

## 7

### Considerações finais

A utilização de outros tipos de materiais, como o aço inoxidável, na construção civil vem despertando interesse devido aos benefícios desse aço, e a tendência decrescente de preço devido ao aumento da sua utilização. As configurações aparafusadas defasadas podem ser executadas com rapidez por qualquer operário, diferentemente da ligação soldada, que requer mão de obra especializada. Esses sistemas de ligação ainda admitem várias configurações geométricas, podendo ser projetada para diversos níveis de carga e espaçamentos, de forma a atender com economia e segurança às diversas situações dentro da engenharia estrutural.

O presente trabalho compreendeu uma investigação abrangente do comportamento estrutural de elementos aparafusados defasados constituídos por aço carbono e aço inoxidável do tipo austenítico, duplex e ferrítico sob tração. O estudo compreendeu uma análise experimental, onde foram avaliados os parâmetros mais significativos desses elementos estruturais. Estudos numéricos e analíticos complementares também foram executados para melhor entender o seu comportamento estrutural.

#### 7.1

#### Conclusões

Nesse estudo foi considerada uma ligação aparafusada com seis parafusos com configurações variadas de largura, espaçamento entre parafusos na direção da aplicação da carga, espessura das chapas internas de aplicação de carga, direção de laminação e diferentes configurações de furos, além da utilização dos aço carbono e aços inoxidáveis austenítico, duplex e ferrítico, totalizando 59 ensaios.

Inicialmente os resultados experimentais foram comparados com as formulações presente no EUROCODE 3 (2003) e apresentados na Tabela 4.14. Para o aço carbono e o aço inoxidável ferrítico e duplex os resultados teóricos apresentados foram semelhantes aos resultados experimentais, o que não

ocorreu com os ensaios com os aços inoxidáveis austenítico, que apresentam alta ductilidade e elevada razão entre  $f_y/f_u$ . Para o aço inoxidável austenítico, com chapa de largura de 145 mm, com a ligação normal, encontra-se uma diferença média de 32,5% entre os valores experimentais e teóricos para carga última de ruptura e de 39,0% com configuração invertida. A chapa com largura de 107 mm e ligação normal apresentou uma diferença de 25,5%. Uma possível explicação para essas discrepâncias pode ser o fato da maioria das normas de projeto estrutural para o aço inoxidável ainda se basearem em analogias de projeto desenvolvidas para o aço carbono.

Essa diferença pode ter sua causa também no conservadorismo das normas de projeto. O conservadorismo ocorre devido em parte à falta de ensaios em aço inoxidável publicados na literatura. Esta investigação indicou que quando o aço inoxidável é usado em determinadas aplicações da engenharia de estruturas, como configurações aparafusadas, onde ocorrem forças de cisalhamento, os critérios atuais de projeto com base nos limites da deformação específica devem ser reavaliados, especialmente na identificação da deformação específica última no escoamento, e considerando-se as maiores razões entre a tensão limite de escoamento e a tensão limite de ruptura de ruptura.

Considerando-se a grande quantidade de ensaios foi realizado um agrupamento de determinados ensaios para se obter melhor a resposta do comportamento mecânico com a variação de cinco parâmetros geométricos e de conformação, cujas análises fornecem os resultados descritos a seguir.

#### 7.1.1 Variação da espessura da placa interna

O aumento da espessura da placa interna apresentou uma diminuição da carga última de ruptura e do seu deslocamento máximo associado. Isto pode estar ligado a uma maior concentração de tensões na primeira linha de parafusos contada a partir do centro da chapa em estudo. Contudo, a ductilidade dos aços inoxidáveis tende a minimizar esse comportamento. A placa com espessura de 8 mm na ligação aparafusada em aço carbono mostrou-se ser o limite inicial desse comportamento. A placa interna com espessura de 6 mm apresentou a maior carga última e deslocamentos associados. Esse efeito pode estar ligado a ser essa espessura ótima para a melhor distribuição das cargas entre os parafusos.

A ligação com a configuração geométrica invertida com placa interna mais espessa apresentou uma maior variação decrescente no deslocamento máximo,

com o aumento do parâmetro  $s$ , que a ligação com a configuração normal. Esse comportamento pode estar ligado a uma concentração de tensões na primeira seção de um parafuso e à sua geometria.

Os modelos analítico e numérico ratificaram os resultados experimentais, isto é, apresentando a concentração de carga na primeira linha de parafusos a partir do centro da placa. A concentração de carga nessa seção é da ordem de duas vezes maior quando se usa uma placa interna de 15 mm de espessura ao invés de 6 mm.

### 7.1.2 Variação do parâmetro $s$

A variação da distância entre linhas, parâmetro  $s$ , gera limites diferentes aos da fórmula de Cochrane, 1922 para mudança da seção de ruptura da seção líquida dos furos. Nesse trabalho não houve ruptura na seção bruta.

Os valores encontrados experimentalmente foram diferentes dos valores teóricos de 32 mm para a placa de largura de 107 mm e 40 mm para a placa de largura de 145 mm. A fórmula de Cochrane (1922) deverá ser revista por meio da execução de mais ensaios para confirmar os valores encontrados.

O problema com o real valor do parâmetro  $s$ , relacionado com o limite da mudança do modo de ruptura na ligação aparafusada em aço carbono e inoxidável em tração, é certamente muito mais complicado e é influenciado por vários outros parâmetros de projeto. Mais pesquisas nessa área estão sendo desenvolvidas, a fim de se considerar as imperfeições, tensões residuais e as direções da laminação.

A configuração geométrica invertida apresentou a ruptura inesperada na seção líquida passando por um parafuso, e distâncias maiores entre linhas de parafusos, que o resultado teórico, para determinar o limite de mudança do modo de ruptura. Esses resultados não são apresentados em nenhuma norma até a presente data.

O aumento do parâmetro  $s$  provoca um aumento da rigidez da ligação, e um aumento da carga última dos ensaios e do deslocamento máximo.

A análise numérica apresentou resultados similares aos resultados experimentais.

Na Tabela 7.1 são apresentados os valores limites do parâmetro  $s$  encontrados para cada largura de chapa e tipo de aço.

Tabela 7.1 – Valores limites para o parâmetro s

ENSAIO	Valor limite de s (mm)	Tipo de ruptura
E4_C_PL_N_145_6_30	30	2F
E6_C_PL_N_145_6_35	35	3F
E9_C_PL_I_145_15_50	50	2F
E10_C_PL_I_145_15_70	70	1F
E19_C_PL_N_107_6_25	25	3F
E20_C_PL_N_107_6_28	28	2F
E25_A_PL_N_145_15_26	26	2F/3F
E29_A_PL_N_145_6_26	26	2F/3F
E31_A_PL_I_145_6_55	55	1F
E34_A_PL_N_107_6_22	22	3F
E35_A_PL_N_107_6_24	24	2F
E39_A_PP_I_145_8_25	25	3F
E40_A_PP_I_145_6_30	30	1F
E44_A_PP_N_107_6_18	18	3F
E45_A_PP_N_107_6_23	23	2F
E46_D_PL_N_145_8_27	27	3F
E47_D_PL_N_145_8_30	30	2F
E48_D_PL_N_107_6_24	24	3F
E49_D_PL_N_107_8_28	28	2F
E52_D_PP_I_145_8_50	50	1F/3F
E54_F_PL_N_145_6_27	27	3F
E55_F_PL_N_145_6_30	30	2F
E56_F_PL_I_145_6_50	50	3F
E57_F_PL_I_145_6_55	55	1F
E58_F_PL_N_107_6_24	24	3F
E59_F_PL_N_107_6_28	28	2F

### 7.1.3 Variação da largura da chapa

As chapas de ensaio foram também analisadas com relação a sua largura. A maior largura adotada na placa apresentou também maiores cargas última e deslocamentos associados máximos

A relação dos parâmetros  $s$  e  $g$ , e as áreas líquida e bruta, relativos a largura da placa, e a ductilidade dos aços inoxidáveis, apresentam um conjunto de fatores para a análise e identificação do comportamento mecânico da configuração aparafusada defasada. Esses parâmetros geométricos definem a massa de aço a ser mobilizada na solicitação de tração.

#### 7.1.4 Variação do tipo de aço

A característica de ductilidade dos aços inoxidáveis reduziram o valor do parâmetro  $s$  para identificação do limite da mudança do modo de ruptura e proporcionaram deslocamentos máximos maiores.

Os aços inoxidáveis austenítico e duplex apresentaram comportamento mecânico similares quando comparados com os aços carbono e inoxidável ferrítico.

Considerando-se o mesmo nível de carga de utilização, o aço ferrítico na ligação aparafusada distribuiu melhor a carga pelos parafusos. Isso pode explicar o comportamento mecânico mais equilibrado que o aço carbono. O aço inoxidável austenítico apresenta em relação ao duplex um comportamento mecânico mais dúctil.

#### 7.1.5 Variação da configuração da furação

As ligações normais, ou do tipo A, apresentaram menores deslocamentos e cargas últimas, e também valores do parâmetro  $s$  inferiores na mudança do modo de ruptura do que a ligações invertidas ou do tipo B. Esse comportamento pode ter sua explicação na geometria da configuração invertida e na concentração da carga na seção de um furo dessa ligação.

A carga de ruptura em dois furos da ligação do tipo A se equipara a carga de ruptura da ligação tipo B em três furos, já que a distância do parâmetro  $s$  se aproxima para os dois casos.

A configuração invertida apresentou maiores diferenças entre os valores teóricos e experimentais da carga última com a variação crescente dos valores do parâmetro  $s$ . No caso do aço carbono de 14,0%, no aço inoxidável duplex de 13,5% e no ferrítico de 13,1%. Essa ligação com configuração invertida apresentou uma alta concentração de carga na seção de um furo, apresentando ruptura inesperada nessa seção, onde a seção líquida é maior. Esse comportamento deverá ser mais investigado com novos ensaios.

A análise teórica mostrou resultados semelhantes aos encontrados experimentalmente. As deformações específicas na seção dos parafusos e na seção do centro da ligação convergem na ligação tipo A, com o aumento do parâmetro  $s$ , e divergem na ligação do tipo B, apontando um conceito mecânico diferente entre esses dois tipos de ligação.

#### 7.1.6 Variação da direção da laminação

A configuração invertida em chapa com laminação paralela à aplicação da solicitação apresentou o valor limite maior do parâmetro  $s$  na mudança do modo de ruptura e maiores deslocamentos máximo e carga última em relação a chapa com laminação perpendicular. Esse comportamento pode estar associado a uma tensão diferente na direção perpendicular a laminação.

#### 7.1.7 Análise do coeficiente de ajuste experimental

Os resultados experimentais mostraram a necessidade do uso de fatores a serem utilizados nos resultados teóricos do estado limite último na ruptura da seção da seção líquida, para manterem os seus índices de segurança adotados pela norma.

O aço carbono utiliza o fator 0,9 adotado pela norma europeia, onde é respeitado por meio de inúmeros ensaios o fator beta (índice de confiabilidade).

O coeficiente de ajuste experimental utilizado nas configurações aparafusadas em aço inoxidável, respeitando-se os mesmos níveis de segurança da norma europeia, é mostrado na Tabela 7.2

Tabela 7.2 – Análise do coeficiente de ajuste experimental para o aço inoxidável

Tipo de aço	Fator atual ( $k_r$ )	Fator experimental	Diferença (%)
Austenítico	1	0,91	9,0
Duplex	1	0,93	7,0
Ferrítico	1	0,96	4,0

Deve ser dada atenção ao aço inoxidável austenítico e duplex que apresentaram uma diferença de 9,0% e 7,0%, respectivamente, sendo necessárias mais pesquisas com esses dois tipos de aço inoxidáveis.

### 7.1.8 Análise da configuração aparafusada com o MRC

O Método da Resistência Contínua desenvolvido por Gardner (2007) foi aplicado nesta pesquisa e encontrados os resultados apresentados na Tabela 7.3.

Os resultados experimentais, analisados pelo Método da Resistência Contínua apontam para o uso de novos fatores para serem incorporados à equação do limite da ruptura na seção líquida. Esses fatores foram encontrados fatorando-se a carga limite de ruptura na seção líquida pela carga apresentada na deformação específica limite. Os resultados são apresentados na Tabela 7.4

Tabela 7.3 – Tensão limite de escoamento X tensão limite

Tipo de Aço	Deformação específica limite ( )	Tensão limite (MPa)	Tensão limite de escoamento (MPa)	Diferença das tensões (%)
Carbono – USI 300	0,010	360	340	5,8
Austenítico – S304	0,027	450	350	28,6
Duplex – 2205	0,030	590	494	19,4
Ferrítico – 430	0,025	395	350	12,8

Tabela 7.4 – Fatores a serem incorporados: aço inoxidável

Tipo de Aço	Deformação específica limite ( )	Tensão limite (MPa)	Tensão limite de ruptura (MPa)	Fator
Austenítico – S304	0,027	465	710	0,66
Duplex – 2205	0,030	590	716	0,82
Ferrítico – 430	0,025	395	470	0,84

Na Tabela 7.5 é apresentado um resumo dos principais coeficientes, encontrados por meio dos limites encontrados pela análise experimental, pela deformação limite do aço carbono, pelo MRC, pelo deslocamento limite do aço carbono e pelo escoamento da seção bruta para os aços inoxidáveis austenítico, duplex e ferrítico.

Tabela 7.5 – Fatores de ajuste para ruptura da seção líquida nos aços inoxidáveis

Tipo de aço	Fatores					
	Atual	Experimental (e)	Deform. carbono (1)	MRC (4)	Desloc. carbono (5)	Escoam. seção bruta (7)
Austenítico	1	0,91	0,55	0,66	0,72	0,77
Duplex	1	0,93	0,73	0,82	0,80	0,85
Ferrítico	1	0,96	0,78	0,84	0,79	0,91

Para uma melhor avaliação dos fatores encontrados para os aços inoxidáveis avaliados nesse trabalho foi construída a Tabela 7.6, onde foram encontradas a média e o desvio padrão da razão entre a carga última experimental ( $P_e$ ) e as cargas calculadas teoricamente e fatoradas ( $P_x$ ), onde x é o número da análise realizada anteriormente, onde:

- e1 – carga experimental fatorada pelo fator encontrado nos ensaios;
- 1 – da deformação limite da configuração aparafusada em aço carbono no rompimento da seção líquida;
- 4 – do Método da Resistência Continua;
- 5 – do deslocamento apresentado na deformação específica limite da configuração aparafusada em aço carbono no rompimento da seção líquida;
- 7 – do limite referente ao escoamento da seção bruta.

Também são analisados os fatores 0,9 utilizado no aço carbono, 1,0 valor encontrado para o fator  $k_r$  utilizado para o cálculo da resistência do aço inoxidável e  $P_{esc}$  a carga de escoamento da seção bruta do ensaio.

Tabela 7.6 – Carga última experimental/Carga calculada e fatorada

	$P_e/P_{e1}$	$P_e/P_1$	$P_e/P_4$	$P_e/P_5$	$P_e/P_7$	$P_e/P_{0,9}$	$P_e/P_{1,0}$	$P_e/P_{esc}$
Média	1,01	1,52	1,30	1,25	1,37	1,18	1,06	1,33
Desvio Padrão	0,07	0,23	0,15	0,10	0,18	0,09	0,08	0,25

Considerando-se a resistência limite última de ruptura na seção líquida, os resultados com a utilização dos fatores experimentais, como esperado, apresentaram o melhor ajuste com os resultados experimentais.

Os resultados com os fatores de norma 0,9 e 1,0, também apresentaram bom ajuste com os resultados finais dos experimentos, ou seja, a ruptura da seção líquida sem limitar ao escoamento da seção bruta. O EUROCODE 3 considerando a grande deformação específica apresentada nos ensaios determina o uso da tensão limite de ruptura reduzida ( $f_{ured}$ ), para limitar os resultados em função desse comportamento.

O resultado da análise 1, apresentado na Tabela 6.3, que considera a deformação específica limite do aço carbono, apresentou o pior resultado com grande dispersão.

Considerando-se a resistência limite última de escoamento da seção bruta foi encontrada uma deformação específica de referência, que leva em consideração esse estado limite. Para tanto uma razão entre a seção bruta e a seção líquida foi utilizada e o resultado é apresentado na análise 7.  $P_7$ , encontrado por meio da deformação específica de referência, e o  $P_{esc}$ , calculado com a da seção bruta, são as cargas limites para se definir a resistência última para o escoamento da seção bruta.

Nos resultados da análise 5, mostrado na Tabela 6.3, onde foi usado o deslocamento máximo de 5,8 mm, encontrado nos ensaios com o aço carbono, usado como fator limitador nos ensaios com o aço inoxidável, apresentaram um significado físico com maior proximidade dos resultados experimentais e pequena dispersão, porém, esses resultados dependem do valor de deslocamento encontrado experimentalmente.

O MRC, análise 4, onde se utiliza a menor deformação entre  $15 \epsilon_y$  e  $0,1 \epsilon_u$ , parece promissor na previsão da carga última para a utilização em projeto, apresentando um melhor resultado, comprovado experimentalmente, e com baixa dispersão. Os resultados do MRC se apresentam inferiores ao limite do escoamento da seção bruta ao se comparar com as cargas encontradas pelo método da deformação específica de referência ( $P_7$ ) ou pela equação definida em norma ( $P_{esc}$ ).

O MRC reconhece que a resistência estrutural de seções é um processo contínuo, função da sua capacidade de deformação, e controlado pela sua rigidez. No caso de tração de configurações aparafusadas em aço inoxidável, há propensão à deformação local dos elementos constituintes. Esse efeito foi monitorado juntamente com a deformação específica limite na execução dos ensaios, como mostrado no Capítulo 3, por meio de fotos durante os ensaios, e não foram detectadas deformações locais, como esmagamento ou encurtamento da largura na seção líquida dos furos.

Efetivamente, o conceito de resistência contínua se resume em localizar a deformação específica máxima que a ligação aparafusada pode ter, levando-se em consideração o não esmagamento ou encurtamento da placa, como resistência crítica a ser evitada no aço inoxidável.

Esses resultados apontam para uma nova maneira de se projetar estruturas em aço inoxidável tirando-se proveito da grande ductilidade desses materiais.

Outros desenvolvimentos do método estão em andamento.

## 7.2

### Principais contribuições

De forma sucinta, as principais contribuições dessa tese são descritas a seguir.

1. A execução de 59 ensaios em escala real com a utilização de quatro tipos de aços: carbono e os inoxidáveis austenítico, duplex e ferrítico.
2. Análise das configurações aparafusadas defasadas com variação da espessura da paca interna.
3. Análise das configurações aparafusadas defasadas com configuração geométrica invertida diferente da apresentada pela norma.
4. Avaliação da variação do parâmetro  $s$ .
5. Avaliação da variação da largura da chapa.
6. Desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados visando a redundância de resultados.
7. Análise numérica com o método dos elementos finitos.
8. Análise analítica utilizando o método da compatibilidade desenvolvido para ligações aparafusadas, utilizando-se dos resultados de ensaios experimentais realizados de cisalhamento direto em parafusos.
9. Destaca-se também a investigação experimental do fator  $\alpha$  a ser utilizado na expressão para cálculo da resistência da ligação aparafusada em inoxidável, respeitando-se o mesmo fator beta de confiabilidade (índice de segurança) utilizado no EUROCODE 3.

10. Também vale ressaltar o pioneirismo do estudo das ligações aparafusadas em aço inoxidável, por meio do Método da Resistência Contínua.

### 7.3

#### **Sugestões para Trabalhos Futuros**

A principal sugestão é a continuação e o aprofundamento do presente trabalho na área de programa de experimentos, investigando-se ainda mais os aços de alta resistência em situações com diferentes solicitações, como a compressão, o cisalhamento, a flexão e a torção, de maneira a cobrir novos estudos utilizando-se o Método da Resistência Contínua.

Analisar outros modelos desse tipo de sistema estrutural contendo mais parafusos em outras configurações não simétricas, com o objetivo de avaliar ainda mais o comportamento mecânico da configuração aparafusada defasada.

A realização de ensaios utilizando-se a punção (mais utilizada) ao invés da furação com broca, incluindo, assim, nos ensaios o efeito das tensões residuais.

Executar ensaios que avaliem outros estados limites como o escoamento da seção bruta, o esmagamento da placa, o corte no parafuso e o esmagamento do parafuso.

Realizar ensaios que levem em consideração o atrito na ligação aparafusada defasada.

Analisar o comportamento dinâmico com aplicação de cargas cíclicas na ligação aparafusada constituída de aço inoxidável, pois essa ligação apresentou maior capacidade de absorção de energia comparado com as ligações aparafusadas constituídas de aço carbono.