figura 43 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – aço inoxidável austenítico, um furo	65
Figura 44 – Gráfico carga <i>versus</i> deformação – aço inoxidável austenítico, um furo	66
Figura 45 – Distribuição de tensões de Von Mises - austenítico	67
Figura 46 – Configuração deformada – numérico <i>versus</i> experimental - austenítico	67
Figura 47 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável duplex, um furo ...	68
Figura 48 - Gráfico carga <i>versus</i> deformação – Aço inoxidável duplex, um furo.....	69
Figura 49 - Distribuição de tensões de Von Mises – duplex.....	70
Figura 50 - Configuração deformada – numérico <i>versus</i> experimental – duplex	70
Figura 51 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável ferrítico, um furo..	71

Figura 52 - Gráfico carga <i>versus</i> deformação – Aço inoxidável ferrítico, um furo	72
Figura 53 - Distribuição de tensões de Von Mises – ferrítico	73
Figura 54 - Configuração Deformada – Numérico <i>versus</i> Experimental – ferrítico.....	73
Figura 55 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável austenítico, dois furos	74
Figura 56 - Gráfico carga <i>versus</i> deformação – Aço inoxidável austenítico, dois furos	75
Figura 57 - Distribuição de tensões de Von Mises – austenítico	76
Figura 58 - Configuração deformada – numérico <i>versus</i> experimental – austenítico	77
Figura 59 – Efeito <i>curling</i> nos ensaios numérico e experimental	77
Figura 60 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – Aço inoxidável duplex, dois furos	78
Figura 61 - Gráfico carga <i>versus</i> deformação – Aço inoxidável duplex, dois furos ...	79
Figura 62 - Distribuição de tensões de Von Mises – duplex.....	80
Figura 63 - Configuração Deformada – numérico <i>versus</i> experimental – duplex.....	80
Figura 64 - Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento – aço inoxidável ferrítico, dois furos	81
Figura 65 - Gráfico carga <i>versus</i> deformação – Aço inoxidável ferrítico, dois furos..	82
Figura 66 - Distribuição de tensões de Von Mises – ferrítico	83
Figura 67 - Configuração deformada – numérico <i>versus</i> experimental – ferrítico	83
Figura 68 – Comparação de resultados – Carga <i>versus</i> deslocamento	85
Figura 69 – Comparação de resultados – Carga <i>versus</i> deslocamento.....	87
Figura 70 - Trecho perfeitamente elástico – Aço inoxidável duplex	90
Figura 71 - MRC – Modelo de material elástico com endurecimento linear	91
Figura 72 – MRC – Aço inoxidável austenítico.....	93
Figura 73 – MRC – Aço inoxidável duplex	95
Figura 74 – MRC – Aço inoxidável ferrítico	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado dos ensaios preliminares.....	35
Tabela 2 – Tensões limites médias do aço inoxidável [5]	38
Tabela 3 – Nomenclatura e configuração geométrica dos ensaios	44
Tabela 4 – Sequência dos ensaios	44
Tabela 5 – Resumo dos ensaios experimentais.....	54
Tabela 6 – Resultados de carga última (em kN) para os ensaios com um furo	85
Tabela 7 – Resultados de carga última (em kN) para os ensaios com dois furos	87
Tabela 8 – Valores de tensões e deformações pelo MRC – Aço inox austenítico	92
Tabela 9 – Resultados de carga última (em kN) - Aço inoxidável austenítico	93
Tabela 10 – Valores de tensões e deformações pelo MRC – Aço inox duplex	94
Tabela 11 – Resultados de carga última (em kN) - Aço inoxidável duplex.....	95
Tabela 12 – Valores de tensões e deformações pelo MRC – Aço inox ferrítico.....	96
Tabela 13 – Resultados modelo em aço inoxidável ferrítico	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo de Prova
Eurocode	European Committee for Standardisation
Inox	Inoxidável
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEF	Método dos Elementos Finitos
MRC	Método da Resistência Contínua
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PGECIV	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
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	deformação convencional
E	módulo de elasticidade
e_1	distância paralela a direção da força da linha de parafuso até a borda
e_3	distância perpendicular ao furo alongado do seu centro até a borda
e_4	distância paralela ao furo alongado do seu primeiro centro até a borda
$F_{b,rd}$	resistência ao esmagamento
f_u	tensão última da placa
f_{up}	tensão última do parafuso
f_{ured}	tensão última da placa inoxidável reduzida
$F_{v,rd}$	resistência ao cisalhamento por cada plano de corte
f_y	tensão limite de escoamento da placa experimental
g	distância entre linhas de parafusos no sentido transversal à força
k	constante que depende do tipo de material
k_r	fator de redução para o aço inoxidável
k_1	fator de correção em função do posicionamento dos parafusos
$N_{pl,rd}$	força última de projeto de escoamento da seção bruta
$N_{u,rd}$	força última de projeto de ruptura da seção líquida
$N_{t,rd}$	força normal de tração de projeto da ligação
p	distância entre linhas de parafusos no sentido perpendicular à força
p_1	distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força
p_2	distância entre furos de mesma linha na direção transversal a força
$p_{1,0}$	primeira distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força
$p_{1,i}$	distâncias seguidas entre furos, mesma linha e direção da força
r	número de parafusos numa seção dividido pelo número total de parafusos da ligação e o valor de u, dado por $2e_2$
s	distância entre linhas de parafusos no sentido paralelo ao da força

	aplicada
t	espessura da chapa experimental
u	constante usada no cálculo da ligação inoxidável, cujo valor é igual a $2e_2$
α	constante que determina deformação além do escoamento
α_b	fator de correção em função da tenção última e posicionamento dos parafusos
α_v	fator que depende da classe do aço
ε	deformação
$\varepsilon_{0,2}$	deformação a 0,2%
ε_1	deformação a 0,1%
ε_2	deformação a 1%
σ	tensão
σ_0	tensão elástica
$\sigma_{0,2}$	tensão a 0,2%
σ_1	limite de escoamento para deformação de 0,1%
γ_{M0}	coeficiente de resistência
γ_{M2}	coeficiente de resistência

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
Motivação	22
Objetivos 22	
Estrutura da dissertação	23
1 LIGAÇÕES APARAFUSADAS	24
1.1 Estudos sobre o comportamento de ligações aparafusadas em aço inoxidável	26
1.2 Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada	27
<u>1.2.1 Dimensionamento de Ligações em Aço Inoxidável</u>	<u>30</u>
2 ANÁLISE EXPERIMENTAL	34
2.1 Caracterização da ligação aparafusada	34
2.2 Caracterização dos ensaios	38
2.3 Preparação dos ensaios	39
2.4 Instrumentação	39
<u>2.4.1 Extensômetros</u>	<u>39</u>
<u>2.4.2 LVDT</u>	<u>40</u>
<u>2.4.3 Sistemas de aplicação de carga e aquisição de dados</u>	<u>41</u>
<u>2.4.4 Programação em Labview</u>	<u>42</u>
2.5 Apresentação dos ensaios experimentais	43
2.6 Resultados experimentais	45
<u>2.6.1 Modelo com um furo – aço Inoxidável austenítico A304</u>	<u>45</u>
<u>2.6.2 Modelo com um furo – Aço Inoxidável Duplex 2205</u>	<u>46</u>
<u>2.6.3 Modelo com um furo – Aço Inoxidável Ferrítico 430</u>	<u>48</u>
<u>2.6.4 Modelo com dois furos – Aço Inoxidável Austenítico A304</u>	<u>49</u>
<u>2.6.5 Modelo com dois furos – Aço Inoxidável Duplex 2205</u>	<u>51</u>
<u>2.6.6 Modelo com dois furos – Aço Inoxidável Ferrítico 430</u>	<u>52</u>
3 MODELAGEM NUMÉRICA	55
3.1 Modelagem do material	55
3.2 Análise não linear - método Newton-Raphson	58
3.3 Tipo de elemento	60
3.4 Geometria e simplificação do modelo	61

3.5 Análise dos resultados – experimental versus numérico.....	64
<u>3.5.1 Modelo com um furo – aço inoxidável austenítico.....</u>	<u>64</u>
<u>3.5.2 Modelo com um furo – Aço inoxidável duplex 2205</u>	<u>68</u>
<u>3.5.3 Modelo com um furo – Aço inoxidável ferrítico 430.....</u>	<u>71</u>
<u>3.5.4 Modelo com dois furos – Aço inoxidável austenítico A304.....</u>	<u>74</u>
<u>3.5.5 Modelo com dois furos – Aço inoxidável duplex 2205.....</u>	<u>77</u>
<u>3.5.6 Modelo com dois furos – Aço inoxidável ferrítico 430</u>	<u>81</u>
3.6 Comparação entre os resultados.....	84
<u>3.6.1 Modelos com um furo.....</u>	<u>84</u>
<u>3.6.2 Modelos com dois furos.....</u>	<u>86</u>
4 MÉTODO DA RESISTÊNCIA CONTÍNUA.....	89
4.1 Comportamento do material.....	89
4.2 Dimensionamento pelo MRC.....	91
<u>4.2.1 Aço inoxidável austenítico A304.....</u>	<u>92</u>
<u>4.2.2 Aço inoxidável duplex 2205.....</u>	<u>94</u>
<u>4.2.3 Aço inoxidável ferrítico 430</u>	<u>96</u>
5 CONCLUSÕES	98
5.1 Introdução.....	98
5.2 Conclusões	98
5.3 Trabalhos futuros.....	101
REFERÊNCIAS.....	102

INTRODUÇÃO

O uso de estruturas metálicas na construção civil proporciona a arquitetos e engenheiros soluções arrojadas, eficientes e de alta qualidade. O seu uso como material de construção começou no século XVIII, e até os dias atuais, a arquitetura em aço está associada a ideia de modernidade. No entanto, a utilização do aço vai muito além do apelo estético, a redução do tempo de construção, racionalização no uso de materiais e mão de obra aliada ao aumento da produtividade, são alguns dos fatores que implicam cada vez mais na escolha de soluções com o uso de estruturas metálicas [1].

O sistema construtivo em aço apresenta diversas vantagens em relação à sistemas construtivos convencionais, como o concreto armado. Estruturas em aço permitem em muitos casos: maior liberdade arquitetônica; maior eficiência de projeto pois as seções de vigas e pilares são consideravelmente mais esbeltas do que as equivalentes em concreto armado; menor prazo de execução; redução do custo de fundações pois proporciona uma estrutura mais leve; organização do canteiro, entre outros fatores.

O tipo de aço mais usual em estruturas é o aço carbono, tanto para estruturas metálicas quanto para as em concreto armado. Entretanto, um tipo de aço cada vez mais vem ganhando espaço no mercado, nomeadamente o aço inoxidável. Ainda pouco utilizado no Brasil, este tipo de aço tem seu uso bem disseminado na Europa, Estados Unidos e em outros países por ser um material inovador apresentando excelente resistência mecânica, capacidade de deformação e durabilidade. Mas o custo dos dois materiais ainda influencia na escolha do material a ser utilizado nos projetos, como pode ser observado na Figura 1. De fato, o preço do aço inoxidável é na ordem de quatro vezes maior que o aço carbono. Contudo, com a sua maior utilização no mercado, há um constante declínio entre a diferença de preço dos dois tipos de aço [2].

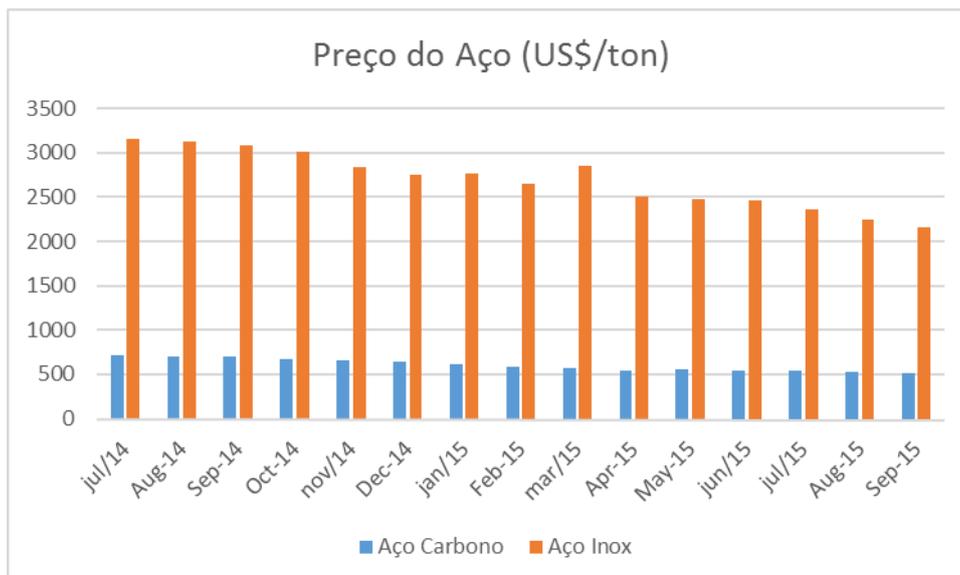


Figura 1 - Comparação do preço do aço carbono e aço inox [2]

O aço inoxidável obtêm vantagens relacionadas a sua alta resistência à corrosão, durabilidade, apelo estético e baixo custo de manutenção. O interesse mundial por sustentabilidade nos últimos anos interferiu também na construção civil, aumentando consideravelmente o uso do aço inoxidável como material de construção. A longevidade do material compensa o investimento quando comparado a outros materiais que precisam de manutenção e substituição de peças regularmente, sua aplicação acaba sendo viável quando é aplicado o conceito de custo/benefício ao longo do tempo. Segundo Cardoso [3], já no segundo processo de manutenção de uma estrutura, a utilização do aço inoxidável mostra ser mais eficiente sob o ponto de vista econômico. Um exemplo é o píer 'Progresso' situado no México, sua estrutura em concreto armado é constituída por barras em aço inoxidável. Construído entre 1937 e 1941, o píer está em funcionamento contínuo a mais de 70 anos, sem ter sofrido grandes reparações ou manutenções. A menos de 200 metros do píer encontra-se a ruína da estrutura de outro píer, 30 anos mais novo, construído com barras de aço carbono, como pode ser visto na Figura 2 [4].



Figura 2 – Pier ‘Progreso’, México [4]

Com a crescente demanda do aço inoxidável em busca de projetos mais sustentáveis diversas pesquisas foram impulsionadas afim de entender seu comportamento mecânico, ajudando a elaboração de normas e especificações para o uso do material. No entanto, as normas atuais que fazem especificações para o uso de elementos estruturais constituídos por aço inoxidável são, em grande parte, baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas de aço carbono. Porém, o aço inoxidável exibe um comportamento diferente do aço carbono, apresentando curvas tensão *versus* deformação com características únicas. Como pode ser observado na Figura 3, o aço inoxidável apresenta um alto grau de encruamento em comparação com o aço carbono e uma curva sem patamar de escoamento bem definido. Vale ressaltar que o comportamento não linear observado nos ensaios experimentais de tração em aços inoxidáveis já é observado logo no início da curva como ilustrado pela Figura 4.

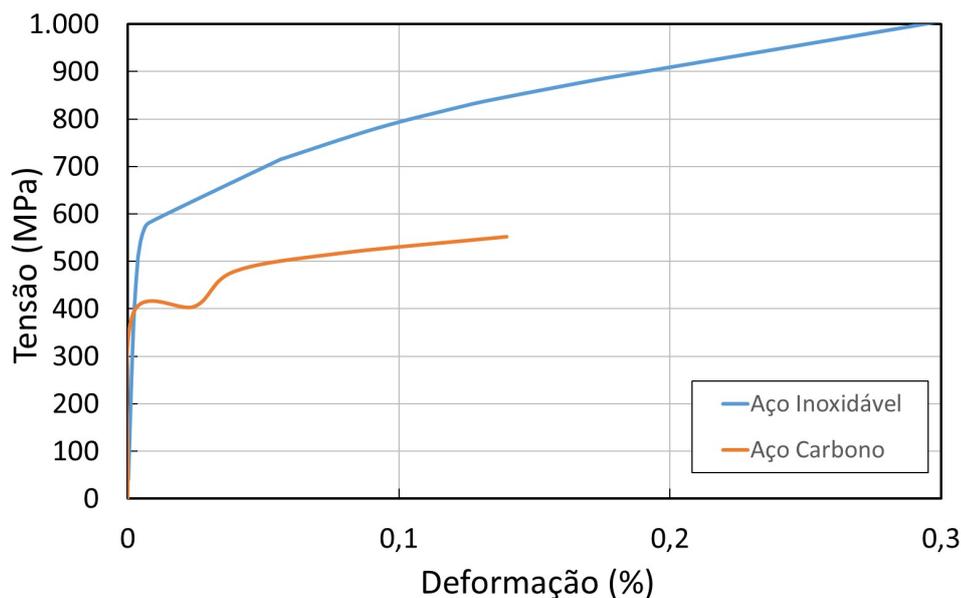


Figura 3 - Curva tensão x deformação – Aço carbono e aço inoxidável

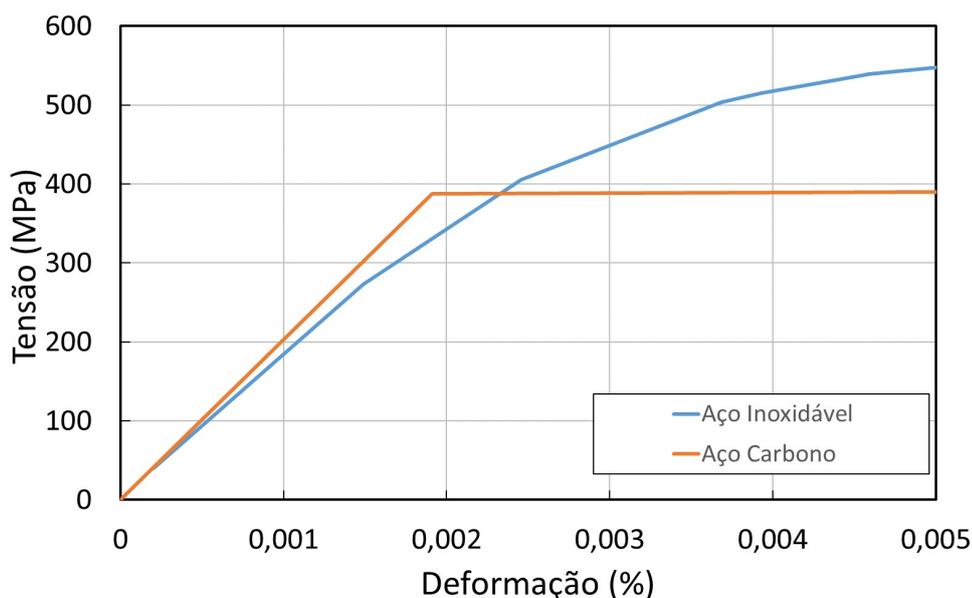
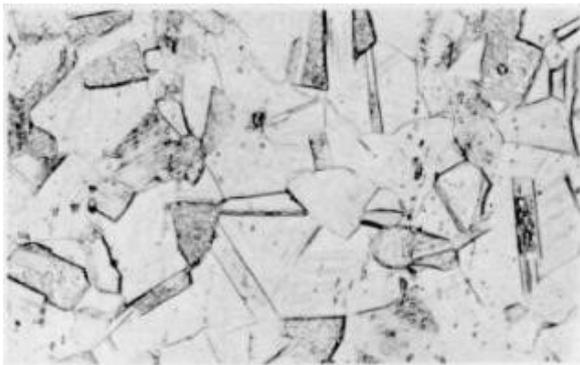


Figura 4 – Trecho inicial da curva tensão x deformação – Aço carbono e aço inoxidável

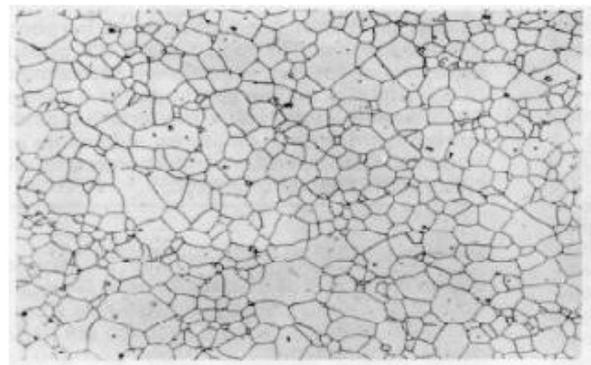
Existe uma grande variedade de tipos de aço inoxidável devido a diferentes composições químicas e o tratamento térmico aplicado na sua fabricação. Os tipos de aço são classificados em cinco grupos principais: austenítico, ferrítico, martensítico, duplex e endurecível por precipitação. O teor de cromo (Cr) na composição do material classifica os aços inoxidáveis em grupos distintos. Este elemento é responsável pela característica de resistência à corrosão do aço

inoxidável reagindo com o oxigênio da atmosfera formando uma camada muito fina e resistente em volta do material, chamada camada passiva, que protege o aço da corrosão. O teor mínimo de cromo (Cr) para que um aço seja considerado inoxidável é de 10,5% em sua composição [5].

Esta dissertação de mestrado teve como objetivo analisar o comportamento de placas submetidas à tração para os três aços inoxidáveis mais utilizados na construção civil: austenítico A304, ferrítico 430 e duplex 2205, devido a sua maior capacidade de deformação em relação aos aços martensíticos e endurecível por precipitação, que possuem dureza elevada, reduzindo sua resistência, tornando-os materiais frágeis. De forma a comparar a microestrutura destes três tipos de aço inoxidáveis, a Figura 5 apresenta a estrutura microscópica dos três tipos de aço escolhidos para estudo neste trabalho.



a) Aço Inoxidável Austenítico



b) Aço Inoxidável Ferrítico



c) Aço Inoxidável Duplex

Figura 5 - Estrutura microscópica dos aços austenítico, ferrítico e duplex [5]

Os aços austeníticos apresentam cerca de 17% a 25% de cromo em sua composição e de 7% a 20% de níquel. Tem como características a alta resistência à corrosão, 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. Entretanto apresentam limitada resistência à corrosão. Sua resistência mecânica pode ser aumentada por tratamento a frio. O duplex tem uma estrutura mista de austenita e ferrita, como resultado, tem características destes dois elementos. A composição química típica é composta por 22% de cromo, 5% de níquel e 3% de molibdênio com pequena adição de nitrogênio. Sua principal característica é a elevada resistência mecânica em comparação aos outros dois tipos [6]. De forma geral, a escolha do tipo de aço inoxidável deverá levar em conta o ambiente que ele estará sujeito, pois como foi mencionado, o nível de cromo é distinto entre os tipos de aço fazendo com que o tipo de aço seja mais ou menos resistência à corrosão.

A Figura 6 ilustra o comportamento mecânico dos três tipos de aços inoxidáveis utilizados como objeto de pesquisa deste trabalho. A curva tensão *versus* deformação dos materiais indica as particularidades de cada tipo de aço. A tensão última de ruptura do ferrítico é muito inferior aos outros dois tipos de aço inoxidável, enquanto o duplex apresenta excelente resistência mecânica, assim como o austenítico, mas não a mesma capacidade de deformação, principal característica dos aços austeníticos.

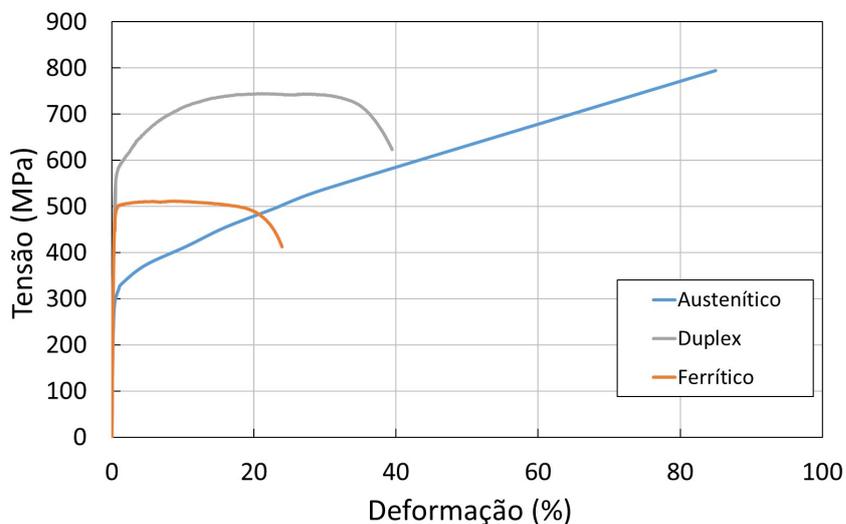


Figura 6 – Curva tensão x deformação aço inoxidável

Motivação

A busca por projetos mais econômicos e sustentáveis é um dos grandes desafios da engenharia nesta época. Por isso é de suma importância que existam alternativas na construção civil de materiais que exerçam este papel. O aço inoxidável é um material que atende aos requisitos de sustentabilidade, entretanto, sua utilização ainda é vista no mercado como uma solução dispendiosa quando comparada com outros tipos de aço.

Uma forma de tornar o uso do aço inoxidável mais competitivo em soluções estruturais seria compreender o seu comportamento estrutural, visto que os métodos de dimensionamento são, em grande parte, baseados em analogias do comportamento do aço carbono. Isto pode levar a um superdimensionamento da peça, e conseqüentemente, estruturas mais robustas.

Este trabalho tem por motivação propor o aprofundamento do estudo de estruturas em aço inoxidável para que novos códigos de dimensionamento tenham regras mais adequadas e racionais para projetos estruturais usando este tipo de aço.

Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar e estudar o comportamento estrutural de ligações aparafusadas com chapas em aço inoxidável submetidas à tração através de ensaios experimentais. Estes ensaios serão simulados através de modelos numéricos, baseados no método dos elementos finitos, visando o desenvolvimento de um modelo confiável validando-o com os resultados observados em laboratório como carga última, modo de ruptura, deformações e deslocamentos. Também serão abordados os métodos teóricos de dimensionamento de estrutura em aço inoxidável segundo o EN 1993-1-4 [7] e a aplicação do Método da Resistência Continua [8] em ligações aparafusadas com chapas submetidas à tração.

Estrutura da dissertação

O capítulo um deste trabalho apresenta algumas considerações sobre ligações aparafusadas, além dos principais estudos realizados sobre placas tracionadas em aço inoxidável e modelagem numérica que serviram de base e motivação para este estudo. Também é apresentado de forma detalhada, o dimensionamento dessas placas segundo as recomendações do EN 1993-1-4 [7].

O capítulo dois aborda o estudo experimental realizado, desde a caracterização dos materiais, preparação dos ensaios e instrumentação. Na última seção do capítulo, os resultados encontrados em cada um dos ensaios são apresentados.

No capítulo três, apresenta-se a elaboração dos modelos numéricos no programa ABAQUS/CAE [20] e os resultados encontrados são comparados aos resultados experimentais, vistos no capítulo dois, sendo feita também uma verificação dos resultados teóricos segundo o EN 1993-1-4 [7].

O capítulo quatro propõe a aplicação do Método da Resistência Contínua [8] em placas tracionadas como forma de dimensionamento alternativo para avaliação da resistência do material. Os resultados encontrados são discutidos e comparados aos resultados segundo o EN 1993-1-4 [7].

Por fim, no capítulo cinco, são apresentadas as conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho, e algumas sugestões para trabalhos futuros.

1 LIGAÇÕES APARAFUSADAS

As ligações exercem um papel muito importante em qualquer estrutura sendo o elo de duas ou mais partes possibilitando a transferência de carga através da estrutura como um todo. Portanto, seu dimensionamento e sua execução devem ser realizadas com um elevado nível de segurança pois qualquer erro pode comprometer a integridade da estrutura. A Figura 7 mostra um exemplo de ligação aparafusada em aço inoxidável localizada no aeroporto Sá Carneiro na cidade de Porto, em Portugal.



Figura 7 – Ligação aparafusada em estrutura de aço inoxidável [5]

Os tipos de elementos mais comuns para ligações de estruturas são o rebite, parafusos e soldas. Como dito anteriormente, o rebite tem caído em desuso e as ligações aparafusadas e soldadas têm sido as melhores alternativas para execução de ligações estrutural em aço. As ligações aparafusadas tendem a diminuir a resistência da seção das peças à tração 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. A Figura 8 ilustra os cinco possíveis modos de ruptura destas chapas aparafusadas. No caso (a) ocorre a ruptura da área líquida, isto acontece pois a existência de furos causa uma diminuição na seção transversal efetiva, ocasionando perda de resistência na seção. Em (b) observa-se o rasgamento da chapa, modo de ruptura que ocorre quando o parafuso possui resistência maior que a chapa, provocando assim, tensões cisalhantes na chapa. Só ocorre este tipo de ruptura caso a distância borda-furo resistente ao rasgamento seja insuficiente. No caso (c) ocorre o esmagamento da chapa devido à alta tensão de compressão existente na região de contato entre o parafuso e a chapa. Em (d) o parafuso não resiste à tensão aplicada e ocorre o corte no mesmo, sendo comum acontecer quando a ligação é mal dimensionada e se colocam menos parafusos que o necessário, ocasionando uma tensão cisalhante excessiva no fuste do parafuso. Por último, o escoamento da seção bruta da chapa (e), caracterizado pela plastificação da seção devido à elevada relação entre a tensão de escoamento e a tensão ruptura.

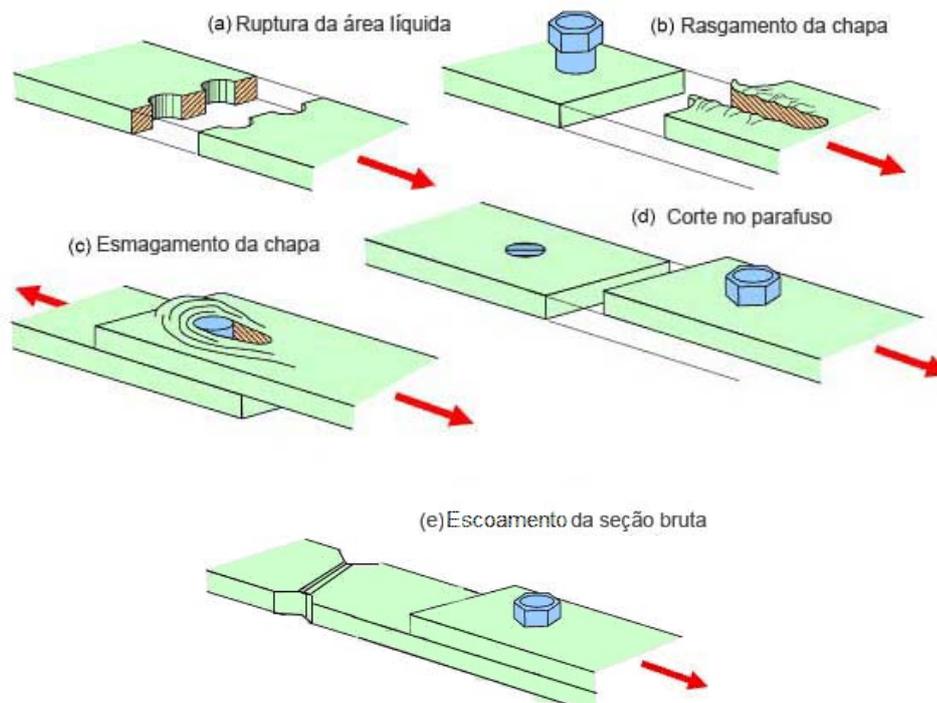


Figura 8 – Estados limites últimos em chapa aparafusada [5]

1.1 Estudos sobre o comportamento de ligações aparafusadas em aço inoxidável

A seguir, são apresentados alguns estudos realizados nos últimos anos a respeito do tema abordado neste trabalho ilustrando a demanda por maior entendimento do comportamento de estruturas em aço inoxidável através de ensaios experimentais e análises numéricas.

Em 2010, Gardner *et al.* [9] elaboraram modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos e analisaram o comportamento de ligações aparafusadas de placas em aço inoxidável (austenítico e ferrítico) investigando as variáveis que influenciam no modo de falha das ligações, tais como, distância de borda, extremidade e espessura da placa. Por meio de estudo paramétrico, foi proposto um conjunto de equações a serem abordadas em códigos de dimensionamento englobando o estado limite último e de utilização das estruturas.

Ainda em 2010, Gardner *et al.* [10] realizaram um estudo mais amplo a respeito da ruptura da seção líquida, visto que as regras adotadas no código europeu para ligações aparafusadas em aço inoxidável eram as mesmas adotadas para o aço carbono. Foi estudada a distribuição de tensões ao longo da seção líquida para diferentes distâncias de borda e arranjo dos parafusos, e se verificou, que a ductilidade do aço inoxidável é suficiente para assegurar uma grande redistribuição de tensões antes da ruptura.

Cai e Young [11] realizaram ensaios experimentais para analisar a resistência de ligações aparafusadas de placas em aço inoxidável austenítico e duplex. Os dois principais modos de falha foram observados e os resultados experimentais comparados com os resultados obtidos através das indicações de cálculo da norma Americana ASCE-8-02 [12], Australiana/Neozelandesa AS/NZS4673 [13] e Europeia EN 1993-1-4 [7]. Os ensaios mostram que as forças nominais previstas pelas especificações das normas são bastante conservadoras, e ainda, o EN 1993-1-4 [7] é mais preciso quanto ao modo de falha das ligações quando comparado com as outras duas normas citadas.

Kim e Kuwamura [14] analisaram por meio de ensaios experimentais e análises numéricas, três critérios de ruína de chapas finas de aço inoxidável: ruptura da seção líquida, rasgamento da chapa e ruptura por bloco de cisalhamento.

Também foi analisada a influência do efeito *Curling*, que é a deformação da chapa para fora do plano de aplicação da carga na resistência máxima dos modelos onde ocorria tal fenômeno.

Santos [15] elaborou um estudo experimental para entender o comportamento de ligações aparafusadas em aço inoxidável e aço carbono. Foi concluído que as cargas últimas de ruptura encontradas para o aço carbono são coerentes quando comparadas aos resultados segundo a norma europeia. Já para o aço inoxidável, verificou-se nos ensaios grandes deformações e capacidade de absorção de energia devido sua capacidade de encruamento e o modo de ruína e carga última esperados segundo o EN 1993-1-4 [7] não se confirmaram, apresentando grande diferença entre as cargas de ruptura experimental e normativa.

Silva [16] elaborou um estudo numérico baseado no método dos elementos finitos com o objetivo de analisar o comportamento de chapas de aço inoxidável tracionadas com furações defasadas, comparando assim, com resultados experimentais realizados por Santos [15] e obtendo resultados bastante satisfatórios em termos de carga última e modo de ruptura.

Santos [5] realizou ensaios experimentais com chapas de aço inoxidável (austenítico, ferrítico e duplex) e aço carbono aparafusadas submetidas à tração. Foi analisado no trabalho a influência de alguns parâmetros no modo de falha e carga última dos corpos de prova, tais como largura da chapa, configuração dos furos, direção da laminação da chapa.

1.2 Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada

Na Figura 9 são apresentados os parâmetros geométricos t e L que representam, respectivamente, a espessura e a largura da chapa.

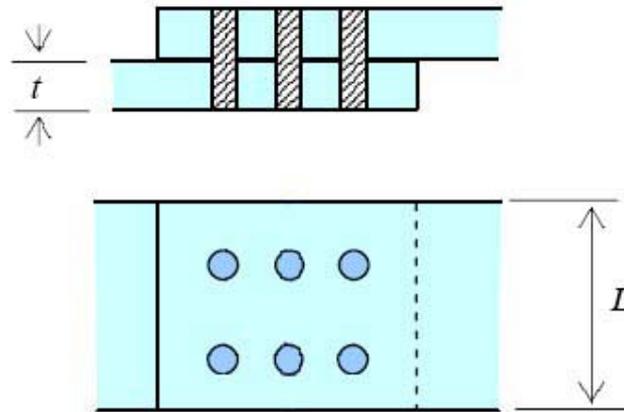


Figura 9 – Definição dos parâmetros L e t [5]

Na Figura 10 são apresentados os parâmetros geométricos s e p e as distâncias furo-borda e_1 e e_2 .

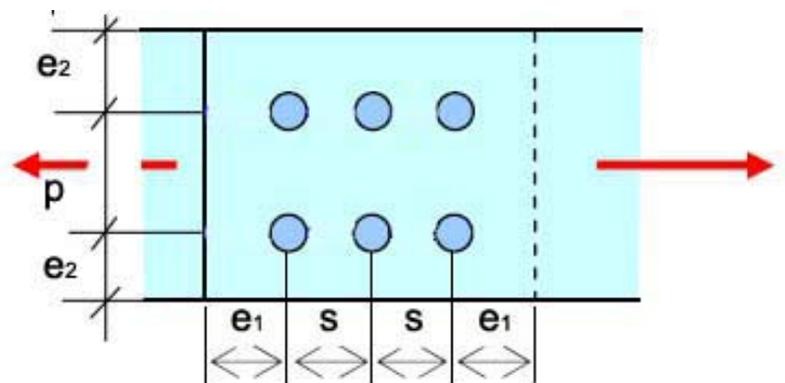


Figura 10 – Definição dos parâmetros e_1 , e_2 , s e p [5]

E na Figura 11 e na Figura 12 apresentam-se os limites dos parâmetros geométricos utilizados pela Norma Europeia EN 1993-1-8 [17].

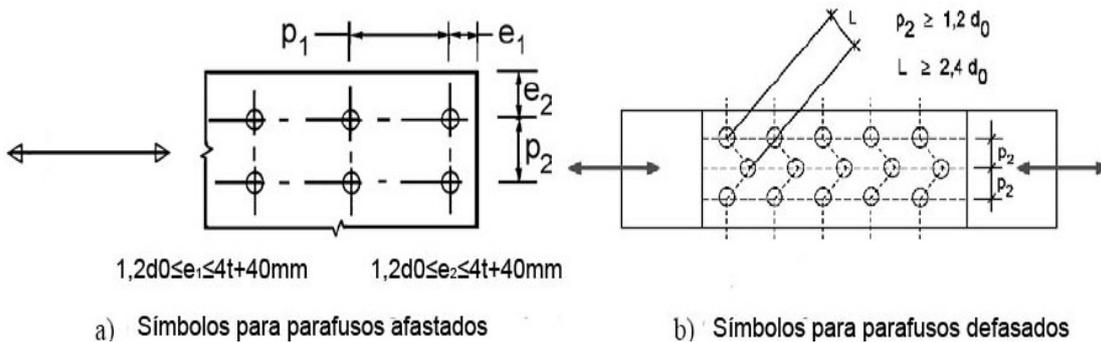
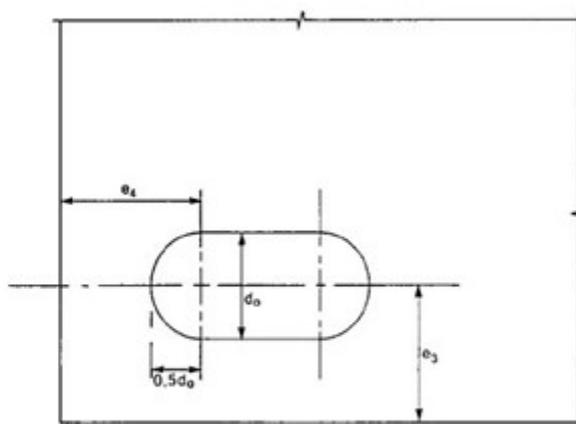
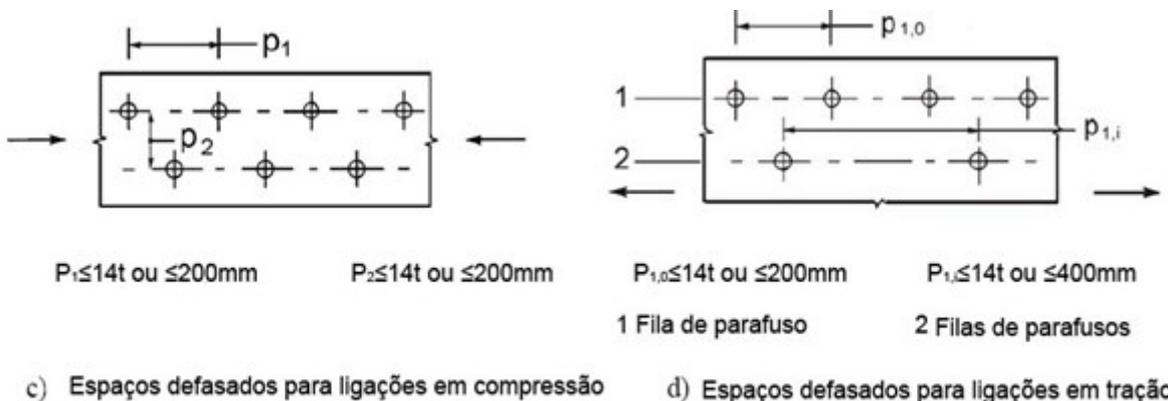


Figura 11 – Limitação de parâmetros geométricos, furação padrão [17]



e) Distância final e lateral para furos alongados

Figura 12 – Limitação de parâmetros geométricos [17]

1.2.1 Dimensionamento de Ligações em Aço Inoxidável

A norma brasileira NBR 8800 não apresenta um método de cálculo específico para dimensionamento de ligações em aço inoxidável, desta forma será apresentado o cálculo proposto na norma europeia EN 1993-1-4 [7], que trata especificamente de critérios a respeito do aço inox. A norma europeia estabelece, em seu item 5.3.1, que a resistência à tração deverá ser o menor valor entre a resistência plástica da seção bruta, $N_{pl,rd}$ e a resistência última da seção líquida, $N_{u,rd}$, obtidas através das equações (1) e (2), respectivamente.

$$N_{pl,rd} = \frac{(A_g \times f_y)}{\gamma_{M0}} \quad (1)$$

$$N_{u,rd} = \frac{(k_r \times A_{net} \times f_u)}{\gamma_{M2}} \quad (2)$$

$$\frac{N_{u,rd}}{N_{t,rd}} \geq 1,0 \quad \frac{N_{pl,rd}}{N_{t,rd}} \geq 1,0 \quad (3)$$

onde,

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

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

A_{net} é a área líquida da seção;

f_y é 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.

k_r é um fator de redução.

Para obtenção da área líquida da seção transversal da ligação aplica-se a seguinte equação:

$$A_{net} = A - n \times d \times t \quad (4)$$

onde,

n é a quantidade de furos contidos na linha de ruptura da seção transversal;
 d é o diâmetro do furo na direção perpendicular à solicitação;
 t é a espessura da parte conectada em análise.

Para ligações aparafusadas com parafusos alternados, utiliza-se a fórmula indicada no EN 1993-1-1 [18], item 6.2.2.2:

$$A_{net} = A - t \left[n \times d - \sum \left(\frac{s^2}{4 \times p} \right) \right] \quad (5)$$

onde,

s é a distância entre os centros dos furos na direção de aplicação da força;
 p é a distância entre os centros dos furos na direção perpendicular da aplicação da força, Figura 10.

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

$$k_r = \left(1 + 3r \left(\frac{d}{u} - 0,3 \right) \right) \leq 1,0 \quad (6)$$

sendo,

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

u é igual a $2e_2$, mas deve ser menor do que p_2 ;

e_2 é a distância entre o centro do furo até a borda adjacente na direção perpendicular a transferência de carga;

p_2 é o espaçamento entre o centro dos furos dos parafusos na direção perpendicular à direção da transferência de carga.

Embora a resistência ao esmagamento de uma ligação aparafusada em aço inoxidável seja normalmente governada pela necessidade de limitar o alongamento

do furo quando solicitada por uma carga de trabalho, uma verificação em separado deve ser feita para prevenir este efeito no seu estado limite último substituindo o f_u por $f_{u,red}$ dado pela equação (7) a seguir.

A norma europeia EN 1993-1-8 [17] para dimensionamento de ligações aparafusadas em estruturas de aço, também estabelece critérios de avaliação da menor resistência na região dos parafusos a serem observados no cálculo de ligações aparafusadas submetidas à tração. As equações (8) e (9) estão presente no EN 1993-1-8 [17], e são utilizadas para avaliação da resistência dos parafusos ao cisalhamento por cada plano de corte e ao esmagamento, respectivamente.

$$F_{v,rd} = \frac{(\alpha_v \times f_{up} \times A)}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

$$F_{b,rd} = \frac{(k_1 \times \alpha_b \times f_{u,red} \times d \times t)}{\gamma_{M2}} \quad (8)$$

onde, na equação (7),

f_{up} é a tensão última do parafuso;

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

Na equação (8),

α_b é o menor valor entre:

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

sendo que,

α_d é analisado na direção da transferência da força:

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

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

k_1 é analisado na direção perpendicular à transferência da força sendo definido para os parafusos da borda: $2,8e_2/d_0-1,7$ ou 2,5, e para os parafusos centrais: $1,4p_2/d_0-1,7$ ou 2,5, onde o menor valor é sempre adotado.

$f_{u,red}$ é dado pela equação (9), para ligações em aço inoxidável f_u deve ser substituído por $f_{u,red}$ para cálculo de capacidade de carga.

$$f_{u,red} = 0,5f_y + 0,6f_u \quad (9)$$

2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

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 podem ser observadas em ensaios experimentais.

Dando foco as ligações aparafusadas com chapa submetida à tração, os ensaios tem como principais objetivos observar os modos de ruínas caracterizando uma componente mais frágil e identificando a sua capacidade. Contudo existe um cuidado com o uso dos ensaios experimentais devido ao seu 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 três tipos distintos: austenítico A304, duplex 2205 e ferrítico 430. Será abordado a preparação e instrumentação dos ensaio, bem como, o sistema utilizado para a aplicação da carga e o registro de todos os dados investigados.

2.1 Caracterização da ligação aparafusada

Este estudo foi baseado nos ensaios experimentais realizados por Kim e Kuwamura [14] que foram realizados com uma placa de aço inoxidável ligada a uma placa mais grossa com aplicação de carga nas duas extremidades. No entanto esta configuração do ensaio poderia gerar esforços nas placas além das cargas axiais que influenciariam nas cargas últimas de tração das placas. Portanto, fez-se necessário analisar a influência da excentricidade da ligação que irá gerar a ocorrência de momento fletor devido a distância entre o ponto de aplicação da carga e o centroide das placas. Deste modo, este trabalho investigou um novo esquema estrutural a ser empregado utilizando duas chapas opostas, resultando em um sistema simétrico. A Figura 13(a) ilustra o esquema utilizado por Kim e Kuwamura [14] enquanto o novo esquema de ensaio pode ser observado na Figura 13.b.

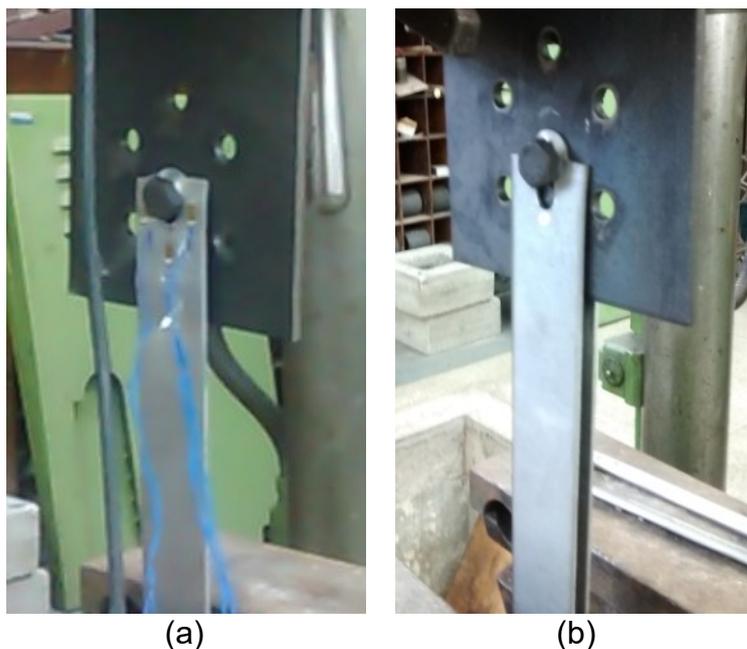


Figura 13 – (a) Ensaio sem excentricidade; (b) Ensaio com excentricidade.

O ensaio com duas chapas de aço inoxidável de dimensões idênticas conectadas a uma chapa central de aço carbono com 7,0 mm de espessura obteve como carga de ruptura um valor 44,9 kN enquanto no esquema utilizado por Kim e Kuwamura [14], a carga de ruptura foi de 45,01 kN. Portanto, foi considerado que neste caso o momento gerado pela excentricidade não teve uma participação efetiva na carga última, podendo assim, ser desprezado para os outros ensaios realizados.

Tabela 1 – Resultado dos ensaios preliminares

Tipo de Ensaio	Carga de Ruptura	Diferença entre os resultados
Sem excentricidade	45,01 kN	0,29%
Excêntrico	44,88 kN	

Portanto, a configuração estrutural da ligação aparafusada investigada consistiu em duas chapas de aço onde a carga é aplicada na chapa em aço carbono deixando a chapa em aço inoxidável fixa. A chapa em aço inoxidável têm as seguintes dimensões: 3,0 mm de espessura, 50 mm de largura e comprimento de 400 mm, sendo que destes aproximadamente 150 mm são para fixação na máquina de tração. Já a outra chapa é de aço carbono com ambas, largura e espessura

maiores para garantir que a ruptura ocorresse na chapa de aço inoxidável, que é o objeto de estudo deste trabalho, sendo assim, as dimensões foram: espessura 6,0 mm, largura 120 mm e comprimento de 300 mm. A Figura 14 ilustra o esquema das ligações utilizadas para as placas com um furo e dois furos, onde o modo de ruptura a ser observado é o rasgamento da placa na região borda-furo no primeiro caso e ruptura da seção líquida para a placa de dois furos.

Para obter as tensões de escoamento e última dos materiais utilizados nos ensaios, utilizou-se das premissas dispostas na NBR 6673 [19]. Sendo assim, Santos [5] elaborou corpos de prova com 3,0 mm de espessura com as dimensões apresentadas na Figura 15, recortados no sentido paralelo (PL) e perpendicular (PP) a laminação das chapas. Os materiais usados neste trabalho são os mesmos ensaiados por Santos [5].

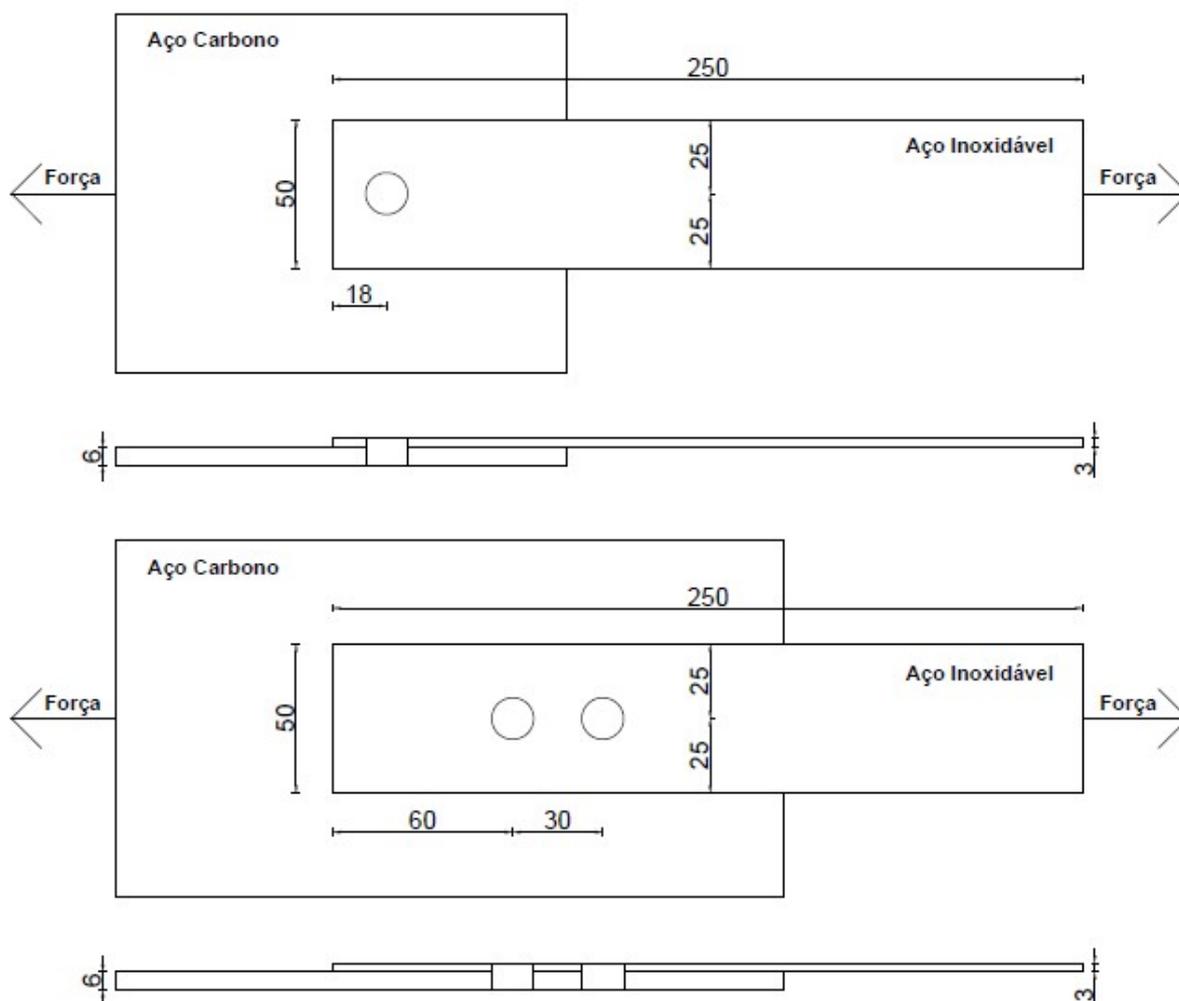


Figura 14 – Esquema das ligações aparafusadas ensaiadas

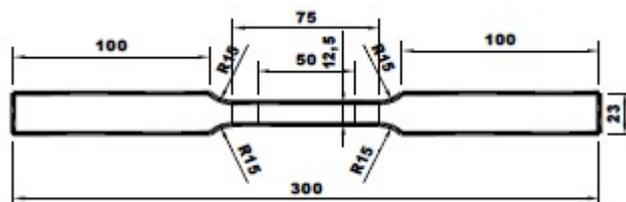


Figura 15 – Corpo de prova [5]

A Tabela 2 apresenta a média dos resultados encontrados por Santos [5] para tensões de escoamento e de ruptura dos corpos de prova em aço inoxidável austenítico, ferrítico e duplex. A tensão de escoamento foi obtida para os três tipos de aço inoxidável a partir de uma reta paralela ao trecho inicial correspondente a 0,2% de deformação, conforme Figura 16.

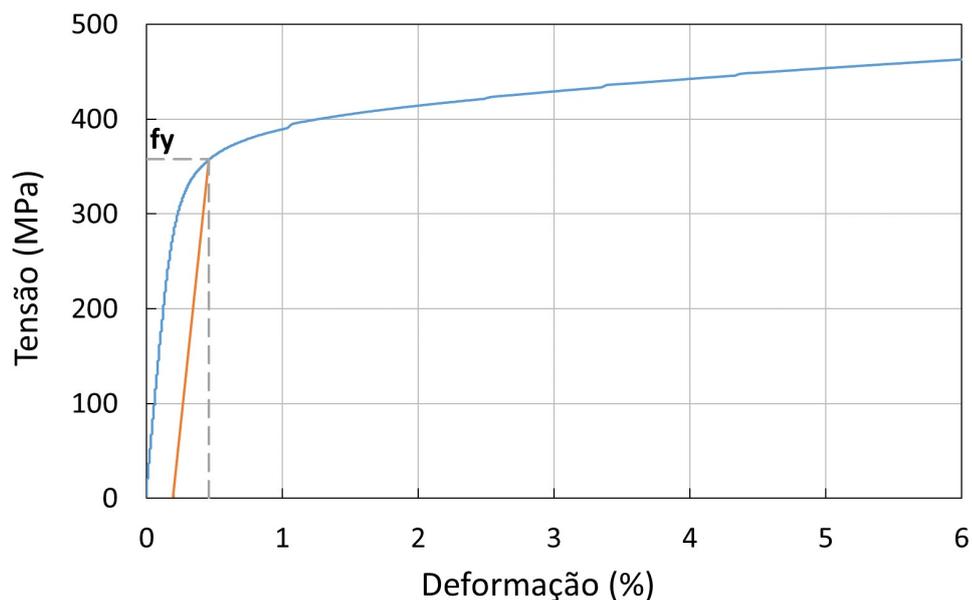


Figura 16 – Curva tensão versus deformação do aço inoxidável austenítico

Tabela 2 – Tensões limites médias do aço inoxidável [5]

Corpo de Prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Austenítico (PL)	350,61	710,29
Austenítico (PP)	348,31	748,28
Duplex (PL)	494,70	716,46
Duplex (PP)	538,71	760,42
Ferrítico (PL)	352,28	471,21

2.2 Caracterização dos ensaios

Para a elaboração dos ensaios e obtenção dos resultados esperados foram adotados os seguintes critérios:

- I. As dimensões das chapas foram baseadas no modelo utilizado por Kim e Kuwamura [14] com configuração de um e dois furos. Kim e Kuwamura concluíram que para os modelos ensaiados, o comprimento da chapa sendo maior ou igual a 150 mm não influencia nos resultados analisados [14]. Sendo assim foi adotado o comprimento de 250 mm;
- II. Utilização de parafusos de aço carbono ASTM A325 e A490, de ½ polegada, que garante resistência suficiente para que não ocorra o corte no parafuso e possa ser analisado somente os efeitos do ensaio a tração nas chapas de aço;
- III. Furos com 2 mm a mais do que o diâmetro dos parafusos, conforme recomendação do EN 1993-1-8 [17], executado com uso de broca e utilização de óleo lubrificante para resfriar a peça e diminuir tensões residuais na borda do furo;
- IV. As chapas de aço foram doadas pelo PGECIV/UERJ, sendo estas as mesmas chapas usadas no trabalho de Santos [5], sendo assim foram adotados os resultados dos corpos de provas submetidos a tração, cedidos por Santos [5], para caracterização do comportamento do aço inoxidável;

- V. Realização de ensaio prévio para avaliar os efeitos do momento gerado por excentricidade na carga última de ruptura;
- VI. Uso de chapa base de aço carbono com 6 mm de espessura e configuração dos espaçamentos furo-borda que garantisse resistência suficiente para que não ocorresse o escoamento da área bruta nem a ruptura na área líquida da chapa durante o ensaio, afim de analisar os efeitos apenas no aço inoxidável;
- VII. Uso de arruelas junto à porca para ajuste da ligação, sem aplicação de valores específicos de torque durante o aperto dos parafusos, para minimizar o efeito de atrito no resultado final das cargas de ruptura.

2.3 Preparação dos ensaios

Os modelos ensaiados foram preparados na metalúrgica METALFENAS, as chapas foram cortadas com utilização de uma guilhotina digital, operada por um funcionário, as medidas foram inseridas no computador e a máquina cortava as chapas com as dimensões especificadas. Os furos foram feitos com o uso de broca com auxílio de óleo lubrificante para não elevar a temperatura na região do furo podendo danificar a broca e/ou gerar tensões residuais excessivas na região do furo.

Todo o processo foi acompanhado de perto pelo autor deste trabalho utilizando aparelhos de medição, tal como, paquímetro, trena e gabarito das peças, para que as dimensões e posição dos furos ficassem o mais exato possível ao projetado para os ensaios.

2.4 Instrumentação

2.4.1 Extensômetros

Para a medição de deformação das chapas foram usados extensômetros de resistência elétrica, que são sensores formados por fios condutores finos que acusam variação no seu comprimento através de variações de sua resistência

elétrica, conseguindo assim medir deformações muito pequenas, que é o caso de elementos estruturais. Foram usados até três extensômetros por ensaio, conforme visto na Figura 17.

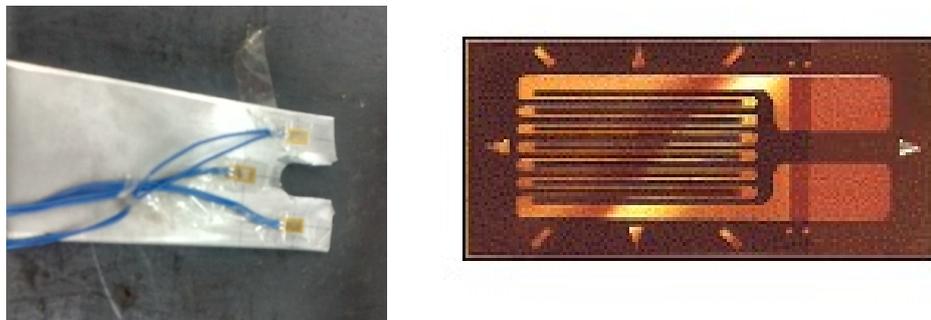


Figura 17 – Posicionamento dos extensômetros de resistência elétrica

2.4.2 LVDT

Para medição de deslocamento foi utilizado um transdutor linear de deslocamento, LVDT, Figura 18. Ele é composto por três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Como saída de dados ele fornece um sinal linear proporcional ao deslocamento do núcleo, que está em contato com o que se deseja medir, no caso do ensaio apoiado na máquina de tração, que ao aplicar carregamento se desloca na vertical gerando um deslocamento. O LVDT foi ligado ao sistema de aquisição de dados NI-PXI-1050 da National Instruments. Este foi calibrado para que as leituras de deslocamento na ligação aparafusada fossem obtidas com precisão a medida que houvesse a aplicação de carga no ensaio.



Figura 18 – Transdutor linear de deslocamento, LVDT

2.4.3 Sistemas de aplicação de carga e aquisição de dados

Foi utilizado para aplicação da carga nas ligações aparafusadas uma máquina universal de ensaios modelo Lousenhausen de 600kN, conforme Figura 19. Para obtenção dos dados coletados nos ensaios foi utilizado um sistema de aquisição de dados da empresa National Instruments. Os canais de entrada do sistema foram atribuídos a um sensor de leitura específico por cabos devidamente identificados. A célula de carga da máquina também foi conectada ao sistema.

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 outra chapa já fixada com o uso de parafusos, porcas e arruelas. Com a ligação montada foi a vez de fixar nas garras inferiores as chapa de aço inoxidável. Após todo o conjunto posicionado houve a aplicação de uma pequena carga para garantir o aperto das garras.



Figura 19 – Máquina universal de ensaios Lousenhausen de 600kN

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. Foram feitos três estágios de carga e descarga para acomodação dos parafusos durante os ensaios, antes da aplicação da carga que levasse a ruptura da chapa. Os estágios de carga aplicado correspondiam a níveis onde os materiais trabalhassem em regime elástico.

Com a leitura dos dados obtidos com o uso dos extensômetros e do LVDT, foi possível gerar as curvas carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento das ligações aparafusadas, caracterizando assim, o comportamento dos materiais estudados submetidos a esforços de tração.

2.4.4 Programação em Labview

Para leitura dos dados foi utilizado o programa LabView versão 8.2 da empresa National Instruments. A leitura dos dados era feita de forma automática a medida que a carga e deformações iam variando com o decorrer do ensaio. O computador calculava os valores da célula de carga da máquina, deformações nos extensômetros e deslocamento medidos no transdutor. O programa fornecia

gráficos de carga *versus* deslocamento e carga *versus* deformação dos sensores durante a aplicação de carga nos ensaios.

Todos os sensores eram calibrados instantes antes da realização dos ensaios. A máquina de tração possui um medidor de carga digital e analógico, os resultados foram comparados com os lidos no sistema, as variações eram na ordem de 3,0 %.

2.5 Apresentação dos ensaios experimentais

Os ensaios foram baseados nos modelos elaborados por Kim e Kuwamura [14], com configuração de um e dois furos, parafusos com 12,0 mm de diâmetro e espessura da placa de 3,0 mm. A Figura 20 mostra a configuração geométrica dos ensaios, onde: (b) é distância perpendicular ao carregamento do centro do furo até a extremidade da placa; (e) é a distância do centro do furo até a extremidade adjacente da placa na direção da carga e (p) é a distância horizontal entre o centro dos furos.

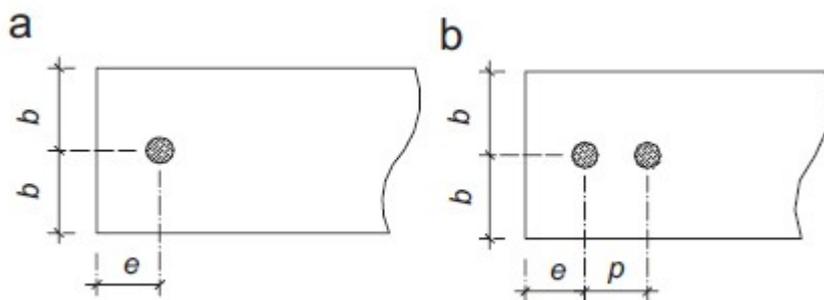


Figura 20 – Geometria dos modelos ensaiados [14]

A Tabela 3 apresenta a nomenclatura utilizada e configuração adotada para os ensaios com um e dois furos. Portanto, os ensaios serão indicados pelo tipo de aço, configuração da placa e as dimensões b , e e p . Por exemplo, um ensaio de uma placa de aço austenítico de dois furos terá a seguinte nomenclatura: A_2F_25_60_30.

Tabela 3 – Nomenclatura e configuração geométrica dos ensaios

Tipo de Aço	Configuração	b (mm)	e (mm)	p (mm)
A - Austenítico	1F - Um furo	25	18	30
D - Duplex	2F - Dois furos	25	60	
F - Ferrítico				

Sendo assim, a Tabela 4 traz a sequência de ensaios realizados, onde o detalhamento indica o tipo de aço, configuração dos furos e os parâmetros b , e e p , necessariamente nesta ordem.

Tabela 4 – Sequência dos ensaios

Detalhamento	Tipo de Aço	Configuração
E1_A_1F_25_18	Austenítico	Um furo
E2_A_1F_25_18	Austenítico	Um furo
E3_D_1F_25_18	Duplex	Um furo
E4_F_2F_25_60_30	Ferrítico	Dois furos
E5_D_2F_25_60_30	Duplex	Dois furos
E6_F_2F_25_60_30	Ferrítico	Dois furos
E7_A_2F_25_60_30	Austenítico	Dois furos
E8_D_2F_25_60_30	Duplex	Dois furos
E9_A_2F_25_60_30	Austenítico	Dois furos
E10_D_1F_25_18	Duplex	Um furo
E11_F_1F_25_18	Ferrítico	Um furo
E12_F_1F_25_18	Ferrítico	Um furo

2.6 Resultados experimentais

2.6.1 Modelo com um furo – aço Inoxidável austenítico A304

Os ensaios com aço inoxidável austenítico E1_A_1F_25_18 e E2_A_1F_25_18 romperam com o rasgamento da extremidade próximo a borda do furo do parafuso, como pode ser visto na Figura 21. As cargas últimas de ruptura foram respectivamente 40,5 kN e 43,6 kN, diferença de 7,6% entre um resultado e outro, chegando numa carga última média de 42,1 kN.



Figura 21 – Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável austenítico, um furo

O gráfico da Figura 22 mostra a curva carga *versus* deslocamento do ensaio E2_A_1F_25_18, no qual foi verificado um deslocamento máximo de 13,3 mm no momento da ruptura. A descontinuidade na curva ocorre devido ao escorregamento da placa no aperto das garras durante o ensaio.

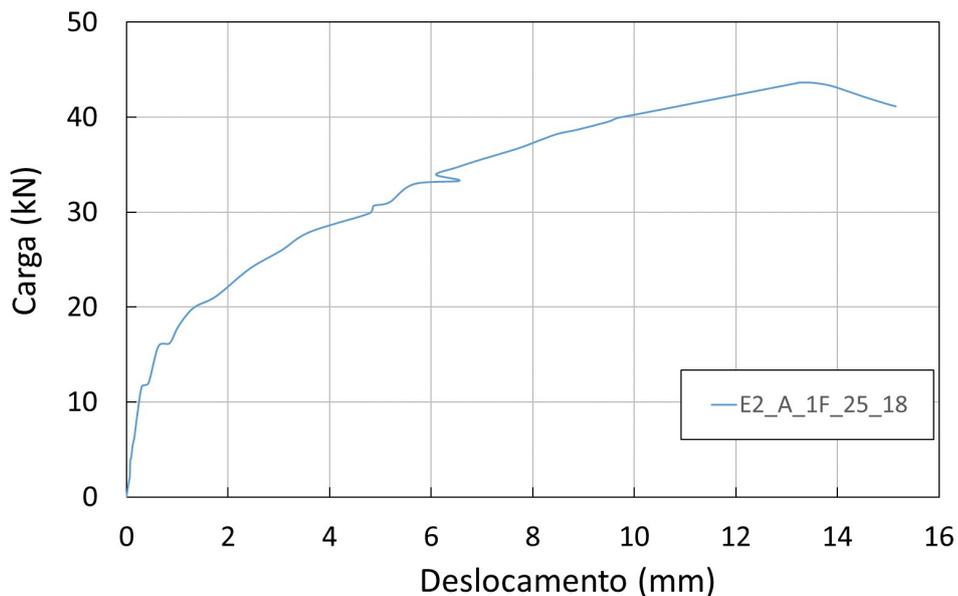


Figura 22 – Gráfico carga versus deslocamento – Aço inoxidável austenítico, um furo

2.6.2 Modelo com um furo – Aço Inoxidável Duplex 2205

Os ensaios com aço inoxidável duplex E3_D_1F_25_18 e E10_D_1F_25_18 romperam com o rasgamento da extremidade próximo a borda do furo do parafuso, como pode ser visto na Figura 23. As cargas últimas de ruptura foram respectivamente 42,7 kN e 39,7 kN, diferença entre os resultados de 7,52%, e carga última média de 41,2 kN.

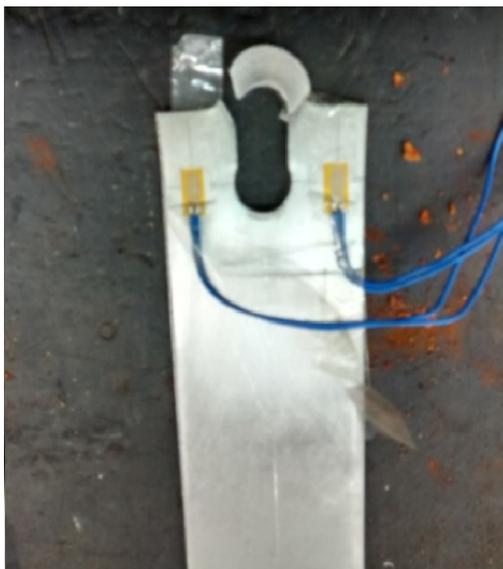


Figura 23 - Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável duplex, um furo

A Figura 24 apresenta a curva carga *versus* deslocamento do ensaio E3_D_1F_25_18, o deslocamento no momento em que se atinge a carga última é de 6,6 mm.

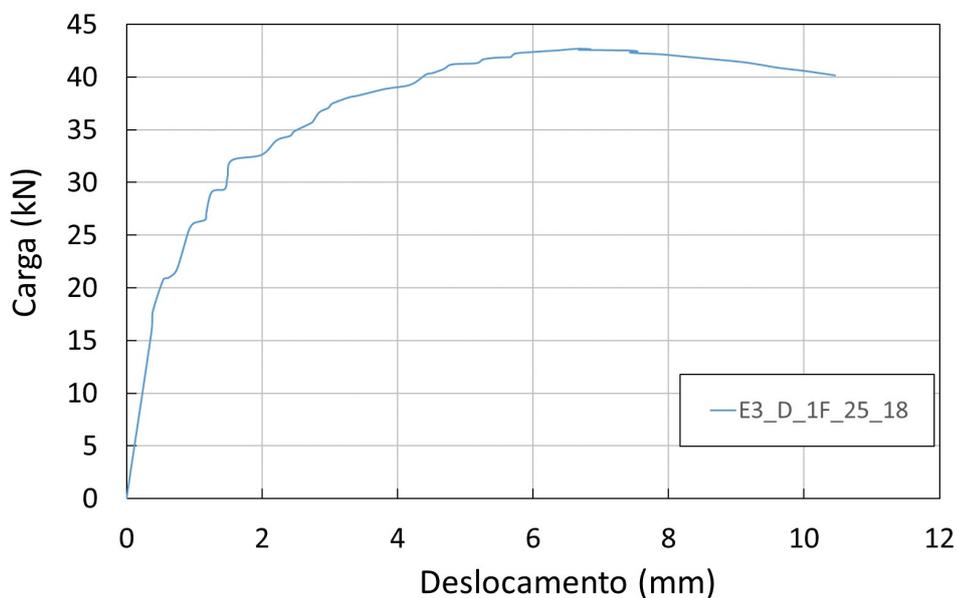


Figura 24 - Gráfico carga *versus* deslocamento – Aço inoxidável duplex, um furo

2.6.3 Modelo com um furo – Aço Inoxidável Ferrítico 430

Os ensaios com aço inoxidável ferrítico E11_F_1F_25_18 e E12_D_1F_25_18 romperam com o rasgamento da extremidade próximo a borda do furo do parafuso, como pode ser visto na Figura 25. As cargas últimas de ruptura foram respectivamente 29,9 kN e 28,5 kN, diferença de 4,83% entre os dois resultados, obtendo assim uma carga última média de 29,2 kN.



Figura 25 - Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável ferrítico, um furo

O deslocamento medido no ensaio no momento de aplicação da carga de ruptura do corpo de prova foi de 5,1 mm. O gráfico da Figura 26 mostra o comportamento do ensaio E11_F_1F_25_18 em termos de carga e deslocamento.

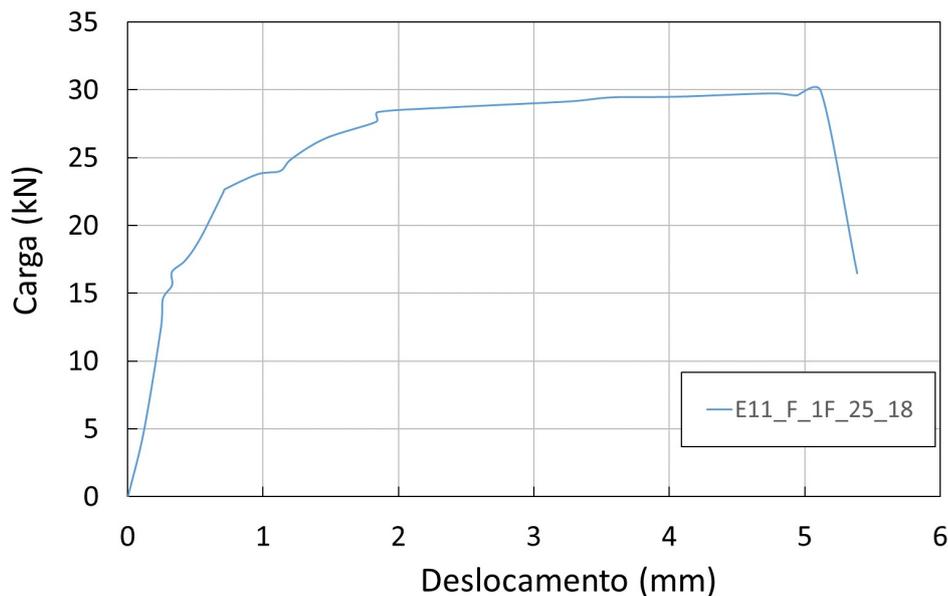


Figura 26 - Gráfico carga versus deslocamento – Aço inoxidável ferrítico, um furo

2.6.4 Modelo com dois furos – Aço Inoxidável Austenítico A304

Os ensaios E7_A_2F_25_60_30 e E9_A_2F_25_60_30 romperam na seção líquida na região do segundo furo, como pode ser observado na Figura 27.(a), com carregamento máximo no momento da ruptura de 87,4 kN e 87,6 kN, variação de 0,24% entre os dois resultados. Carga última média igual a 87,5 kN. Foi observado neste ensaio a presença do efeito *curling*, que é a deformação da borda da chapa de aço para fora do plano de aplicação da carga. Este efeito ocorre quando a distância entre o furo e a borda da chapa é muito grande, e pode ser observado na Figura 27b.

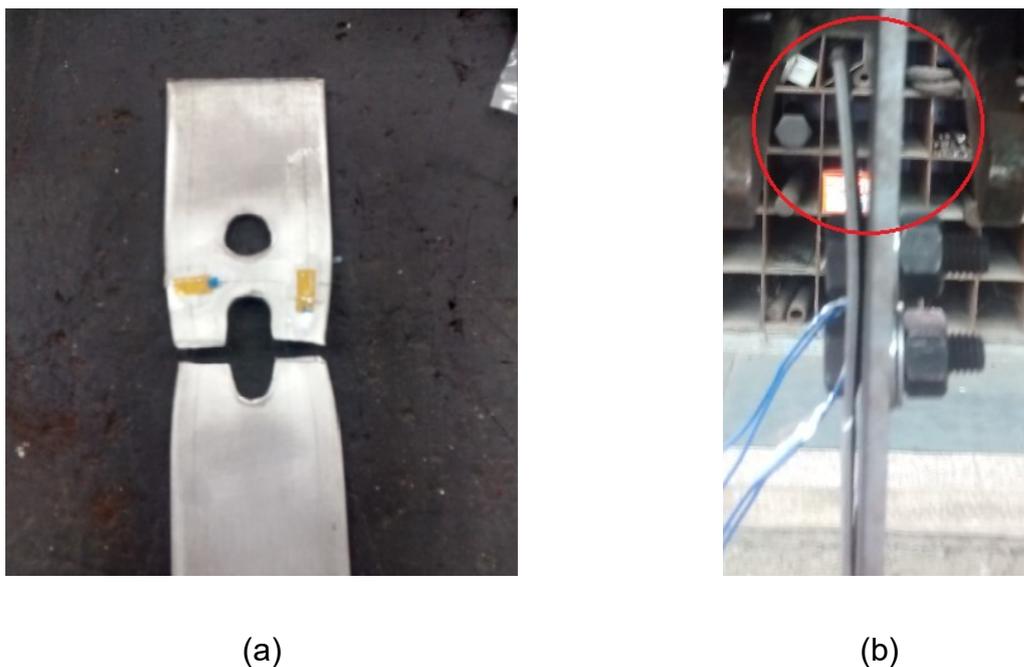


Figura 27 – (a) Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável austenítico, dois furos; (b) Efeito Curling

A chapa de aço austenítico sofreu grandes deformações durante o ensaio até o instante de ruptura, o gráfico da Figura 28 mostra que o deslocamento sofrido pelo corpo de prova chegou a 37,5 mm quando foi atingida a carga última no ensaio E7_A_2F_25_60_30.

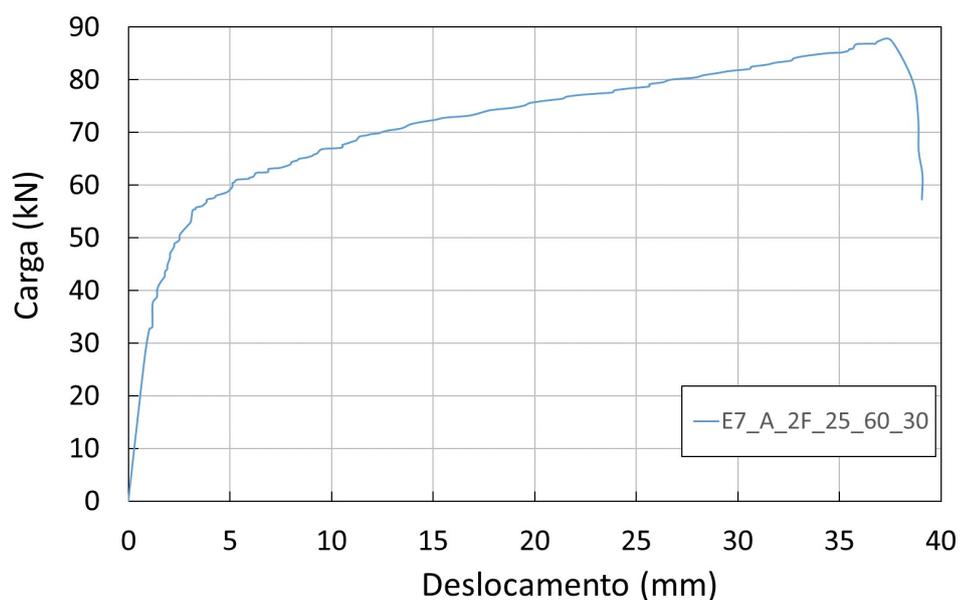


Figura 28 - Gráfico carga versus deslocamento – Aço inoxidável austenítico, dois furos

2.6.5 Modelo com dois furos – Aço Inoxidável Duplex 2205

Os ensaios E5_D_2F_25_60_30 e E10_D_2F_25_60_30 romperam na seção líquida na região do segundo furo com cargas últimas de 89,2 kN e 89,2 kN, a variação entre os resultados foi de 0,03%. Carga última média de 89,2 kN. A Figura 29 ilustra o modo de ruptura do corpo de prova.



Figura 29 – Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável duplex, dois furos

O deslocamento medido no ensaio E5_D_2F_25_60_30 foi de 7,3 mm no momento em que se alcançou a carga máxima de resistência da chapa de aço inoxidável. A Figura 30 apresenta a curva carga *versus* deslocamento do ensaio.

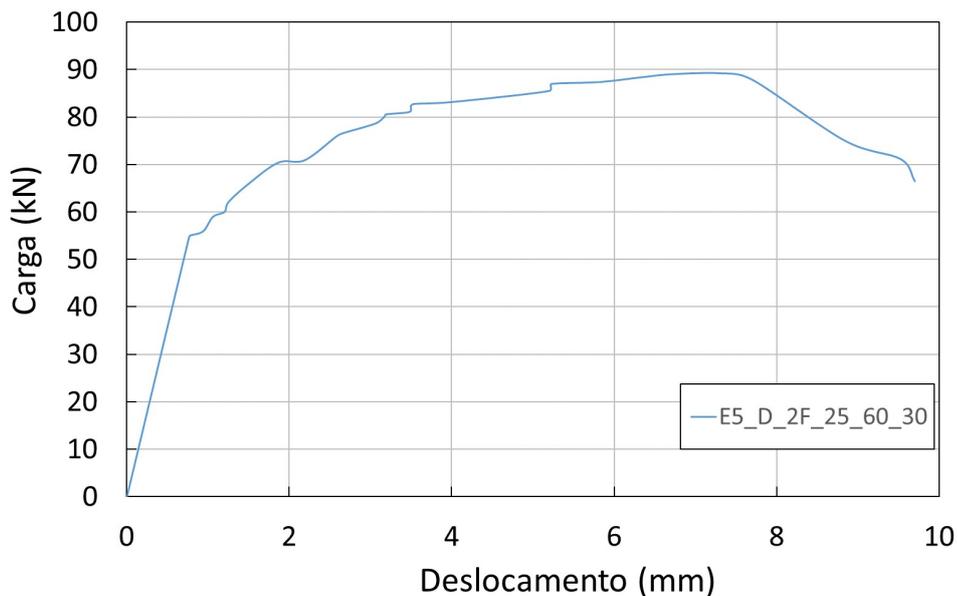


Figura 30 - Gráfico carga *versus* deslocamento – Aço inoxidável duplex, dois furos

2.6.6 Modelo com dois furos – Aço Inoxidável Ferrítico 430

Os ensaios E4_F_2F_25_60_30 e E6_F_2F_25_60_30 também romperam na seção líquida na região do segundo furo, como pode ser observado na Figura 31, com cargas últimas de 56,6 kN e 55,6 kN, representando uma variação de 1,92 % entre os dois ensaios, com carga última média de 56,1 kN.

O gráfico da Figura 32 apresenta a curva carga *versus* deslocamento do ensaio E4_F_2F_25_60_30, o deslocamento medido foi de 7,5 mm no instante em que foi atingida o carregamento máximo suportado pela chapa de aço inoxidável ferrítico.



Figura 31 – Configuração final após a ruptura – Aço inoxidável ferrítico, dois furos

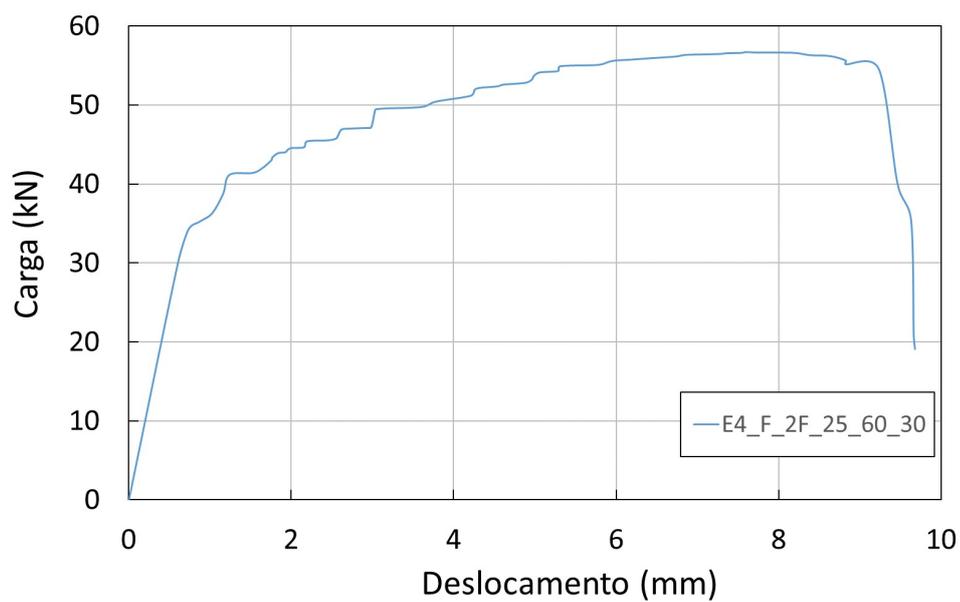


Figura 32 - Gráfico carga versus deslocamento – Aço inoxidável ferrítico, dois furos

Foi apresentado neste capítulo o programa experimental realizado, considerando todas as premissas adotadas, detalhamento e execução dos ensaios, e os resultados encontrados, tais como de carga última de ruptura, deslocamentos e modo de ruptura. A Tabela 5 apresenta um resumo dos ensaios realizados.

Tabela 5 – Resumo dos ensaios experimentais

Tipo	Ensaio	Carga (kN)	Média (kN)
1 Furo Austenítico	1	40,5	42,1
	2	43,6	
1 Furo Duplex	1	42,7	41,2
	2	39,7	
1 Furo Ferrítico	1	29,9	29,2
	2	28,5	
2 Furos Austenítico	1	87,4	87,5
	2	87,6	
2 Furos Duplex	1	89,2	89,2
	2	89,2	
2 Furos Ferrítico	1	56,6	56,1
	2	55,6	

3 MODELAGEM NUMÉRICA

O uso de análises numéricas tem sido muito explorado no meio da engenharia, isso porque o custo de realização de ensaios experimentais são altos e inviabiliza sua execução diversas vezes. Além da vantagem econômica os modelos numéricos fornecem resultados bastante confiáveis, portanto, é necessário a realização de ensaios prévios que validem e sirvam de base para calibração dos modelos.

Entre os métodos numéricos, o mais conhecido é o método dos elementos finitos (MEF), que tem sido uma ferramenta indispensável para a obtenção de solução para problemas de engenharia.

Este capítulo abordará o elaboração dos modelos numéricos de ligações aparafusadas de placas em aço inoxidável austenítico A304, ferrítico 430 e duplex 2205, verificadas no capítulo anterior. A modelagem foi executada com a utilização do software ABAQUS/CAE versão 6.4 [20]. A não linearidade geométrica e física foram consideradas nas análises.

3.1 Modelagem do material

A curva tensão *versus* deformação obtida através dos ensaios dos corpos de prova não retrata uma verdadeira indicação das características de deformação de um material submetido a tensões elevadas, pois é baseado nas dimensões originais do corpo de prova. Entretanto ocorre uma alteração continua nas dimensões do CP a medida que o carregamento é aplicado no ensaio. Portanto 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 esta alteração de dimensão.

As propriedades do material foram introduzidas no modelo numérico através da curva tensão *versus* deformação verdadeira. O conjunto de pontos considerados na curva de tensão *versus* deformação nominal foram convertidos em tensão

verdadeira e deformação verdadeira utilizando as equações (10) e (11) [20], [21],[22].

$$\sigma_v = \sigma_n(1 + \varepsilon_n) \quad (10)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (11)$$

Os gráficos apresentados nas Figura 33, Figura 34 e Figura 35 mostram as curvas tensão *versus* deformação nominal e verdadeira dos aços inoxidável duplex 2205, austenítico A304 e ferrítico 430, utilizados nos ensaios experimentais.

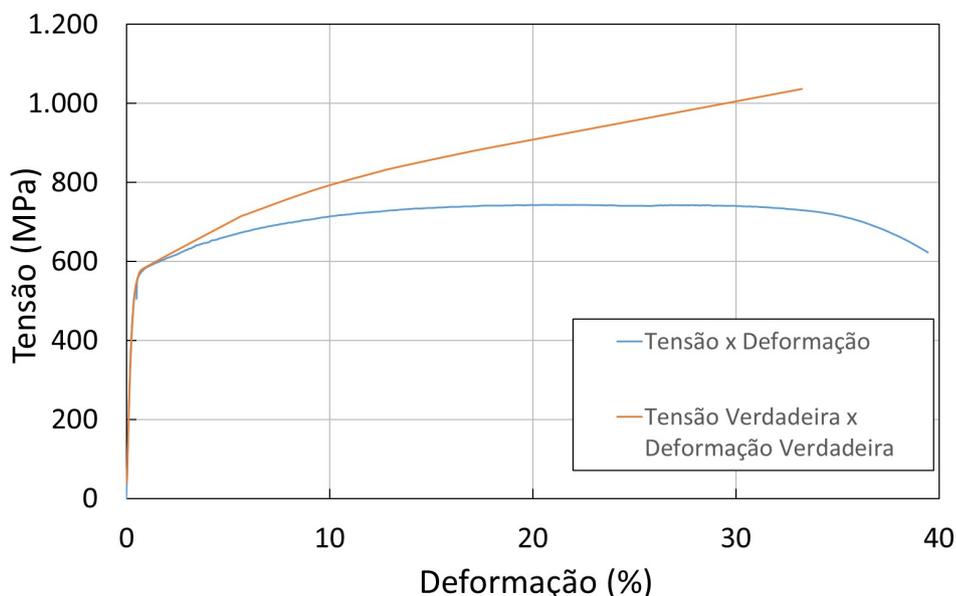


Figura 33 – Gráfico tensão *versus* deformação nominal e verdadeira – Aço inox duplex

O sistema ABAQUS [20] permite introduzir uma curva multilinear de tensão-deformação. A primeira parte da curva representa o comportamento elástico do material, que ocorre até o momento em que o material atinge sua tensão de escoamento (f_y), ou tensão de limite elástico. Este limite é 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 através de uma reta paralela ao trecho inicial correspondente a 0,2% de deformação.

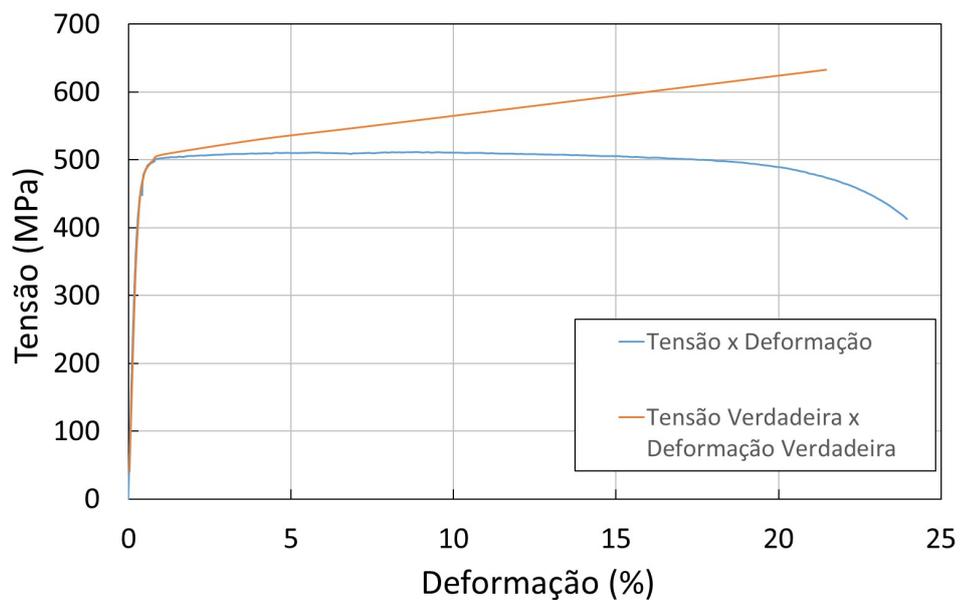


Figura 34 - Gráfico tensão versus deformação nominal e verdadeira – Aço inox ferrítico

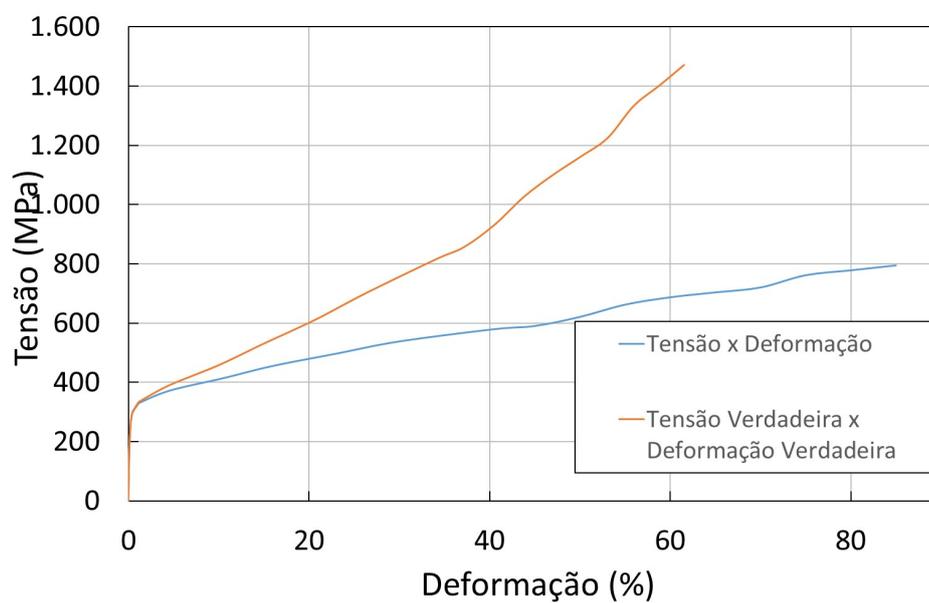


Figura 35 - Gráfico tensão versus deformação nominal e verdadeira – Aço inox austenítico

A segunda parte está relacionada as tensões inelásticas que possam ocorrer na análise numérica, para isso, deve ser introduzido no modelo a curva tensão-deformação verdadeira do material, ao invés, da curva tensão-deformação real que onde é dividida no modelo numérico em componentes elásticos e plásticos.

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 [23] [24] [25]. O critério de escoamento de Von Mises determina o nível de tensão no início do escoamento e o fluxo plástico associado relaciona o 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 [23][24].

3.2 Análise não linear - método Newton-Raphson

Em uma análise não linear, a solução não pode ser calculada através da resolução de um único sistema de equações lineares, como seria feito em um problema linear. Uma análise não linear por elementos finitos utiliza métodos iterativos incrementais na procura da menor diferença entre as forças internas e externas. O ABAQUS [20] utiliza para este fim o método Newton-Raphson, que baseia-se na implementação de incrementos de carga em várias iterações de equilíbrio até chegar em uma solução aceitável para cada um destes incrementos. A Figura 36 ilustra a execução iterativa deste método para um incremento de carga [20].

A matriz de rigidez tangencial é definida como sendo:

$$[K_i^T] \{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (12)$$

onde,

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

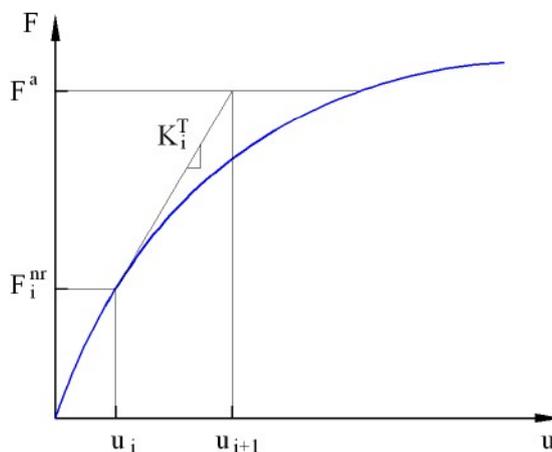


Figura 36 – Método de Newton Raphson para um incremento de carga [16]

Tanto $[K_i^T]$ e $\{F^{nr}\}$ são calculados com base na configuração deformada do sistema caracterizada pelo vetor $\{\Delta u_i\}$. A Figura 37 ilustra a iteração seguinte a exibida na Figura 36. Os valores $F^{nr_{i+1}}$ e K_{i+1}^T são calculados, e com isso, obtêm-se novos valores para u e Δu . O problema repete-se até que o resíduo $\{F^a\} - \{F^{nr}\}$ seja desprezível segundo o critério de convergência adotado.

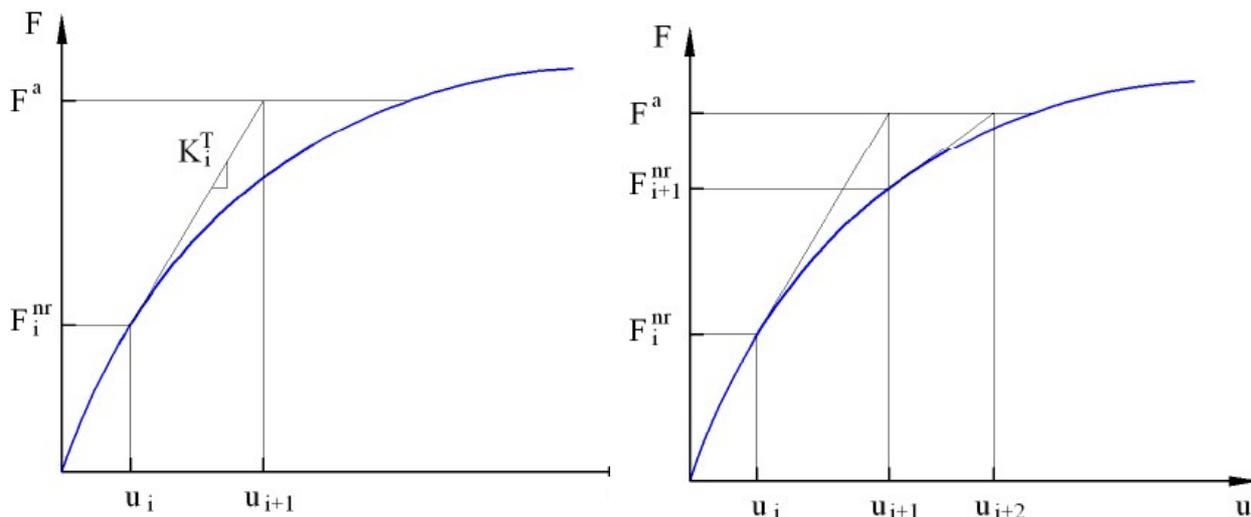


Figura 37 – Interação seguinte [16]

3.3 Tipo de elemento

O ABAQUS [20] 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 (C3D8), 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. Os elementos sólidos podem ser usados em análises lineares e não lineares que envolvam contato, plasticidade e grandes deformações [20].

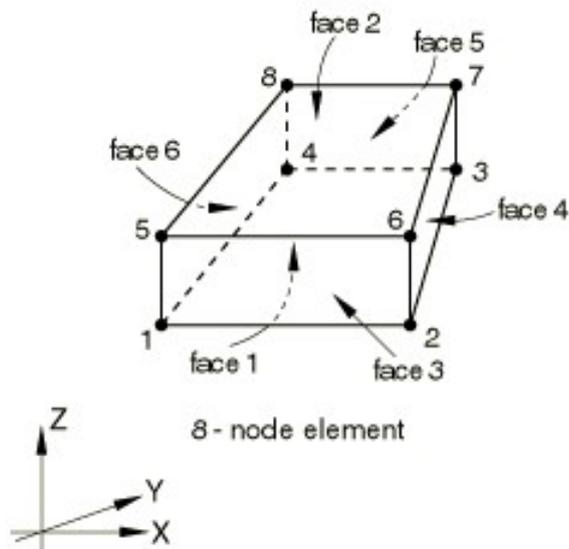


Figura 38 – Geometria do elemento sólido C3D8 [20]

3.4 Geometria e simplificação do modelo

A análise de elementos finitos busca 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 configuração do modelo em elementos finitos são as mesmas especificadas na Tabela 3, tanto para os modelos de um furo, quanto para o de dois furos. Segundo Kim e Kuwamura [14] a partir de 150 mm de comprimento da placa a influência deste parâmetro nos resultados finais é desprezível, os comprimentos efetivos dos ensaios experimentais variavam de 230 mm a 260 mm devido a aderência da placa de aço inoxidável as garras da máquina de tração, sendo assim o comprimento adotado para os modelos numéricos foi de 230 mm.

A região do parafuso em contato com a borda do furo no ensaio experimental era o fuste do parafuso, portanto, no modelo numérico foi representado somente a parte não roscada com folga de 1,0 mm para cada lado em relação ao diâmetro nominal do parafuso. Não foram considerados efeitos de pré-tensão no aperto dos parafusos. As faces extremas do parafuso tiveram seus deslocamentos e rotações

restringidos em todas as direções. A Figura 39 ilustra a discretização da malha e a condição de contorno adotadas para representação do parafuso.

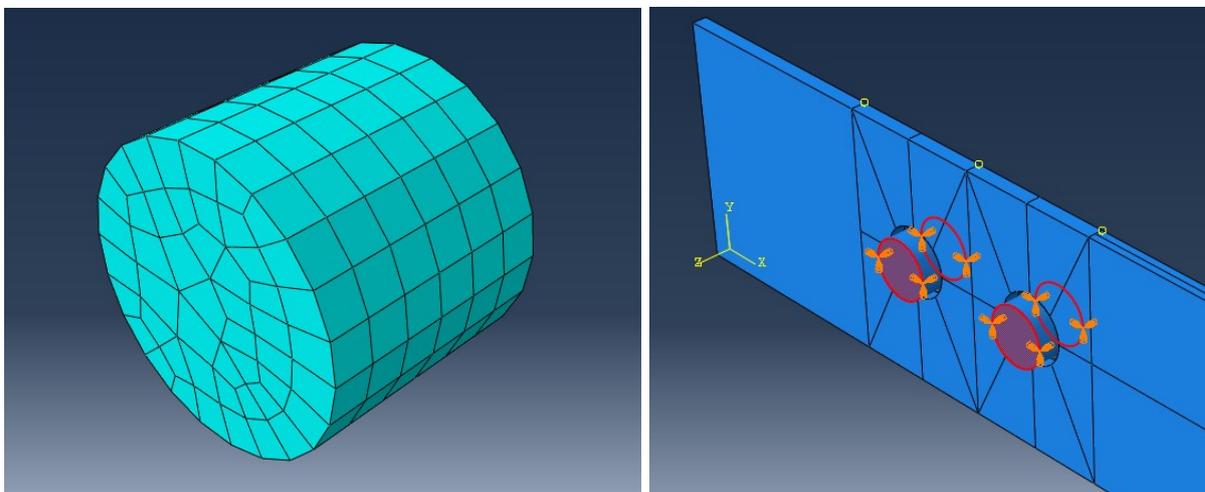


Figura 39 – (a) Discretização do parafuso; (b) Condição de contorno do parafuso

O contato entre a borda do furo da placa de aço inoxidável e o parafuso foi garantido com a criação de um elemento contato entre a superfície interna do furo e a superfície do corpo do parafuso.

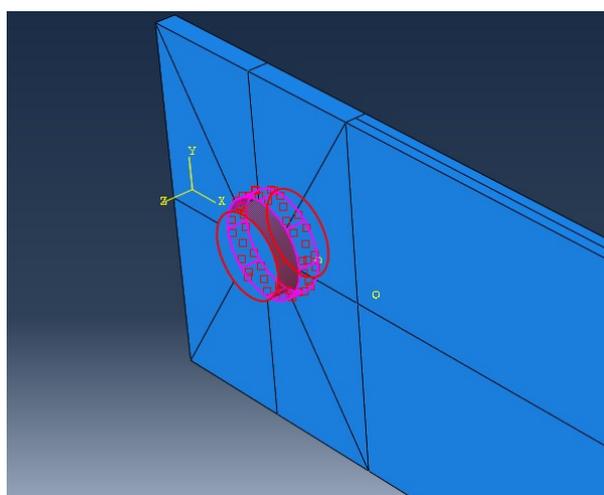
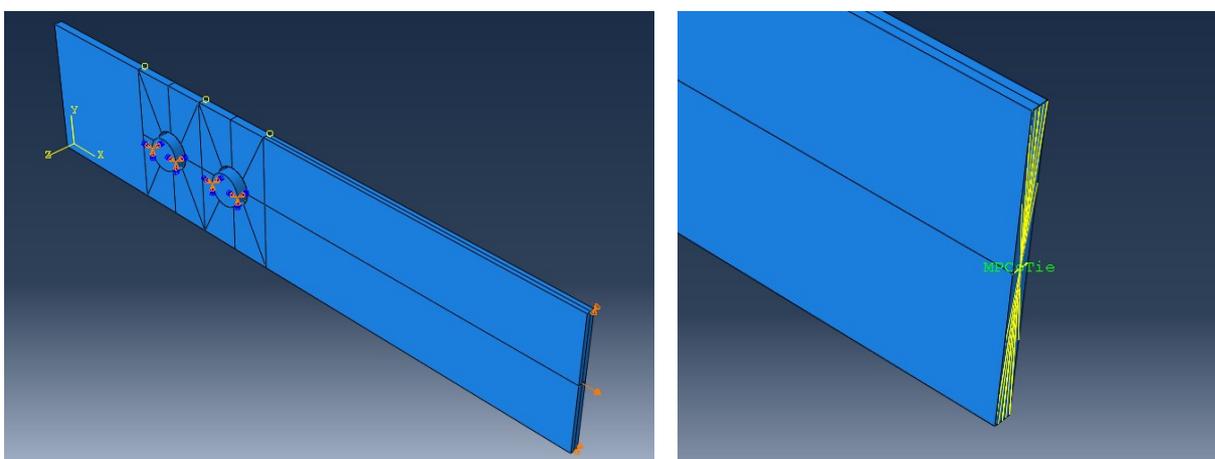


Figura 40 – Elemento de contato entre o parafuso e a borda do furo

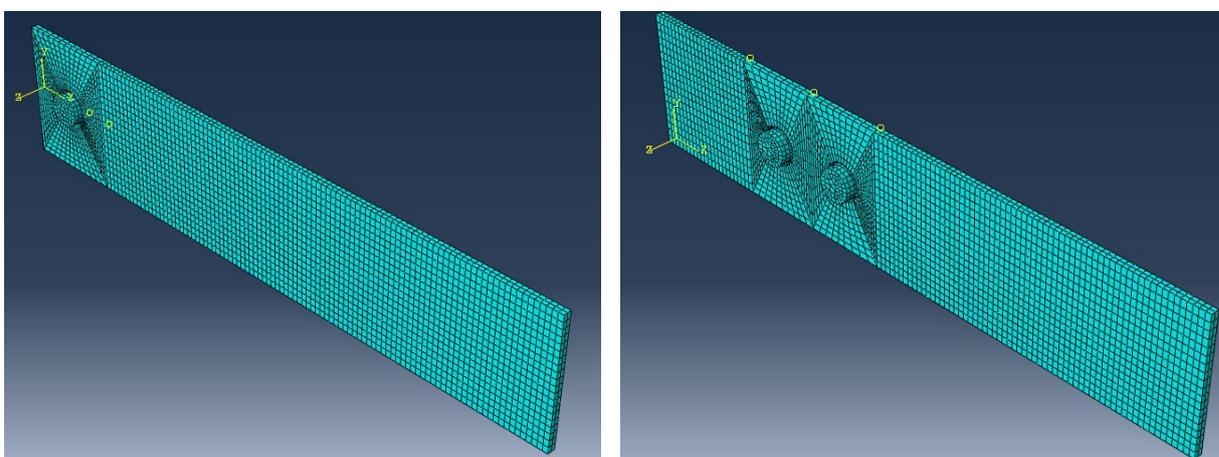
Foi considerado no modelo restrições de deslocamento nas direções Y e Z na extremidade da placa onde é aplicado o carregamento e na direção Z na borda dos furos, impedindo assim, o deslocamento para fora do plano nessas regiões. Os nós da face externa da extremidade da placa foram acoplados a um único nó localizado no centro da seção transversal. Neste nó, foi aplicado o deslocamento que foi incrementado durante a análise. Este artifício de submeter uma região a um único nó facilita a extração dos resultados.



(a)

(b)

Figura 41 – (a) Detalhe das condições de contorno, (b) Nó de aplicação do deslocamento



(a)

(b)

Figura 42 – Discretização da malha de elementos finitos (a) Um furo; (b) Dois furos

3.5 Análise dos resultados – experimental *versus* numérico

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos na análise numérica e comparados com os resultados experimentais apresentados no capítulo anterior, como modo de falha, carga última, deslocamento e deformações. E também uma analogia com a carga última teórica e seu modo de falha segundo o EN 1993-1-4 [6].

3.5.1 Modelo com um furo – aço inoxidável austenítico

O modo de ruptura do ensaio experimental com a placa de um furo em aço inoxidável austenítico ocorreu com o rasgamento da placa próximo a região do furo. A carga de ruptura média foi de 42,1 kN, e o deslocamento medido foi de 13,3 mm. Para o dimensionamento segundo o EN 1993-1-4 [6], os estados limites últimos seriam: escoamento da seção bruta com a carga de 52,6 kN; ruptura da seção líquida com carga de 62,9 kN, e por fim esmagamento da placa na região do parafuso com carga de 31,6 kN.

No gráfico da Figura 43 pode-se observar o comportamento do modelo numérico em comparação com o ensaio E2_A_1F_25_18. A carga última numérica foi 42,1 kN resultando numa pequena diferença em comparação com os resultados experimentais. Analisando separadamente a diferença foi 3,67% e 3,75% para os ensaios E1_A_1F_25_18 e E2_A_1F_25_18 respectivamente.

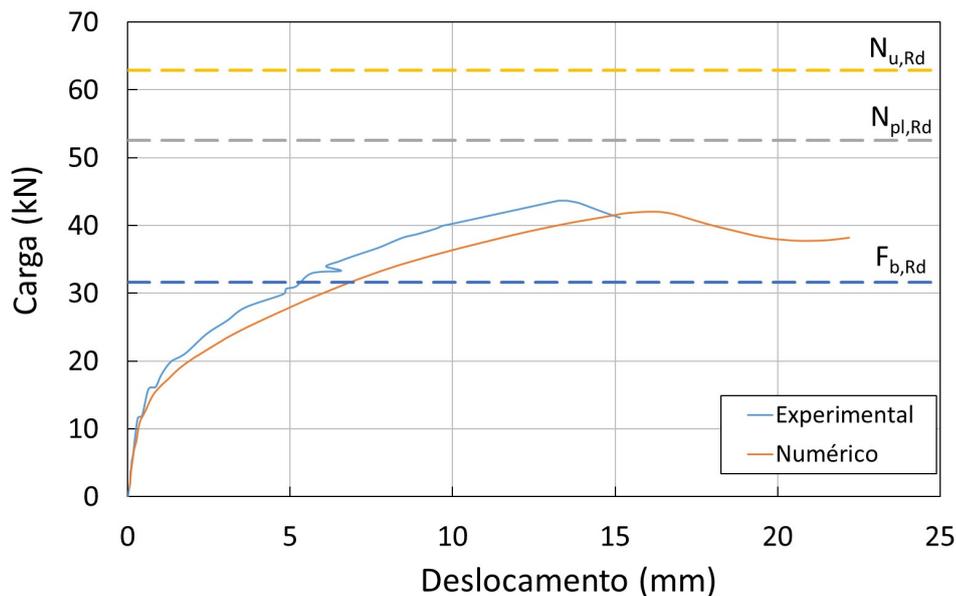


Figura 43 – Gráfico carga versus deslocamento – aço inoxidável austenítico, um furo

O modelo numérico apresentou um deslocamento de 16,1 mm no momento em que foi atingida a carga de ruptura, diferença de 17,39 % do medido no ensaio experimental.

A Figura 44 apresenta o gráfico de carga versus deformação do modelo numérico em comparação com o experimental. Foi escolhido um elemento finito no modelo próximo a região onde foram colados os extensômetros nas placas ensaiadas em laboratório. A deformação ilustrada no gráfico foi medida no sentido perpendicular à aplicação da carga.

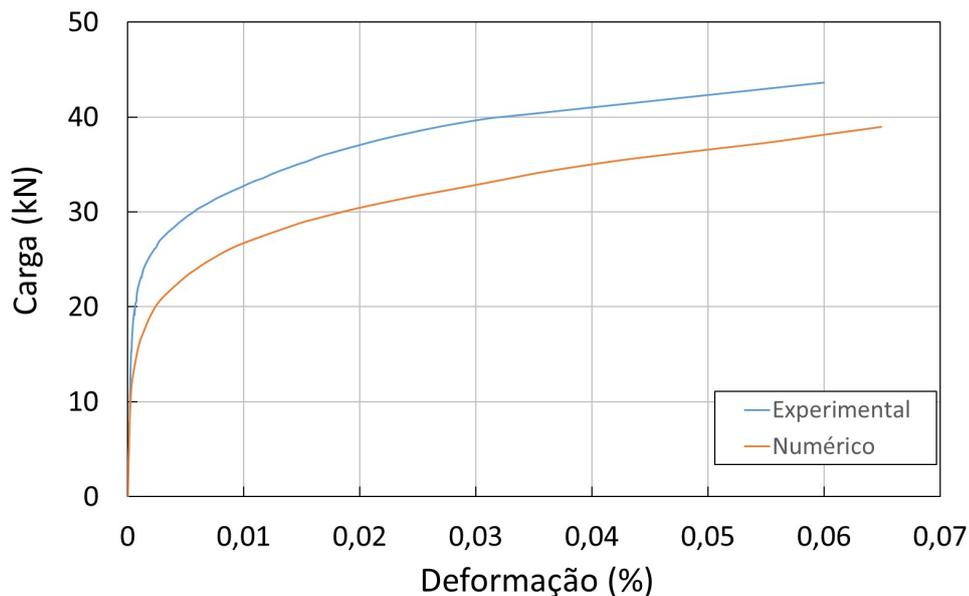
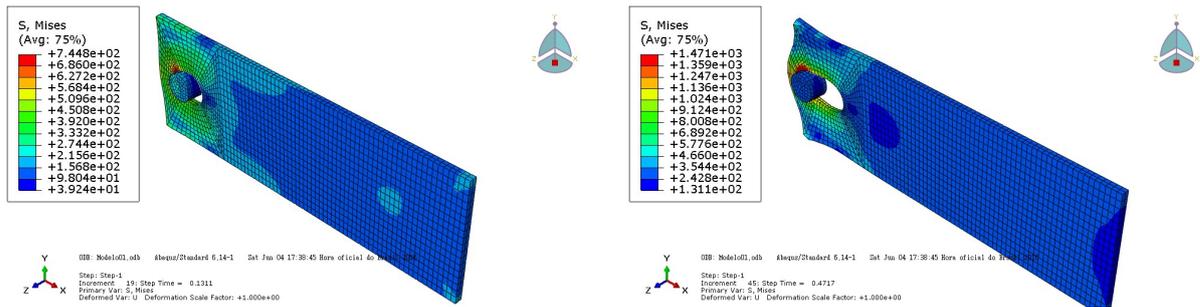


Figura 44 – Gráfico carga versus deformação – aço inoxidável austenítico, um furo

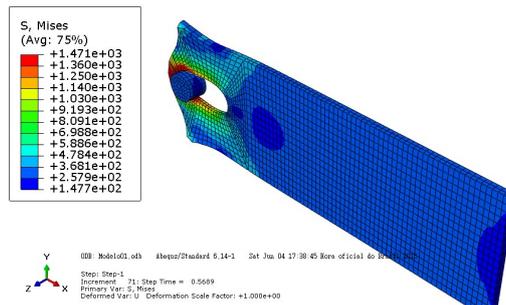
Observa-se que o modelo numérico conseguiu representar o comportamento apresentado pela chapa de aço inoxidável austenítico com um furo, entretanto o modelo experimental apresentou uma rigidez maior do que a verificada no modelo numérico.

O modo de falha do modelo experimental foi perfeitamente representado no modelo numérico. Pode-se observar na Figura 45 a distribuição de tensões na placa durante o ensaio, resultando na ruptura por rasgamento conforme a Figura 46.



a) Carga de 23,1 kN

b) Carga de 39,9 kN



c) Carga de 42,1 kN

Figura 45 – Distribuição de tensões de Von Mises - austenítico

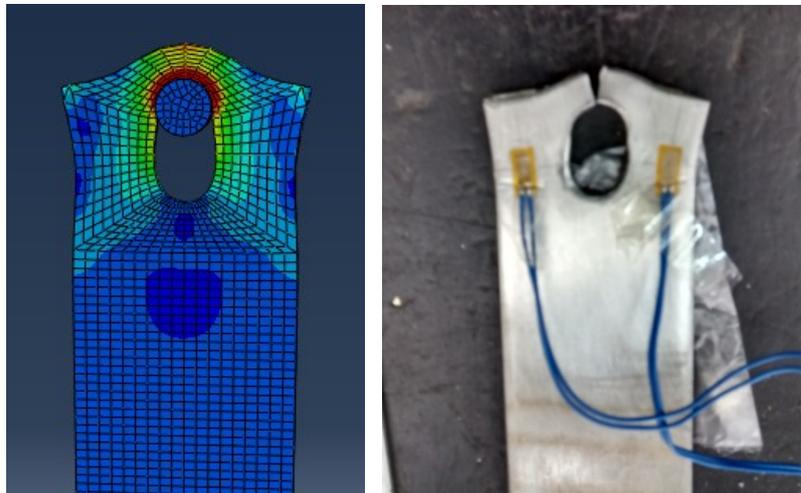


Figura 46 – Configuração deformada – numérico versus experimental - austenítico

3.5.2 Modelo com um furo – Aço inoxidável duplex 2205

O modo de ruptura do ensaio experimental com a placa de um furo em aço inoxidável duplex ocorreu com o rasgamento da placa próximo a região do furo. A carga de ruptura média foi de 41,2 kN, e o deslocamento medido foi de 6,65 mm.

Para o dimensionamento segundo o EN 1993-1-4 [6], os estados limites últimos seriam: escoamento da seção bruta com a carga de 74,2 kN; ruptura da seção líquida com carga de 63,5 kN, e por fim esmagamento da placa na região do parafuso com carga de 35,6 kN.

A carga última numérica foi 40,3 kN, resultando em uma diferença de 2,21% em relação a carga última média dos ensaios experimentais. Analisando separadamente os ensaios E3_D_1F_25_18 e E10_D_1F_25_18 a diferença foi de 5,87% e 1,56% respectivamente. No gráfico da Figura 47 pode-se observar o comportamento do modelo numérico em comparação com o ensaio E3_D_1F_25_18.

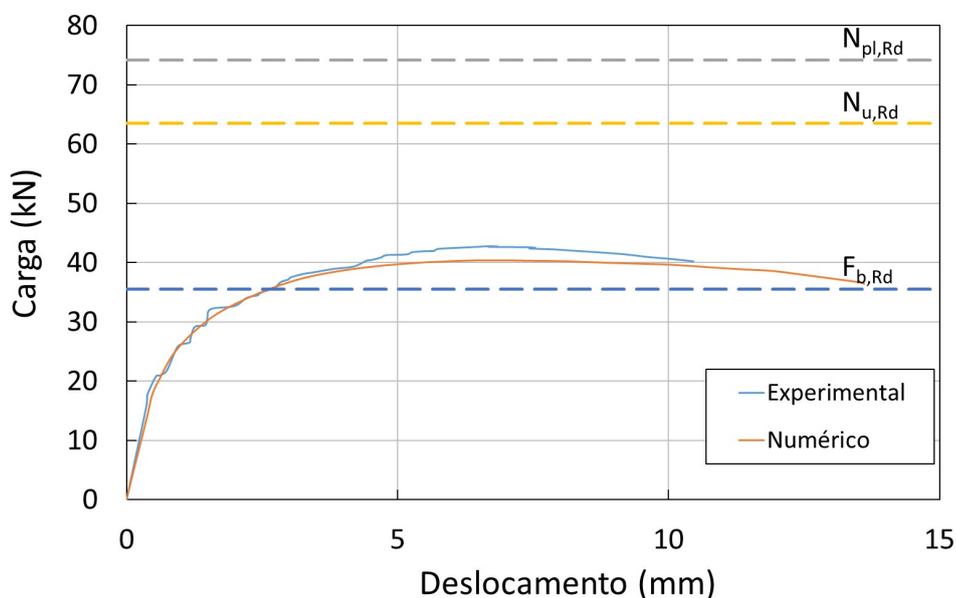


Figura 47 - Gráfico carga versus deslocamento – Aço inoxidável duplex, um furo

O deslocamento indicado no modelo numérico no momento de ruptura é igual a 6,5 mm, muito próximo do comportamento observado no ensaio experimental, 2,26% de diferença entre os resultados.

A Figura 48 apresenta o gráfico de carga *versus* deformação do modelo numérico em comparação com o experimental. Foi escolhido um elemento finito no modelo próximo a região onde foram colados os extensômetros nas placas ensaiadas em laboratório. A deformação ilustrada no gráfico foi medida no sentido perpendicular à aplicação da carga.

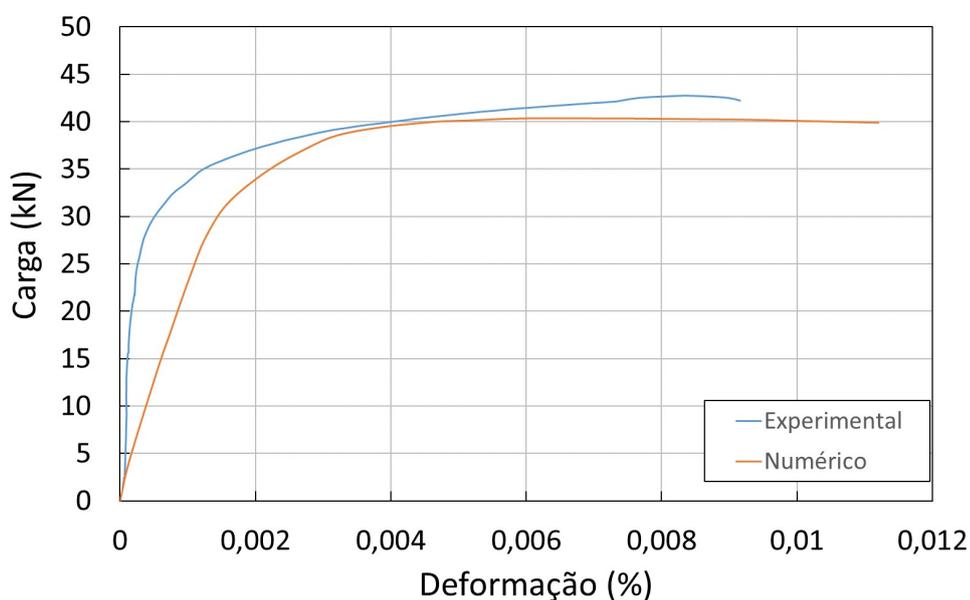
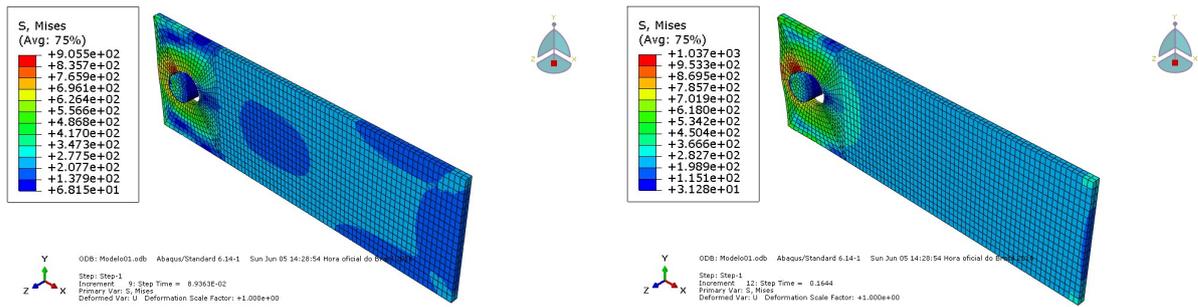


Figura 48 - Gráfico carga *versus* deformação – Aço inoxidável duplex, um furo

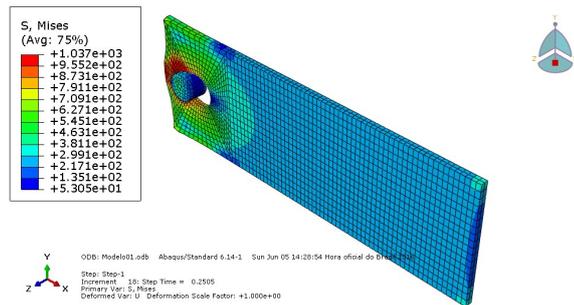
O modelo numérico atingiu níveis de deformação muito próximo do experimental a medida que foi se aproximando da carga de ruptura, entretanto no regime elástico o modelo experimental apresentou uma rigidez muito elevada comparado ao modelo numérico.

O modo de falha do modelo experimental foi perfeitamente representado no modelo numérico. Pode-se observar na Figura 49 a distribuição de tensões na placa durante o ensaio, resultando na ruptura por rasgamento conforme a Figura 50.



a) Carga de 31,4 kN

b) Carga de 38,5 kN



c) Carga de 40,3 kN

Figura 49 - Distribuição de tensões de Von Mises – duplex

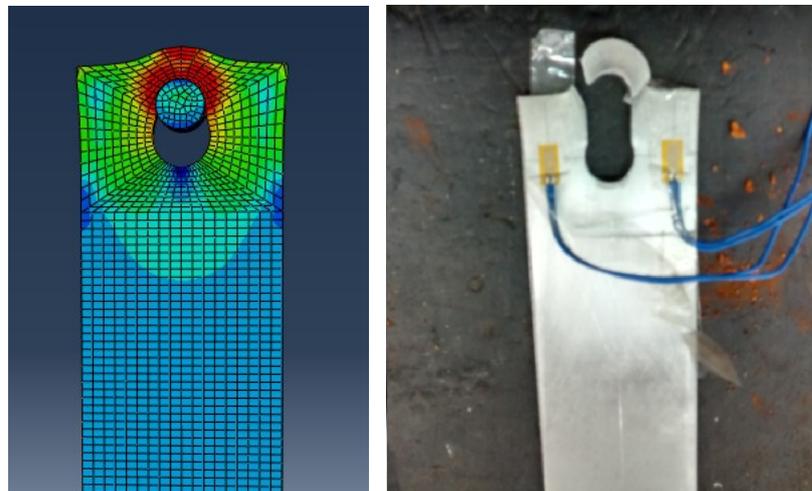


Figura 50 - Configuração deformada – numérico versus experimental – duplex

3.5.3 Modelo com um furo – Aço inoxidável ferrítico 430

O modo de ruptura do ensaio experimental com a placa de um furo em aço inoxidável ferrítico, assim como os outros, ocorreu com o rasgamento da placa próximo a região do furo. A carga de ruptura média foi de 29,2 kN, e o deslocamento medido foi de 5,1 mm. Para o dimensionamento segundo o EN 1993-1-4 [6], os estados limites últimos seriam: escoamento da seção bruta com a carga de 52,8 kN; ruptura da seção líquida com carga de 41,7 kN, e por fim esmagamento da placa na região do parafuso com carga de 24,1 kN.

A carga última numérica foi 27,5 kN, resultando em uma diferença de 5,85% em relação a carga última média dos ensaios experimentais. Analisando separadamente os ensaios E11_F_1F_25_18 e E12_D_1F_25_18 a diferença foi de 8,76% e 3,74% respectivamente. No gráfico da Figura 51 pode-se observar o comportamento do modelo numérico em comparação com o ensaio E11_D_1F_25_18.

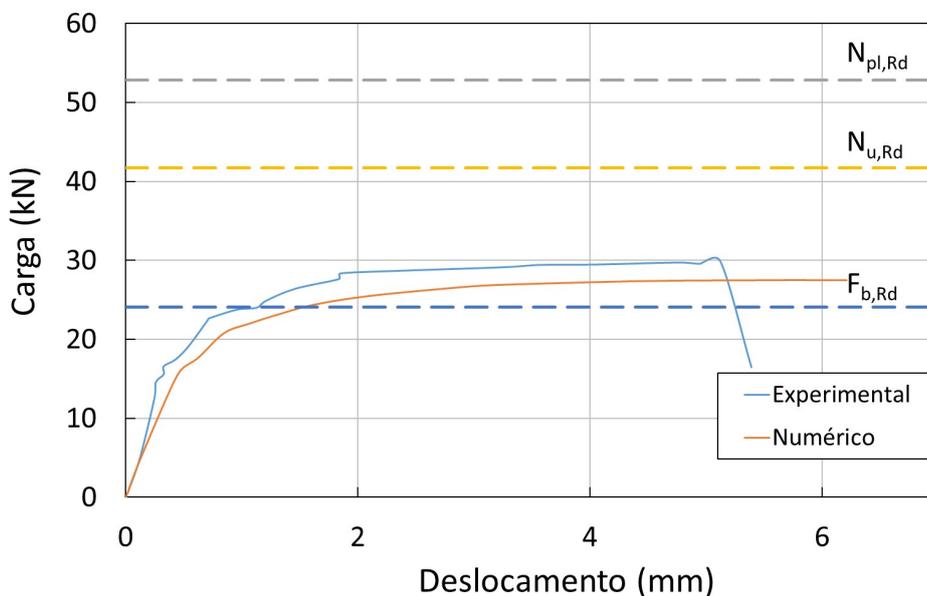


Figura 51 - Gráfico carga versus deslocamento – Aço inoxidável ferrítico, um furo

O deslocamento ocorrido na análise numérica até alcançar o carregamento máximo de resistência foi de 5,7 mm, 10,53% maior do deslocamento observado no ensaio experimental.

A Figura 52 apresenta o gráfico de carga *versus* deformação do modelo numérico em comparação com o experimental. Assim como os outros modelos, foi escolhido um elemento finito próximo a região onde foram colados os extensômetros nas placas ensaiadas em laboratório. A deformação ilustrada no gráfico foi medida no sentido perpendicular à aplicação da carga.

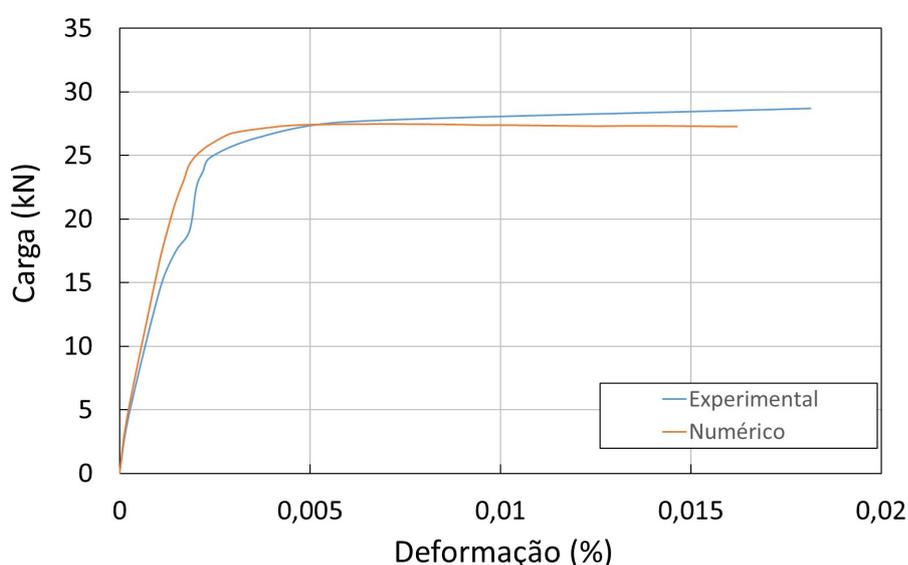
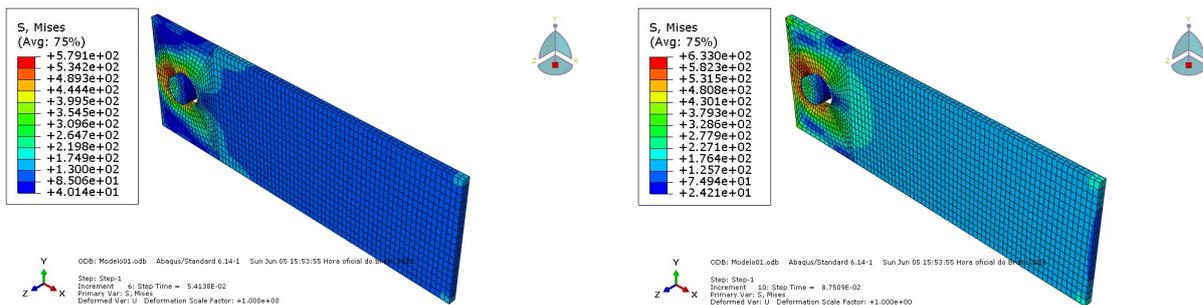


Figura 52 - Gráfico carga *versus* deformação – Aço inoxidável ferrítico, um furo

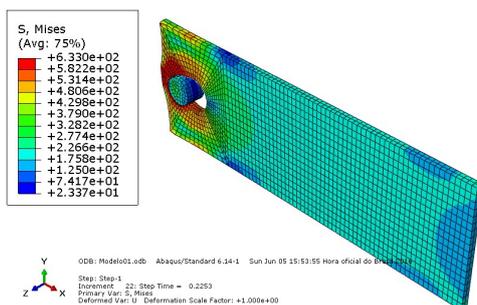
O comportamento do material no ensaio experimental foi representado de forma bem satisfatória no modelo numérico. As deformações medidas nas duas análises caminharam muito próximas à medida que o carregamento foi aplicado.

O modo de falha do modelo experimental novamente foi representado de forma muito precisa na análise numérica. Pode-se observar na Figura 53 a distribuição de tensões na placa durante o ensaio, resultando na ruptura por rasgamento conforme a Figura 54.

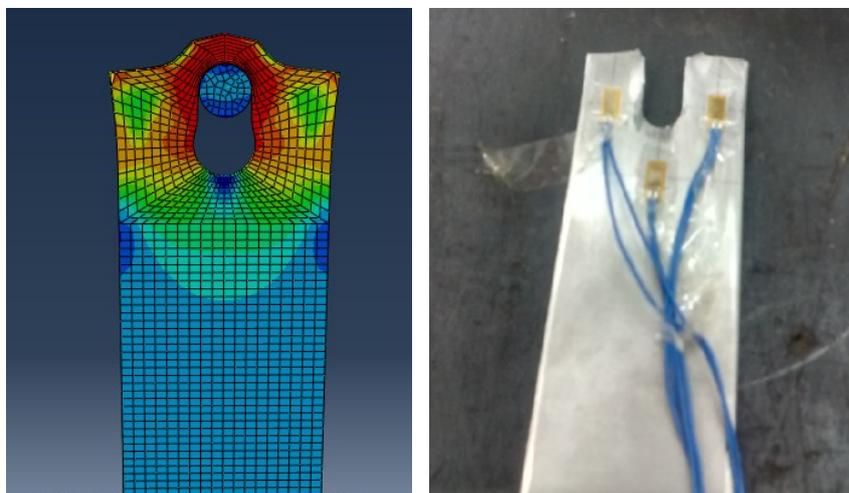


a) Carga de 17,7 kN

b) Carga de 24,4 kN



c) Carga de 27,5 kN

Figura 53 - Distribuição de tensões de Von Mises – ferrítico**Figura 54 - Configuração Deformada – Numérico versus Experimental – ferrítico**

3.5.4 Modelo com dois furos – Aço inoxidável austenítico A304

O ensaio experimental com a placa em aço inoxidável austenítico rompeu na seção líquida na região do segundo furo, mais distante da extremidade livre da placa. O carregamento médio de ruptura entre os ensaios foi de 87,5 kN, e o deslocamento medido chegou a 37,5 mm. A grande deformação observada no ensaio levou ao deslocamento da placa para fora do plano de aplicação da carga, este efeito é conhecido como *curling*. Para o dimensionamento segundo o EN 1993-1-4 [6], os estados limites últimos seriam: escoamento da seção bruta com a carga de 52,6 kN e ruptura da seção líquida com carga de 69,8 kN.

A carga última numérica foi de 81,1 kN, diferença de 7,39% em relação a média dos resultados experimentais. Analisando isoladamente os resultados experimentais, a diferença para o modelo numérico foi de 7,76% e 8,02% para os ensaios E7_A_2F_25_60_30 e E9_A_2F_25_60_30, respectivamente.

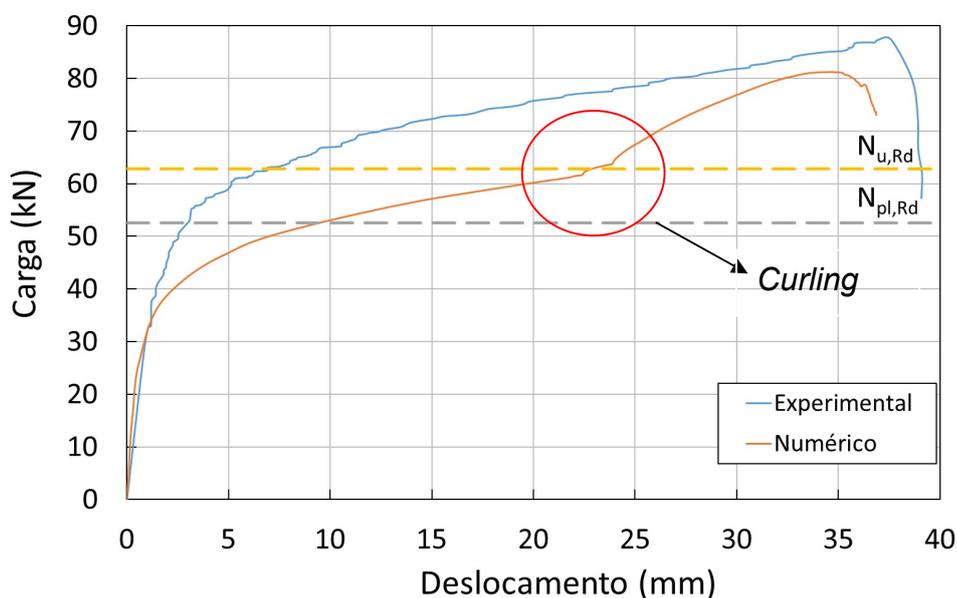


Figura 55 - Gráfico carga versus deslocamento – Aço inoxidável austenítico, dois furos

O modelo numérico apresentou em termos de carga e deslocamento resultados satisfatórios e o efeito *curling* também foi observado. O deslocamento

observado no modelo numérico no momento em que se atingiu a carga de ruptura foi de 34,5 mm. A diferença entre o ensaio experimental foi de 8,0%, assim como a carga de ruptura também obteve um desvio menor do que 10%. Entretanto o modelo numérico se comportou durante a análise de forma distinta ao experimental. Ambas as curvas seguiram juntas durante o regime elástico, mas o modelo numérico começou a registrar maiores deformações antes do experimental, e mudou completamente o comportamento da curva a partir do momento que o efeito *curling* começou a se manifestar.

A Figura 56 apresenta o gráfico de carga *versus* deformação do modelo numérico em comparação com o experimental. Foi escolhido um elemento finito no modelo próximo a região onde foram colados os extensômetros nas placas ensaiadas em laboratório. A deformação ilustrada no gráfico foi medida no sentido perpendicular à aplicação da carga.

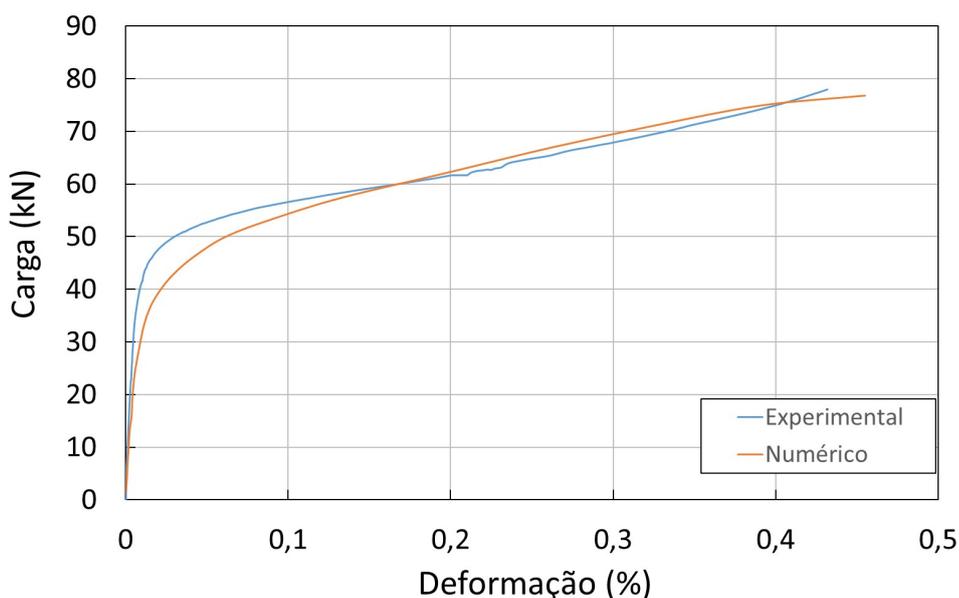


Figura 56 - Gráfico carga *versus* deformação – Aço inoxidável austenítico, dois furos

Se a curva carga *versus* deslocamento tiveram comportamentos distintos, o mesmo não aconteceu na curva carga *versus* deformação. A região escolhida para análise das deformações no modelo numérico teve um comportamento muito fiel ao medido no ensaio experimental.

O modo de falha do modelo experimental foi perfeitamente representado no modelo numérico, assim como a ocorrência do deslocamento da extremidade livre da placa de aço inoxidável para fora do plano, efeito *curling*. Pode-se observar na Figura 57 a distribuição de tensões na placa durante o ensaio, resultando na ruptura da seção líquida conforme a Figura 58.

A Figura 59 permite observar como o modelo numérico pode simular o comportamento real das estruturas. O ocorrência do efeito *curling* no modelo numérico, que é a deformação da placa para fora do plano, foi representado de forma muito próxima ao observado no ensaio experimental.

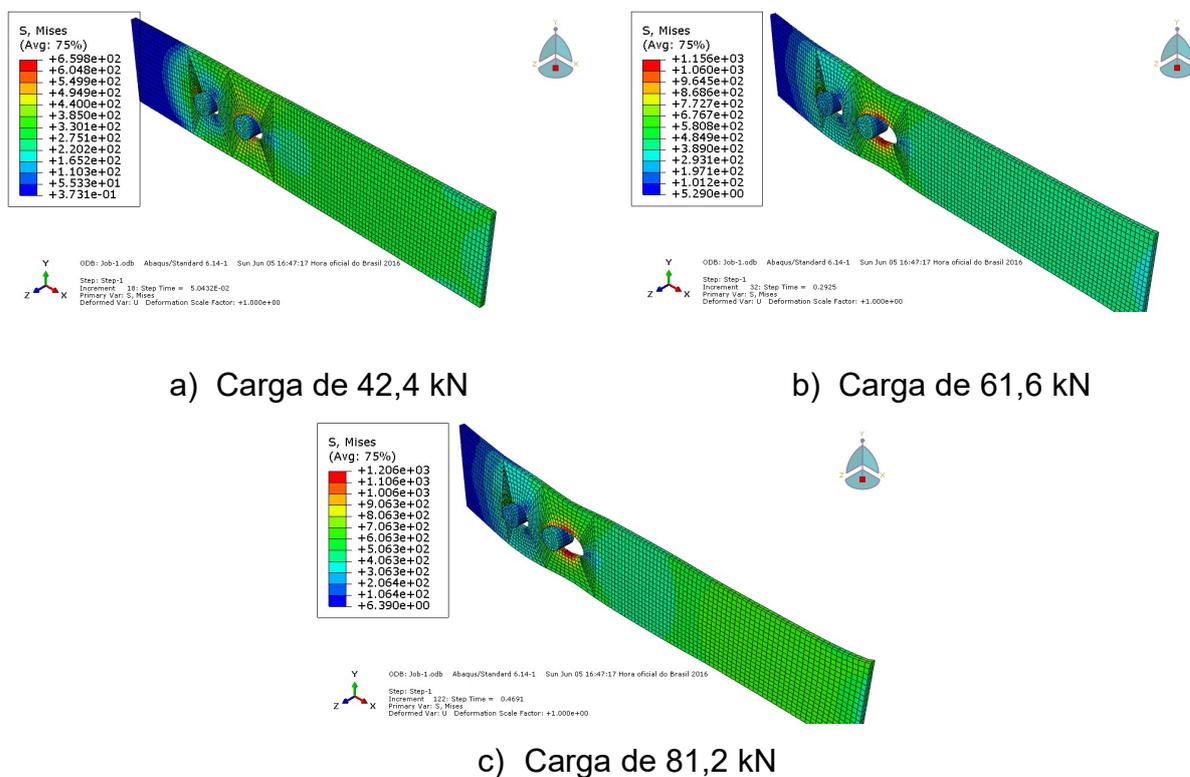


Figura 57 - Distribuição de tensões de Von Mises – austenítico

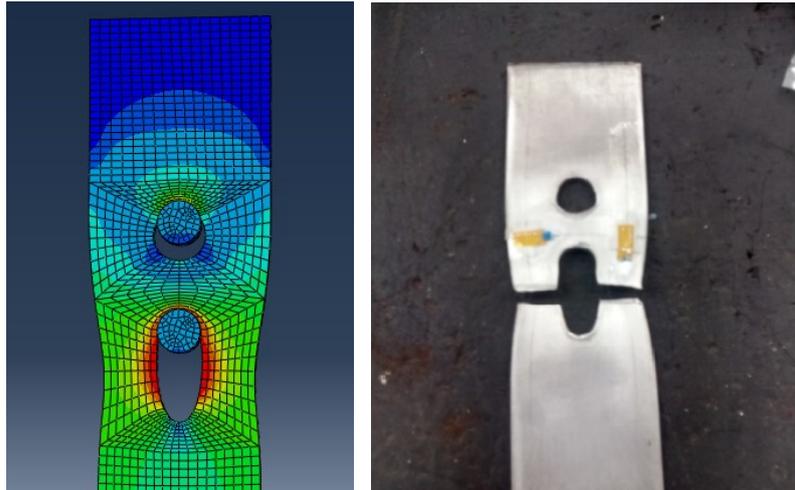


Figura 58 - Configuração deformada – numérico *versus* experimental – austenítico

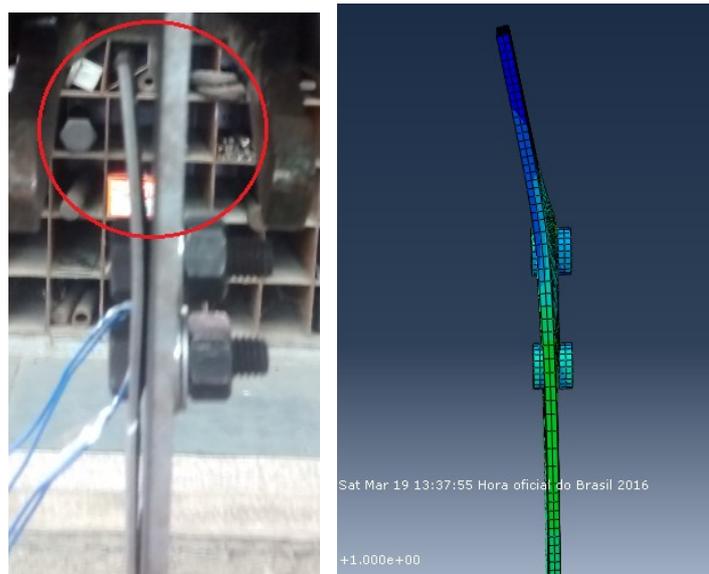


Figura 59 – Efeito *curling* nos ensaios numérico e experimental

3.5.5 Modelo com dois furos – Aço inoxidável duplex 2205

O modo de ruptura do ensaio experimental com a placa de um furo em aço inoxidável duplex ocorreu com a ruptura da seção líquida do segundo furo. A carga de ruptura média foi de 89,2 kN, e o deslocamento medido foi de 7,3 mm. Para o dimensionamento segundo o EN 1993-1-4 [6], os estados limites últimos previstos

foram: escoamento da seção bruta com a carga de 74,2 kN; ruptura da seção líquida com carga de 70,4 kN.

A carga última numérica foi 83,0 kN, resultando em uma diferença de 6,99% em relação a carga última média dos ensaios experimentais. Analisando separadamente os ensaios E5_D_2F_25_60_30 e E10_D_2F_25_60_30 a diferença foi de 7,49% e 7,46% respectivamente. No gráfico da Figura 60 pode-se observar o comportamento do modelo numérico em comparação com o ensaio E5_D_2F_25_60_30.

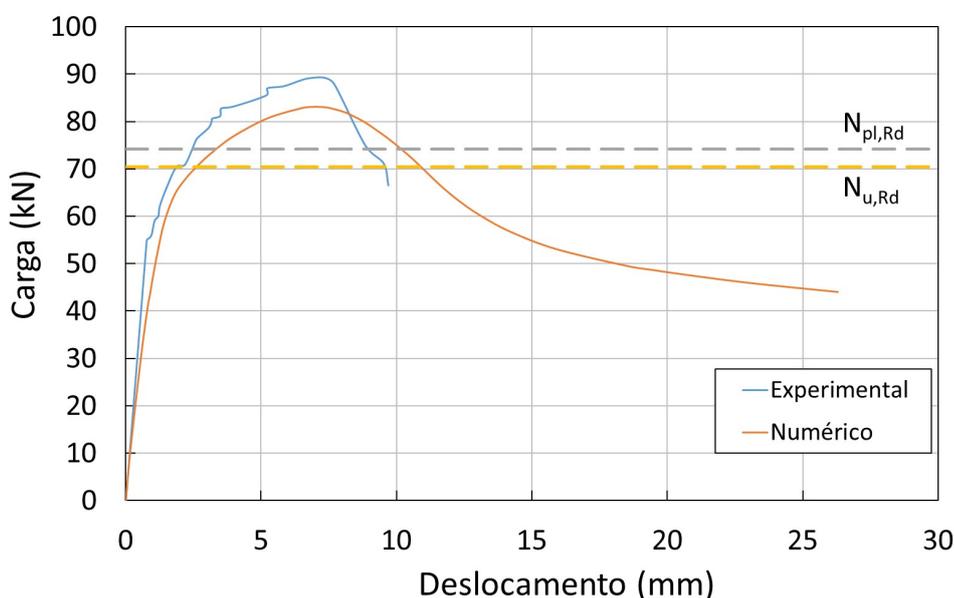


Figura 60 - Gráfico carga versus deslocamento – Aço inoxidável duplex, dois furos

O comportamento apresentado pelo modelo numérico acompanhou bem de perto a curva carga *versus* deslocamento do ensaio experimental. O deslocamento medido foi de 7,1 mm, com diferença de apenas 2,74% do resultado encontrado no ensaio realizado em laboratório.

A Figura 61 apresenta o gráfico de carga *versus* deformação do modelo numérico em comparação com o experimental. Foi escolhido um elemento finito no modelo próximo a região onde foram colados os extensômetros nas placas ensaiadas em laboratório. A deformação ilustrada no gráfico foi medida no sentido perpendicular à aplicação da carga.

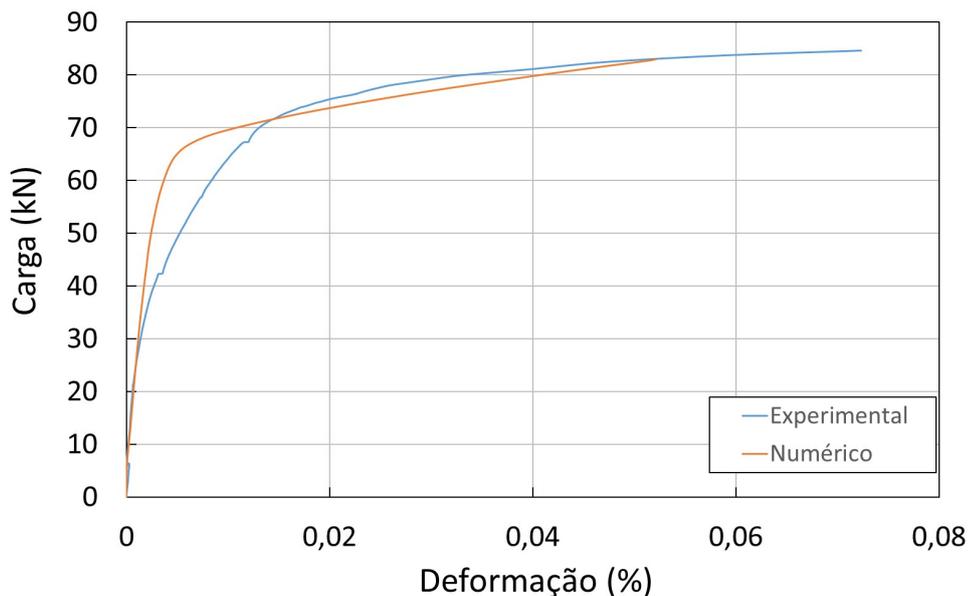


Figura 61 - Gráfico carga versus deformação – Aço inoxidável duplex, dois furos

A curva carga *versus* deformação dos ensaios numérico e experimental atingiram os mesmos níveis de deformação para aplicação de carga acima de 70 kN, entretanto o modelo numérico apresentou um regime elástico mais bem definido.

O modo de falha do modelo numérico foi o mesmo apresentado no ensaio experimental. Na Figura 62 observa-se a distribuição de tensões na placa no decorrer do ensaio, resultando na ruptura da seção líquida na região do segundo furo, conforme a Figura 63.

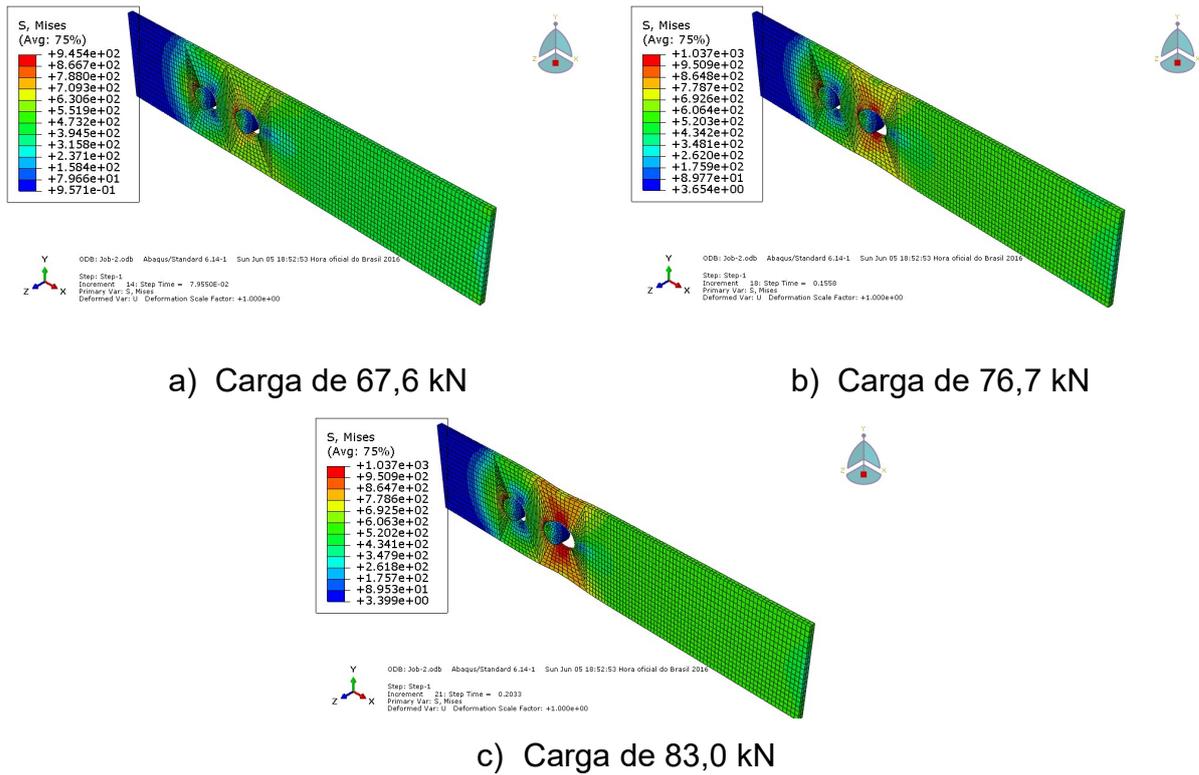


Figura 62 - Distribuição de tensões de Von Mises – duplex

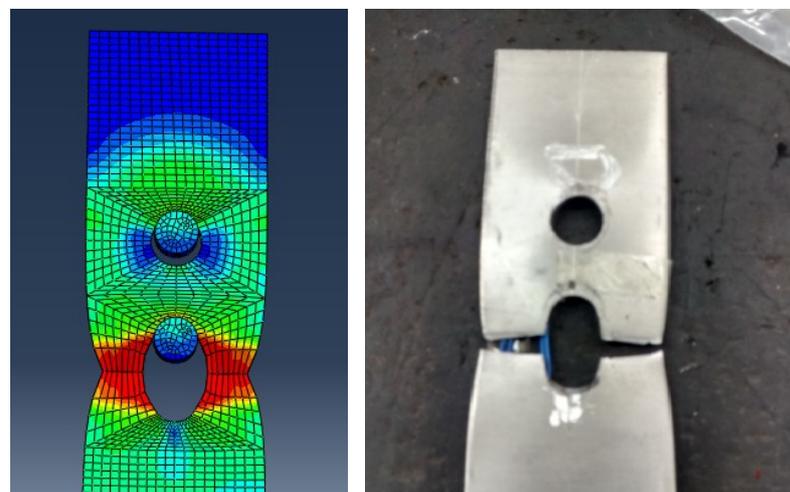


Figura 63 - Configuração Deformada – numérico versus experimental – duplex

3.5.6 Modelo com dois furos – Aço inoxidável ferrítico 430

O modo de ruptura do ensaio experimental com a placa de um furo em aço inoxidável ferrítico, assim como os outros, ocorreu com a ruptura da seção líquida no segundo furo. A carga de ruptura média foi de 56,1 kN, e o deslocamento medido foi de 7,7 mm. Para o dimensionamento segundo o EN 1993-1-4 [6], os estados limites últimos previstos foram: escoamento da seção bruta com a carga de 52,8 kN; ruptura da seção líquida com carga de 46,3 kN.

A carga última numérica foi 57,5 kN, resultando em uma diferença de 2,40% em relação a carga última média dos ensaios experimentais. Analisando separadamente os ensaios E4_F_2F_25_60_30 e E6_F_2F_25_60_30 a diferença foi de 1,44% e 3,40% respectivamente. No gráfico da Figura 64 podemos observar o comportamento do modelo numérico em comparação com o ensaio E4_F_2F_25_60_30.

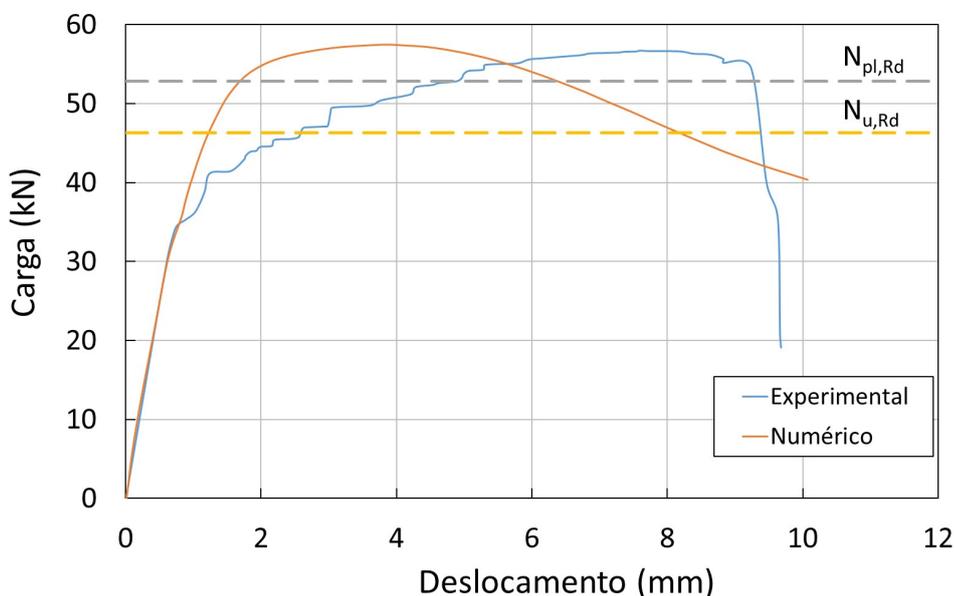


Figura 64 - Gráfico carga versus deslocamento – aço inoxidável ferrítico, dois furos

Nota-se que o ensaio experimental apresentou um deslocamento maior que o modelo numérico a partir de 35 kN, o que pode explicar essa diferença entre os

resultados é um possível escorregamento da placa de aço inoxidável durante o ensaio, mensurando um deslocamento maior que realmente ocorreu. O deslocamento medido no momento de ruptura foi de 3,93 mm na análise numérica, quase metade do deslocamento verificado no ensaio experimental.

A Figura 65 apresenta o gráfico de carga *versus* deformação do modelo numérico em comparação com o experimental. Foi escolhido um elemento finito no modelo próximo a região onde foram colados os extensômetros nas placas ensaiadas em laboratório. A deformação ilustrada no gráfico foi medida no sentido perpendicular à aplicação da carga.

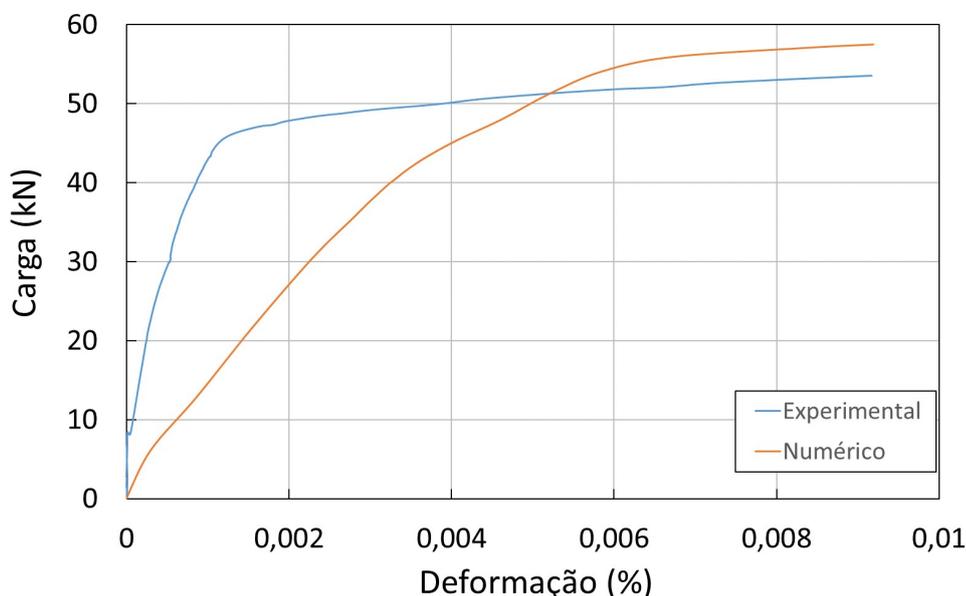


Figura 65 - Gráfico carga *versus* deformação – Aço inoxidável ferrítico, dois furos

As curvas carga *versus* deformação apresentadas se aproximam quando a placa de aço inoxidável sofre a aplicação de carregamento próximo a carga de ruptura. Entretanto a curva do ensaio experimental apresenta uma rigidez elevada até próximo de atingir 50 kN de carga aplicada, enquanto o modelo numérico sofre maiores deformações no decorrer da análise.

O modo de falha do modelo numérico foi o mesmo apresentado no ensaio experimental. Na Figura 66 observa-se a distribuição de tensões na placa no decorrer do ensaio, resultando na ruptura da seção líquida na região do segundo furo, conforme a Figura 67.

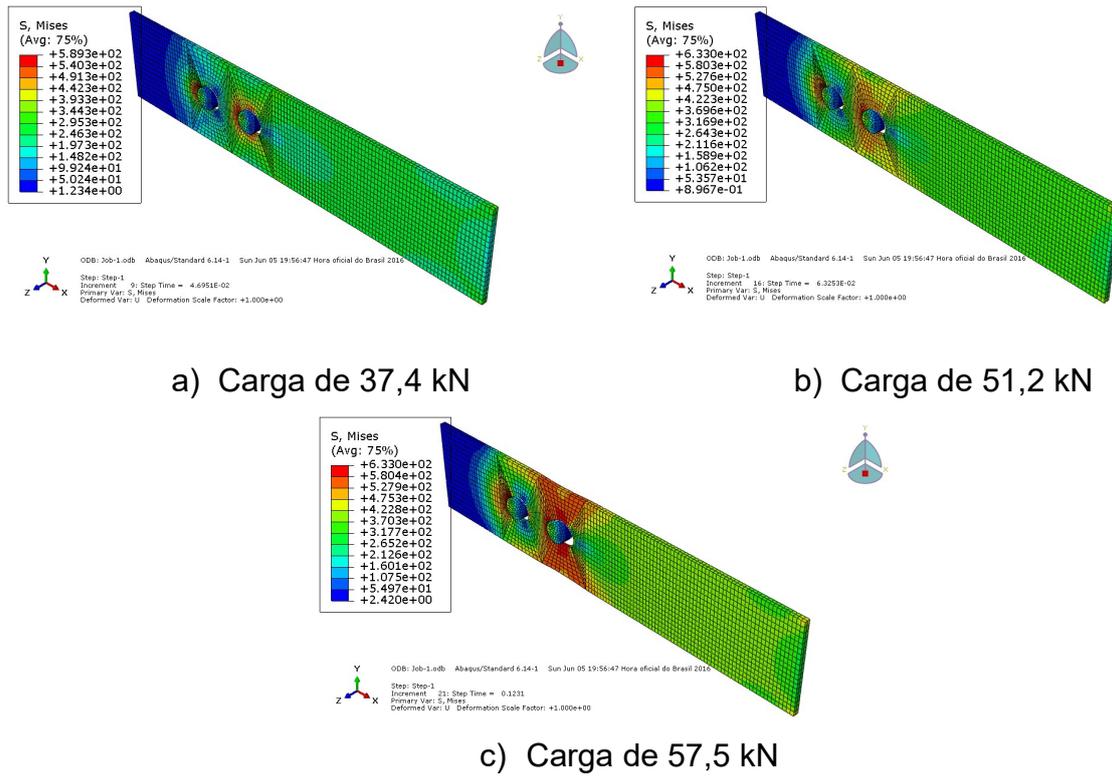


Figura 66 - Distribuição de tensões de Von Mises – ferrítico

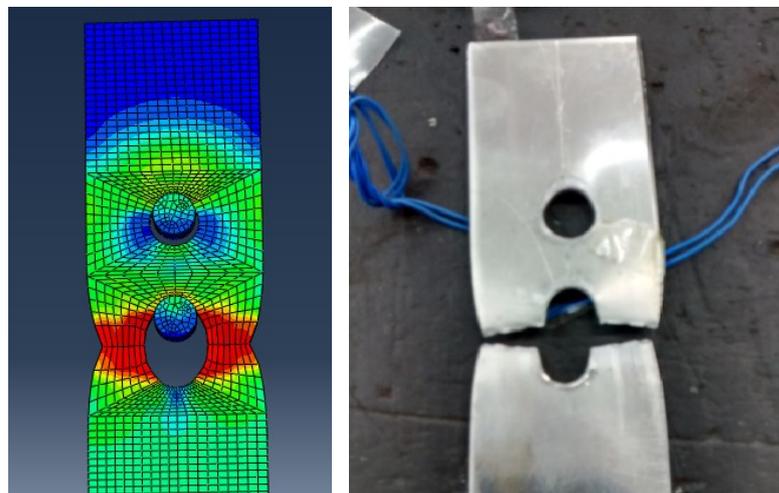


Figura 67 - Configuração deformada – numérico versus experimental – ferrítico

3.6 Comparação entre os resultados

Esta seção trará uma comparação entre os resultados obtidos para os ensaios com placas com um e dois furos de materiais diferentes. Para isto serão usados as curvas fornecidas pelos modelos numéricos, pois os mesmos não sofrem influência de agentes externos que possam interferir nos resultados finais, e como foi visto na seção anterior, forneceram resultados satisfatórios. Sendo assim todos os modelos estão sujeitos as mesmas condições de contorno e premissas adotadas na elaboração da análise numérica de elementos finitos.

3.6.1 Modelos com um furo

Todos os ensaios apresentaram o mesmo modo de ruptura, rasgamento da placa na região borda-furo, a Tabela 6 mostra os resultados encontrados nas análises numéricas e experimentais para o modelo com um furo e o resultado teórico segundo o EN 1993-1-4 [6]. A tabela também fornece o fator de segurança entre os resultados experimentais e normativos, que apresentaram como modo de ruptura o mesmo observado nos ensaios.

Nota-se que para os modelos em aço duplex e ferrítico a diferença entre a norma e o ensaio experimental é de 16% e 21%, respectivamente. Em contraste, no caso do aço austenítico a diferença é maior do que 30%. Esta diferença pode ser explicada devido o aço inoxidável obter grande capacidade de deformação e a norma europeia EN 1993-1-4 [6] não levar em consideração o ganho de resistência que ocorre pelo efeito do endurecimento por encruamento. Como observados nos ensaios, o fato do aço austenítico sofrer maiores deformações do que os outros dois tipos explica a diferença maior no resultado. Portanto, os resultados segundo a norma ainda apresentam valores que minoram a capacidade de carga de estruturas em aço inoxidável.

Tabela 6 – Resultados de carga última (em kN) para os ensaios com um furo

Tipo de material	Experimental	Numérico	Eurocode	Exp./EC	Exp./Num.
Austenítico	42,11	42,07	31,58	1,33	1,00
Duplex	41,21	40,33	35,55	1,16	1,02
Ferrítico	29,21	27,49	24,09	1,21	1,06

O gráfico da Figura 68 apresenta as curvas carga *versus* deformação dos três tipos de materiais ensaiados retirados da análise numérica realizada. Nota-se que o aço austenítico possui uma capacidade de deformação muito maior do que os aços ferrítico e duplex onde o deslocamento medido foi na ordem de quase três vezes maior do que nos outros dois modelos. Os modelos em aço inoxidável ferrítico e duplex apesar de não sofrerem um deslocamento tão elevado quanto o austenítico, também apresentam, a capacidade característica do aço inoxidável de ser um material altamente dúctil.

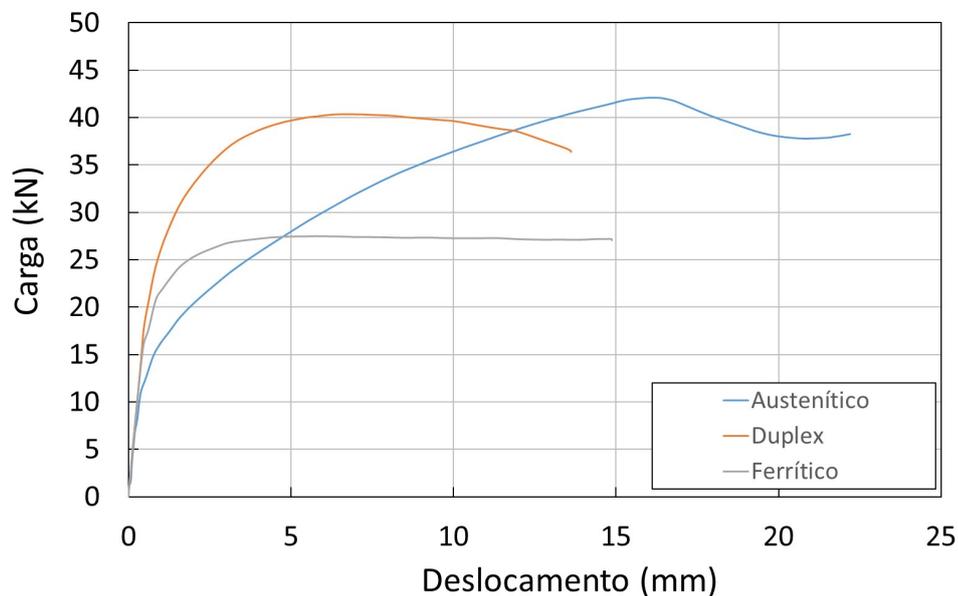


Figura 68 – Comparação de resultados – Carga *versus* deslocamento

Os modelos em aços duplex e austenítico atingiram cargas de ruptura bem próximas, 40,3 e 42,1 kN, respectivamente. O modelo em aço ferrítico rompeu com

carregamento de 27,5 kN o que pode explicar o resultado encontrado é que o modo de ruptura da placa de um furo está ligado a tensão última de ruptura (f_u) dos materiais, o aço duplex possui f_u igual a 716,46 MPa, enquanto o austenítico é igual a 710,29 MPa. Já o aço ferrítico apresentou, como mostrado anteriormente neste trabalho, f_u igual a 471,21 MPa, ou seja, uma diferença na ordem de 33% para as tensões últimas dos outros dois tipos de materiais, praticamente a mesma diferença encontrada nos resultados de carga de ruptura.

3.6.2 Modelos com dois furos

Assim como o modelo de um furo, os ensaios com a placa com dois furos apresentaram o mesmo modo de ruptura para os três tipos de aço inoxidável, nomeadamente, ruptura da seção líquida no segundo furo. A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados nas análises numéricas e experimentais para o modelo com dois furos e o resultado segundo o EN 1993-1-4 [6]. O modo de ruptura segundo a norma foi assertivo para os modelos em aço duplex e ferrítico; entretanto, para o austenítico, o previsto foi o escoamento da área bruta, mas como dito anteriormente, ocorreu a ruptura da área líquida.

Observa-se nesta tabela que a diferença entre o resultado comparando a norma e o experimental foi de 67% para o austenítico, 27% para o duplex e 21% para o ferrítico. O ensaio com aço austenítico apresentou deformações muito elevadas em comparação ao duplex e ferrítico, e assim, como dito na seção anterior, a norma EN 1993-1-4 [6] não leva em consideração o ganho de resistência que ocorre pelo efeito do endurecimento por encruamento característico do aço inoxidável. Isto poderia explicar a previsão incorreta da norma em relação ao modo de ruptura e a diferença de resultado muito maior do que os aços duplex e ferrítico. Ainda pode-se afirmar que a norma apresenta resultados conservadores para ligações em aço inoxidável.

Tabela 7 – Resultados de carga última (em kN) para os ensaios com dois furos

Tipo de material	Experimental	Numérico	Eurocode	Exp./EC	Exp./Num.
Austenítico	87,57	81,16	52,59	1,67	1,08
Duplex	89,24	83,03	70,41	1,27	1,07
Ferrítico	56,14	57,49	46,31	1,21	0,98

O gráfico da Figura 69 permite comparar o comportamento das curvas carga *versus* deslocamento dos três tipos de aço inoxidável estudados neste trabalho: austenítico, ferrítico e duplex. Nota-se novamente que o aço austenítico demonstra sua característica peculiar com grande ductilidade. Em detalhes, ele apresentou deslocamentos quase cinco vezes maior que o sofrido pelo aço duplex, e quase nove vezes, o deslocamento do aço ferrítico antes da ruptura. Os deslocamentos foram 34,7 mm, 7,1 mm e 3,9 mm para os aço austenítico, duplex e ferrítico, respectivamente.

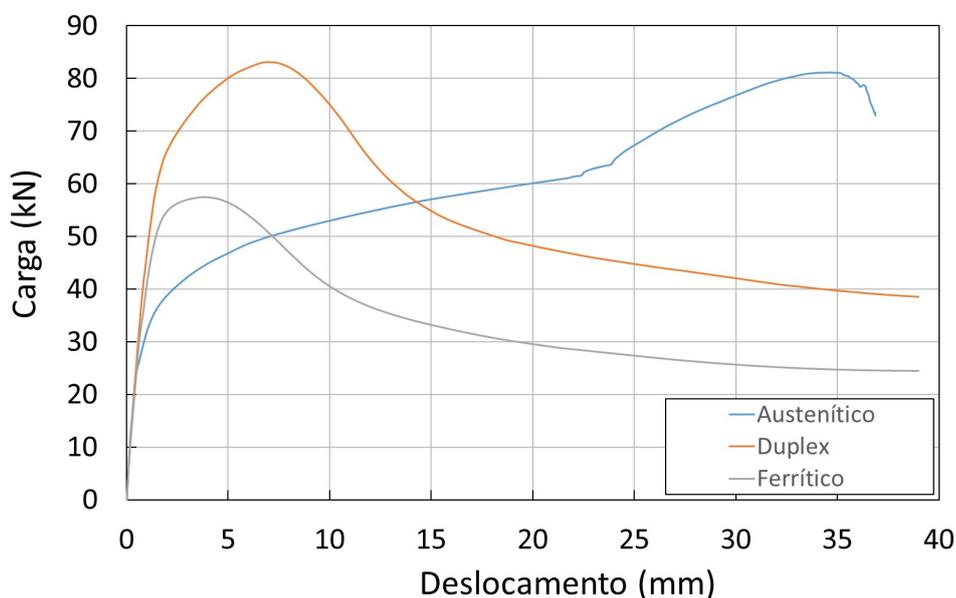


Figura 69 – Comparação de resultados – Carga *versus* deslocamento

Os modelos em aço austenítico e duplex, apesar da diferença entre as deformações sofridas, apresentaram resultados de carga última muito próximos, 81,2 kN e 83,0 kN, respectivamente. O modelo em aço inoxidável ferrítico rompeu

com carregamento de 57,5 kN. Novamente existe uma relação muito próxima de proporcionalidade entre as cargas de ruptura e a tensão última de ruptura dos materiais. A ruptura da seção líquida da placa está diretamente ligado ao f_u do material, portanto o resultado se mostra coerente visto que o f_u do aço austenítico e ferrítico se mostraram próximos nos ensaios em laboratório, enquanto o f_u do aço ferrítico é bem menor, como mostrado no tópico anterior.

4 MÉTODO DA RESISTÊNCIA CONTÍNUA

Como mencionado anteriormente, o dimensionamento de estruturas em aço inoxidável é baseado em analogias com as normas existentes para o aço carbono, entretanto, os comportamentos dos materiais são completamente distintos. O aço carbono apresenta uma curva tensão *versus* deformação com um regime elástico bem definido por um patamar de escoamento e um grau moderado de endurecimento por encruamento. Sendo assim, as premissas assumidas para projetos de estruturas em aço inoxidável são baseadas em um comportamento idealizado elástico e perfeitamente plástico, minorando assim, sua capacidade de carga devido ao ganho de resistência que ocorre pelo efeito do endurecimento por encruamento.

O Método da Resistência Contínua (MRC) é uma abordagem de projeto recém desenvolvida que consiste no fundamento e conceito de projetar uma estrutura considerando-se o material na fase plástica, proporcionando assim, consistência com o comportamento do aço inoxidável e permitindo a incorporação benéfica do encruamento do material [8].

Neste capítulo será realizada uma avaliação do comportamento estrutural das placas ensaiadas, experimental e numericamente, por meio do MRC que apresenta um modo de dimensionamento alternativo para avaliação da resistência do material.

4.1 Comportamento do material

Para o aço carbono, a tensão de escoamento é facilmente determinada pelo patamar de escoamento na curva tensão *versus* deformação. Porém, para o aço inoxidável não existe este patamar de escoamento pois este material apresenta uma curva não linear desde o início. Assim, segue-se a concepção da reta paralela ao trecho elástico passando por uma deformação de referência sendo igual a 0,1% ou 0,2%, para a obtenção da tensão de escoamento, conforme a Figura 70.

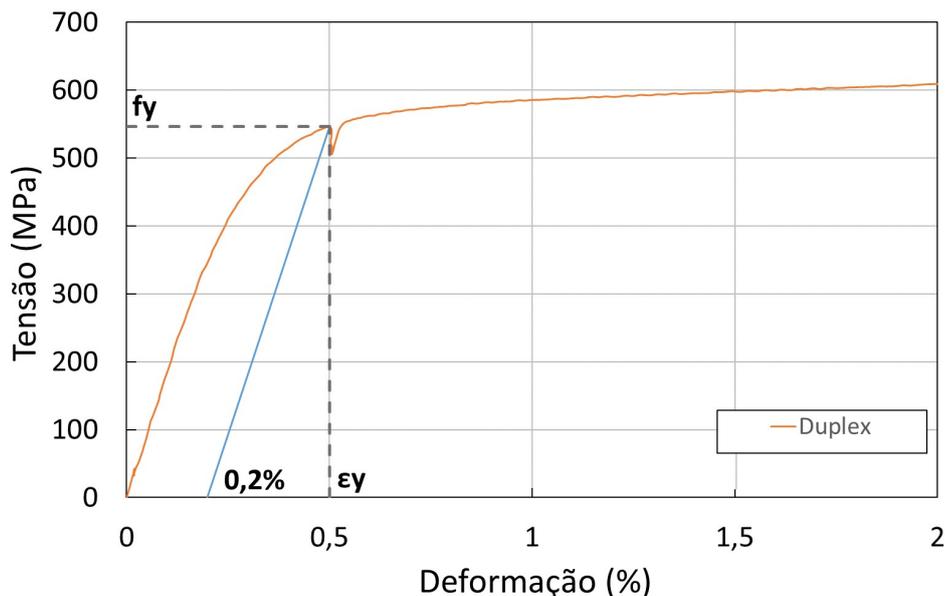


Figura 70 – Caracterização da tensão de escoamento – Aço inoxidável duplex

Assim, a tensão de escoamento é definida por (f_y, ϵ_y) , onde ϵ_y é a deformação no escoamento, ou seja, $\epsilon_y = f_y/E$, em que E é a inclinação da região elástica ou, módulo de elasticidade. O encruamento é determinado pela inclinação da reta que passa pelo ponto (f_y, ϵ_y) e um ponto máximo $(f_{m\acute{a}x}, \epsilon_{m\acute{a}x})$, onde $\epsilon_{m\acute{a}x}$ é igual a $0,2 \epsilon_u$, onde ϵ_u é a deformação última a tração e $f_{m\acute{a}x}$ é adotado como a tensão última de tração f_u . A partir destes parâmetros é possível calcular a inclinação da reta no regime plástico pela equação (13). A deformação final do material é dada pela equação (14) [8].

$$E_{sh} = \frac{(f_u - f_y)}{(0,2 \epsilon_u - \epsilon_y)} \approx \frac{E}{100} \quad (13)$$

$$\epsilon_u = 1 - \left(\frac{f_y}{f_u} \right) \quad (14)$$

No gráfico da Figura 71 é esquematizado um exemplo da configuração da curva bilinear do aço inoxidável duplex. Este novo modelo de curva levará em consideração o aumento da resistência devido ao endurecimento por encruamento do material.

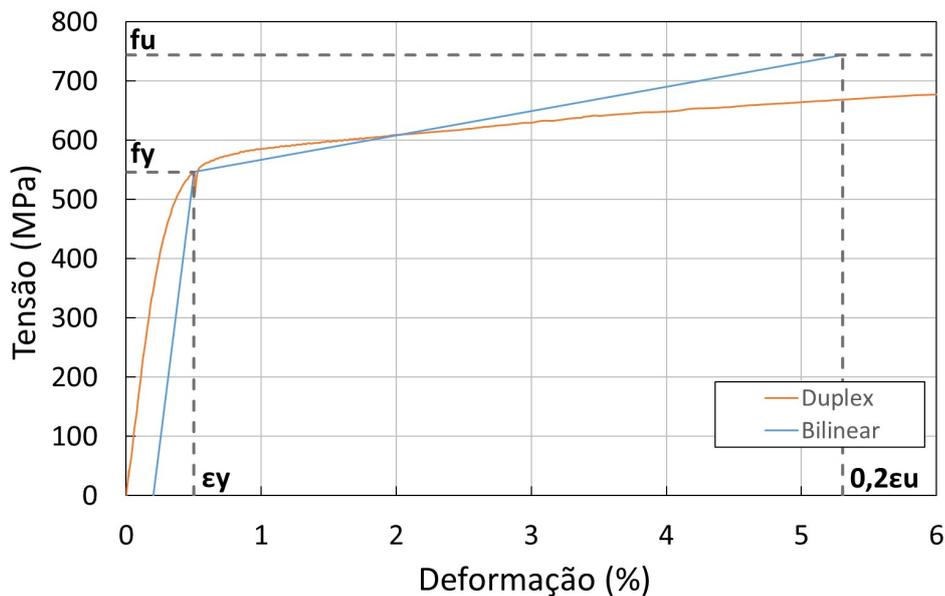


Figura 71 - MRC – Modelo de material elástico com endurecimento linear

A tensão limite de ruptura considerando o aumento da resistência do aço por encruamento, é determinada pela seguinte equação [8]:

$$f_{csm} = f_y + E_{sh}(\varepsilon_{csm} - \varepsilon_y) \quad (15)$$

onde, ε_{csm} é o menor valor entre $15\varepsilon_y$ e $0,1\varepsilon_u$.

Este modelo analítico é adequado para análise de peças estruturais que sofram grandes deformações antes da ruptura, como é o caso do aço inoxidável, e portanto, o caso das placas ensaiadas em laboratório, foco deste trabalho.

4.2 Dimensionamento pelo MRC

Nesta seção, serão dimensionados os modelos ensaiados utilizando o método descrito anteriormente, MRC [8]. Os resultados encontrados serão comparados com

os resultados obtidos a partir do dimensionamento segundo o EN 1993-1-4 [7], já apresentado no capítulo três.

4.2.1 Aço inoxidável austenítico A304

A Tabela 8 apresenta os valores encontrados de tensão e deformação para o aço inoxidável austenítico com a aplicação do método da resistência contínua.

Tabela 8 – Valores de tensões e deformações pelo MRC – Aço inox austenítico

Tensão última f_u	713,83 MPa
Tensão de escoamento f_y	357,68 MPa
Tensão limite de ruptura f_{csm}	490,84 MPa
Deformação última ϵ_u (%)	49,893
Deformação limite $20\%\epsilon_u$	9,979
Deformação de escoamento ϵ_y (%)	0,2596
Módulo na fase plástica E_{sh}	3664,48 MPa
Deformação de referência $15\epsilon_y$	0,039
Deformação de referencia $0,1\epsilon_u$	0,050

A Figura 72 apresenta o gráfico tensão *versus* deformação do aço inoxidável austenítico e a curva bilinear desenvolvida a partir do MRC. Pode-se observar também as tensões limites f_y , f_u e f_{csm} do material. A tensão limite de ruptura (f_{csm}) leva em consideração o aumento de resistência da placa devido ao endurecimento por encruamento e a tensão encontrada foi 37,2% maior que a de escoamento (f_y).

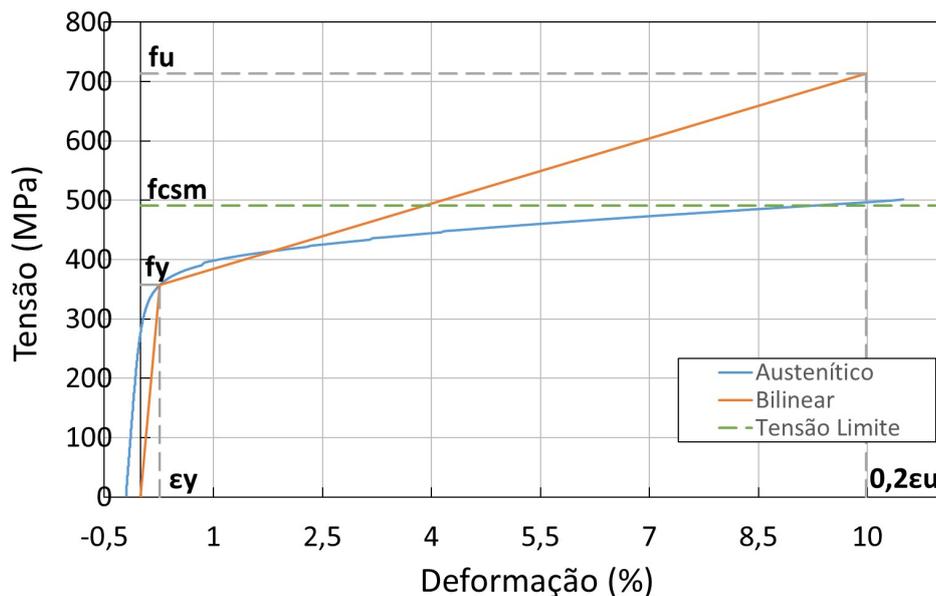


Figura 72 – MRC – Aço inoxidável austenítico

A resistência da seção transversal com base no método da resistência contínua $N_{csm,Rd}$ é dada pela equação abaixo [8], onde A é a área bruta da seção e γ_{m0} é o coeficiente de resistência, igual a 1,1 segundo tabela disposta no EN 1993-1-4 [7].

$$N_{csm,Rd} = A \times \frac{f_{csm}}{\gamma_{m0}} \quad (16)$$

Pelo método da resistência contínua, a carga máxima resistente para cálculo é igual a 66,93 kN. Este resultado vale para os dois modelos de ensaios realizados, um e dois furos, pois as placas possuem as mesmas dimensões, divergindo apenas na quantidade e posição dos furos. A Tabela 9 mostra os resultados obtidos para o aço inoxidável austenítico.

Tabela 9 – Resultados de carga última (em kN) - Aço inoxidável austenítico

Modelo	Experimental	Eurocode	Exp. / EC	MRC	Exp. / MRC
Um furo	42,11	31,58	1,33	66,93	0,63
Dois furos	87,57	52,59	1,67	66,93	1,31

O resultado encontrado pelo MRC fornece um coeficiente de segurança de 1,31 em relação a carga de ruptura do modelo de dois furos, menos conservador do que o cálculo segundo o EN 1993-1-4 [7], aumentando assim, a eficiência e aproveitando de melhor maneira a resistência do material. Entretanto, para o modelo de um furo, o método não pode ser utilizado, pois a carga de ruptura do ensaio experimental foi menor do que o calculado. Isto pode ser explicado devido a ruptura no caso do modelo de um furo ter ocorrido por esmagamento da placa, e não, na seção transversal da placa.

4.2.2 Aço inoxidável duplex 2205

A Tabela 10 apresenta os valores encontrados de tensão e deformação para o aço inoxidável duplex com a aplicação do método da resistência contínua.

Tabela 10 – Valores de tensões e deformações pelo MRC – Aço inox duplex

Tensão última f_u	743,95 MPa
Tensão de escoamento f_y	546,62 MPa
Tensão limite de ruptura f_{csm}	639,37 MPa
Deformação última ϵ_u (%)	26,524
Deformação limite $20\%\epsilon_u$	5,305
Deformação de escoamento ϵ_y (%)	0,300
Módulo na fase plástica E_{sh}	3942,54 MPa
Deformação de referência $15\epsilon_y$	0,045
Deformação de referencia $0,1\epsilon_u$	0,027

A Figura 73 apresenta o gráfico tensão *versus* deformação do aço inoxidável duplex e a curva bilinear desenvolvida a partir do MRC. Pode-se observar também as tensões limites f_y , f_u e f_{csm} do material. A tensão limite de ruptura (f_{csm}) calculada foi 16,9% maior que a de escoamento (f_y).

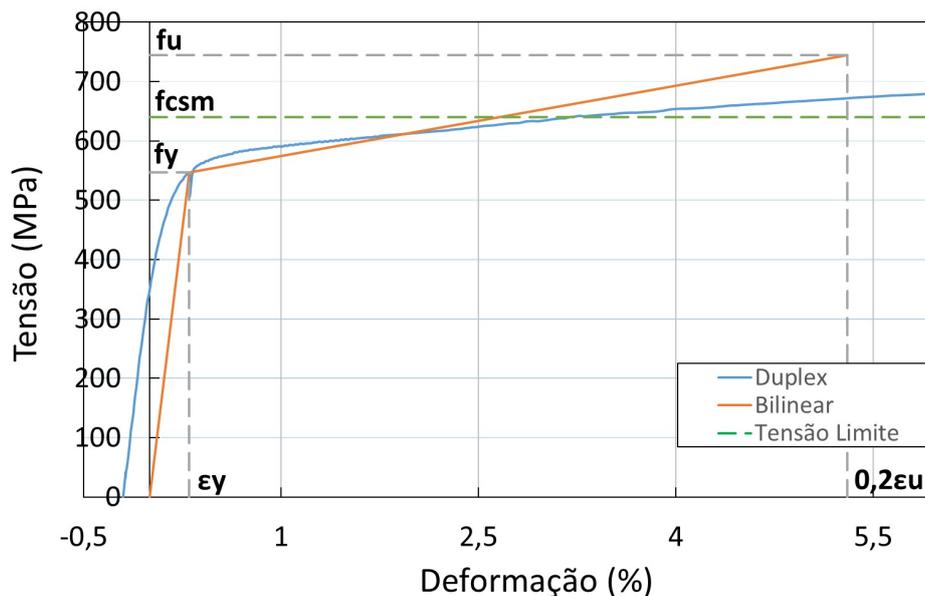


Figura 73 – MRC – Aço inoxidável duplex

Utilizando a equação 16 calcula-se a resistência da seção transversal pelo método da resistência contínua para a placa de aço inoxidável duplex. O resultado é igual a 87,19 kN. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para o aço duplex pelo cálculo segundo o EN 1993-1-4 [7], o MRC e experimentalmente para o modelo de dois furos. Como visto anteriormente, para o caso do modelo de um furo, onde a ruptura ocorreu por rasgamento, o método não se aplica.

Tabela 11 – Resultados de carga última (em kN) - Aço inoxidável duplex

Modelo	Experimental	Eurocode	Exp. / EC	MRC	Exp. / MRC
Dois furos	89,24	70,41	1,27	87,19	1,02

O MRC forneceu um resultado bastante satisfatório, apenas 2,05 kN de diferença para o resultado experimental. O dimensionamento da placa tracionada utilizando o método, neste caso, consideraria a carga última efetiva como sendo a carga última de projeto, ou seja, em termos de projeto, a resistência do material seria aproveitada ao máximo, entretanto, a estrutura poderia trabalhar muito próxima ao colapso caso não seja especificado um coeficiente de segurança entre a carga

última encontrada pelo método, e o carregamento que atuará na placa tracionada de fato.

4.2.3 Aço inoxidável ferrítico 430

A Tabela 12 apresenta os valores encontrados de tensão e deformação para o aço inoxidável ferrítico com a aplicação do método da resistência contínua.

Tabela 12 – Valores de tensões e deformações pelo MRC – Aço inox ferrítico

Tensão última f_u	511,50 MPa
Tensão de escoamento f_y	479,14 MPa
Tensão limite de ruptura f_{csm}	490,69 MPa
Deformação última ϵ_u (%)	6,33
Deformação limite $20\%\epsilon_u$	1,27
Deformação de escoamento ϵ_y (%)	0,2815
Módulo na fase plástica E_{sh}	3289,37 MPa
Deformação de referência $15\epsilon_y$	0,042
Deformação de referencia $0,1\epsilon_u$	0,006

A Figura 74 apresenta o gráfico tensão *versus* deformação do aço inoxidável ferrítico e a curva bilinear desenvolvida a partir do MRC. Pode-se observar também as tensões limites f_y , f_u e f_{csm} do material. A tensão limite de ruptura (f_{csm}) calculada foi 2,41% maior que a de escoamento (f_y).

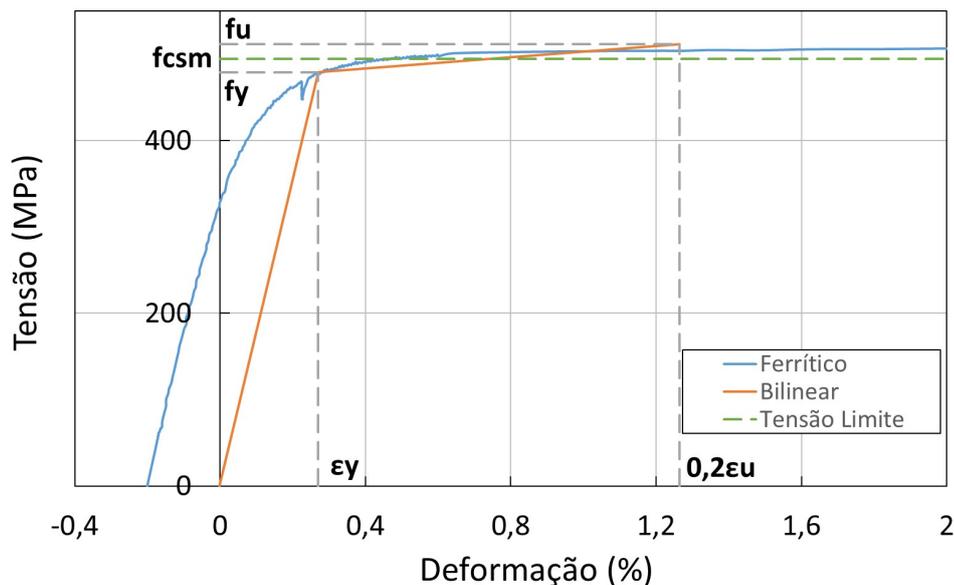


Figura 74 – MRC – Aço inoxidável ferrítico

Utilizando a equação 16 calcula-se a resistência da seção transversal pelo método da resistência contínua para a placa de aço inoxidável ferrítico. O resultado é igual a 66,91 kN. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para o aço ferrítico pelo cálculo segundo o EN 1993-1-4 [7], MRC e experimentalmente para o modelo de dois furos. Como visto anteriormente, para o caso do modelo de um furo, onde a ruptura ocorreu por rasgamento, o método não se aplica.

Tabela 13 – Resultados modelo em aço inoxidável ferrítico

Modelo	Experimental	Eurocode	Exp. / EC3	MRC	Exp. / MRC.
Dois furos	56,14	46,31	1,21	66,91	0,84

O resultado encontrado com a aplicação do MRC foi maior que a resistência última da ligação observada no ensaio experimental. Portanto, neste caso, o dimensionamento utilizando o MRC não seria recomendado.

5 CONCLUSÕES

5.1 Introdução

A presente dissertação compreendeu uma investigação experimental e numérica do comportamento de placas aparafusadas em aço inoxidável austenítico A304, duplex 2205 e ferrítico 430 submetidos à tração. Primeiramente foi realizado um estudo experimental com duas configurações de ligações distintas, com um e dois furos, para cada tipo de material, totalizando 12 ensaios. Estes ensaios foram recriados no software ABAQUS/CAE [20] e os resultados confrontados para avaliação da precisão da análise numérica.

Os resultados experimentais também foram comparados aos resultados do dimensionamento de ligações segundo o Eurocode [7] e a aplicação do Método da Resistência Contínua.

5.2 Conclusões

A análise dos resultados numéricos e experimentais obtidos neste trabalho forneceu algumas conclusões importantes conforme descrito a seguir:

- Os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho representaram com boa precisão os ensaios realizados em laboratório. Todos os modelos apresentaram o mesmo modo de ruptura dos ensaios experimentais, inclusive o efeito *curling* observado no ensaio da placa em aço austenítico com dois furos;
- Os valores de carga última numérica tiveram todos erros menores do que 8,0% em comparação a carga última experimental. Já em termos de deslocamentos a média dos erros obtida foi de aproximadamente 15%. O fato das placas estarem sujeitas a sofrer escorregamentos ou deslizarem nas

garras da máquina de tração durante a aplicação de carga nos ensaios proporcionam erros maiores;

- Os resultados experimentais foram comparados aos resultados encontrados de acordo com as formulações dispostas no EN 1993-1-4 [6] sem levar em consideração os coeficientes de segurança indicados pela norma. Para o aço inoxidável ferrítico, a norma apresentou resultados 21% menores do que os experimentais. Para o aço duplex, os resultados foram 16% e 27% menores para os modelos de um e dois furos, respectivamente. Já o aço austenítico, as diferenças foram maiores. Em particular, 33% para o modelo de um furo e 67% para o de dois furos. Uma possível explicação é o fato da norma ainda estar sendo baseada em analogias ligadas ao aço carbono. O aço inoxidável, como visto neste trabalho, tem comportamento único, e sua grande capacidade de sofrer deformação permite o ganho de resistência pelo efeito do endurecimento por encruamento. Esta capacidade de ganho de resistência não é de fato levada em consideração nas equações de dimensionamento da norma, e em casos como o aço austenítico, que apresentou uma capacidade de ductilidade maior que o ferrítico e duplex, essa discrepância ficou mais evidente;
- A comparação realizada entre os três tipos de aço inoxidável mostra que o austenítico e o duplex apresentam resistência mecânica muito próximas, a diferença entre carga de ruptura foi de aproximadamente 2% para os dois ensaios realizados. Já o ferrítico apresentou uma resistência menor em relação ao austenítico e duplex de aproximadamente 30% no ensaio de um furo e 36% no ensaio de dois furos. Como verificado em laboratório, as tensões últimas do aço austenítico e duplex são respectivamente 710,3 MPa e 716,5 MPa, e a tensão última do aço ferrítico é aproximadamente 33% menor do que estas, sendo igual a 471,2 MPa. Isto explica o resultado encontrado e valida as considerações da norma EN 1993-1-4 [6] que considera para efeito de cálculo, a utilização da tensão última do material para os seguintes estados de limite último observados: ruptura da seção líquida e esmagamento da placa;

- Apesar da semelhança entre as cargas de ruptura do aço duplex e austenítico, em termos de capacidade de deformação, o aço austenítico apresentou comportamento peculiar. O deslocamento sofrido pela placa de aço austenítico foi em torno de 2,5 vezes maior no ensaio de um furo e aproximadamente 5 vezes maior no ensaio de dois furos. Portanto, com base nos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que o aço austenítico apresenta elevada capacidade de deformação quando comparado aos outros dois tipos de aço inoxidável;
- Foi proposto neste trabalho a aplicação do MRC [8] para o dimensionamento das ligações aparafusadas a fim de permitir a incorporação benéfica do encruamento na resistência do material, a qual o método propõe-se, e os resultados encontrados foram comparados aos resultados segundo o EN1993-1-4 [6]. Entretanto, foi verificado que para o modelo com um furo, onde ocorre o rasgamento da placa na região do furo, o método não poderia ser utilizado, pois os resultados encontrados seriam maiores do que o experimental. Atribuindo o método ao modelo de dois furos, foi verificado no caso do aço austenítico, um ganho de 27% em relação a carga última de cálculo segundo o EN 1993-1-4 [6], mas ainda, 31% menor do que a carga última experimental. No caso do aço duplex houve um ganho de 24% em relação a norma, e o resultado comparado ao experimental, obteve uma diferença de apenas 2%. Ou seja, para o aço duplex, o método conseguiu fornecer como resposta a carga última real do modelo. Já para o aço ferrítico, o método não se mostrou aplicável, pois o resultado foi maior que a carga de ruptura experimental. O método aplicado a placas tracionadas de fato mostrou-se eficiente em fornecer resultados que levassem em consideração a capacidade do aço inoxidável em aumentar sua resistência a partir do efeito do endurecimento por encruamento.

5.3 Trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros seria 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, tanto para tração, que foi investigado neste trabalho, quanto para compressão, flexão, cisalhamento e torção.

Utilização de outras configurações de placas para obtenção de uma gama maior de resultados para estudo mais aprofundado do comportamento individual das placas submetidas a tração.

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 reformulação nas normas de dimensionamento de estruturas em aço inoxidável.

Finalmente, a continuação de estudos que permita aprimorar o Método da Resistência Contínua para aplicação no dimensionamento de placas submetidas à tração.

REFERÊNCIAS

- [1] INABA, R.. Construções metálicas: O uso do aço na construção civil. Disponível em: <http://wwwo.metallica.com.br/construcoes-metalicas-o-uso-do-aco-na-construcao-civil>. Acesso em 2016.
- [2] Steel rates from around the world. Disponível em: <http://www.worldsteelprices.com>. Acesso em 2016.
- [3] CARDOSO, R.P.. Avaliação do comportamento estrutural de subestações de energia elétrica com o uso de aço inoxidável. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro. 2013
- [4] Focus on reval stainless steel reinforcing bar. Disponível em: <http://www.valbruna.co.uk>. Acesso em 2016.
- [5] SANTOS, J. de J. dos. Estudo do Comportamento Estrutural de Elementos em Aço Inoxidável. Pontifícia Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro. 2014.
- [6] Tipos de aço inoxidável. Disponível em: <http://www.abinox.org.br/upfiles/arquivos/biblioteca/tipos-de-acos-inoxidaveis.pdf>. Acesso em 2016.
- [7] EUROCODE 3, 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.
- [8] AFSHAN, S.; GARDNER, L.. The Continuous Strength Method for Structural Stainless Steel Design. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, UK. 2013.

- [9] SALIH, E.L.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D.A.. Bearing Failure in Stainless Steel Bolted Connections. Imperial College London, United Kingdom. 2010.
- [10] SALIH, E.L.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D.A.. Numerical investigation of Net Section Failure in Stainless Steel Bolted Connections. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, UK. 2010.
- [11] CAI, Y.; YOUNG, B.. Structural Behavior of Cold-formed Stainless Steel Bolted Connections. Department of Civil Engineering The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong. 2014.
- [12] ASCE. Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members. SEI/ASCE-8-02. Reston: American Society of Civil Engineers. 2002.
- [13] AS/NZS. Cold-formed stainless steel structures. Australian / New Zealand Standard, AS/NZS4673:2001, Standards Australia, Sydney. 2001.
- [14] KIM, T.S.; KUWAMURA, H.. Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear. The University of Tokyo, Tokyo. 2006.
- [15] SANTOS, J. de J. dos. Comportamento estrutural de elementos em aço inoxidável. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro. 2008.
- [16] SILVA, A.T. da. Modelagem numérica de elementos tracionados em aço inoxidável com parafusos defasados. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro. 2009.
- [17] EUROCODE 3, EN 1993-1-8, Design of steel structures – Parte1.8: Design of joints. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2010.

- [18] EUROCODE 3, ENV - 1993-1-1: Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2005.
- [19] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. “Produtos Planos de Aço – Determinação das Propriedades Mecânicas a Tração” NBR 6673, Rio de Janeiro, 1981.
- [20] ABAQUS, Inc. ABAQUS. Ver.6.12 Analysis User’s Manual. 2016.
- [21] BARTH KE; ORBISON JG; NUKALA R. Behavior of steel tension members subjected to uniaxial loading. Journal of Constructional Steel Research 2002;58:1103–20.
- [22] BURSI OS; JASPART JP. Basic issues in the finite element simulation of extended end plate. Computers & Structures 1998;69:361–82.
- [23] CHUNG KF; IP KH. Finite element modeling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear. Engineering Structures 2001;22:1271–84.
- [24] FAN L; RONDAL J; CESCOTTO S. Finite element modeling of single lap screw connections in steel sheeting under static shear. Thin-Walled Structures 1997;27(2):165–85.
- [25] KAMEI Y; IKEHATA B; NISHIMURA N. An analytical study on classification of limit states of hsfsg bolted joints in tension. Journal of Structural and Earthquake Engineering Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1998;584/I-42:243–53.