

1

Introdução

O aço inoxidável vem sendo utilizado em vários tipos de construções devido as suas características de alta resistência à corrosão, durabilidade, resistência ao fogo, conforme informado em Gardner L. (2006), facilidade de manutenção, aparência e estética, porém, seu uso nos membros estruturais de uma construção é limitado devido ao seu alto custo. Como esse custo está sendo reduzido, conforme gráfico apresentado na Figura 1.1, dentre outros motivos, as recentes descobertas de novas minas na África do Sul, e a introdução do aço inoxidável ferrítico da Linha 400, mais econômico, usado na construção de torres de transmissão instaladas na orla oceânica da África do Sul, que durante 15 anos de exposição não apresentaram corrosão. O custo do aço inoxidável ferrítico da Linha 400, com menos quantidade de metais nobres na sua composição, é estimado em duas vezes o custo do aço carbono (APERAM – Fábrica de Aço Inox do Brasil S/A), corroborando para que o estudo do comportamento mecânico do aço inoxidável sob os diversos aspectos seja cada vez mais relevante.

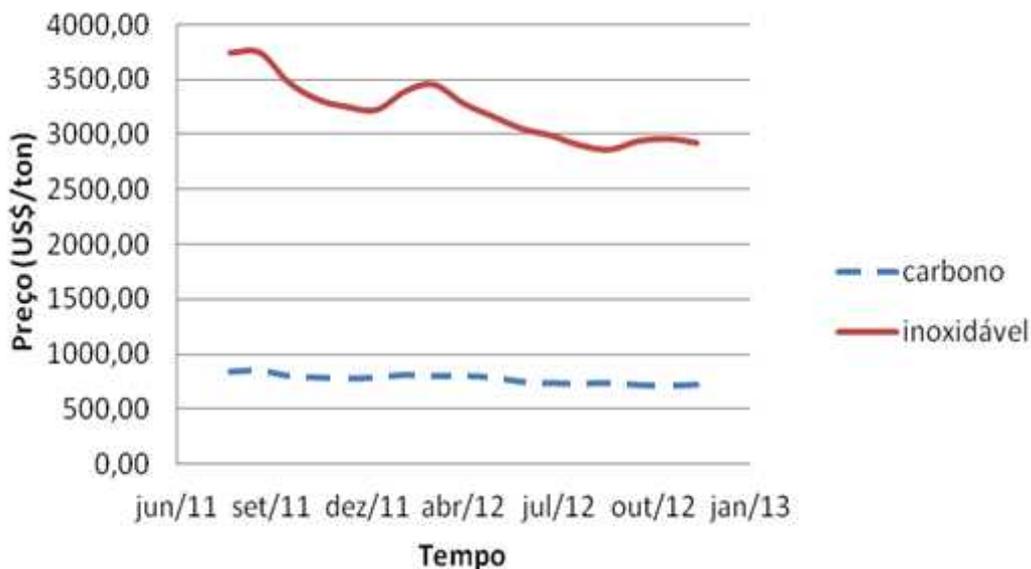


Figura 1.1 – Comparação de preços dos aços estruturais (<http://www.worldsteelprices.com>, 2012).

Considerando, também, a recente mudança na tendência do comportamento social em relação à produção em massa e o abundante consumismo, e devido à consciência ambiental e a preservação do que é natural, o conceito de durabilidade e sustentabilidade na construção ganhou muito mais importância. Nesse contexto, o aço inoxidável é um material promissor para as construções que requeiram essa característica, conforme pode ser observado na Ponte de Stonecutters, localizada na cidade de Hong Kong, na China, Figura 1.2 (a), onde foram gastos duas mil toneladas de aço austenítico S322 em chapa de 20 a 30 mm de espessura e duas mil oitocentas e oitenta toneladas do aço austenítico S304 em barra de 50 mm de diâmetro, com previsão de dispensa de grande manutenção, por um período de 120 anos. Na Figura 1.2 (b) observa-se a peça em aço inoxidável que envolve a estrutura de concreto, proporcionando maior rigidez, e na Figura 1.2 (c) pode-se ver a mesma peça pelo lado interno, mostrando as barras que garantirão a união com o concreto armado, que será preenchido no seu interior.



(a) Vista panorâmica



(c) Detalhes do pilar



(b) Pilar

Figura 1.2 – Stonecutters Bridge, China (www.constructalia.com, 2008).

O primeiro edifício de dois andares no Japão utilizando o aço inoxidável austenítico para fins estruturais foi construído em 1992, conforme detalhe na

Figura 1.3. Essa construção demonstrou que o material tem a capacidade de atender à indústria da construção.



Figura 1.3 – Estrutura em aço inoxidável - Japão (Foto: Nisshin Steel,1992).

A Estação Ferroviária Metropolitana de Bilbao faz parte de um programa urbano de regeneração da cidade. A estrutura de apoio do mezanino usa um aço inoxidável especial, resistente ao calor da série 1,4845, fornecendo a resistência ao fogo exigida, sem a necessidade de tratamentos especiais sobre estrutura. A Figura 1.4 apresenta uma foto do mezanino produzida em aço inoxidável.



Figura 1.4 – Estação ferroviária de Bilbao (Foto: Alfredo Aldai).

1.1

Motivação

As normas de projeto para dimensionamento de ligações em aço inoxidável atuais (EUROCODE 3, Parte 1.4, 2003) são em grande parte baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas de aço carbono. Todavia o aço inoxidável quando submetido a solicitações axiais de tração e compressão, apresenta curvas tensão *versus* deformação específica não-lineares sem patamar de escoamento, diferentemente das curvas apresentadas pelo aço carbono, conforme Figura 1.5, mostrando assim, um comportamento global diferente, e uma resposta a solicitação distinta e diferente dos limites considerados para o aço carbono.

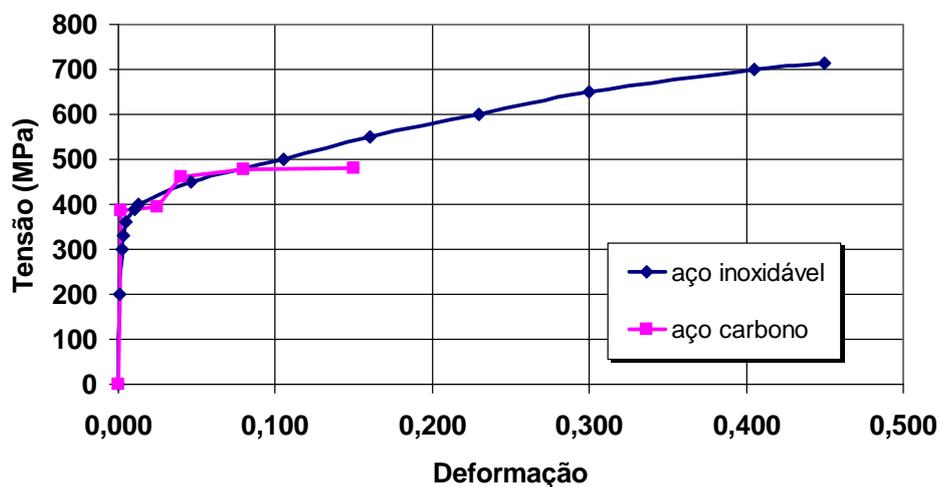


Figura 1.5 – Curva tensão *versus* deformação específica – aços carbono e austenítico.

Esta tese apresenta um estudo do comportamento estrutural de ligações aparafusadas constituídas em aço carbono e aço inoxidável, considerando uma extensiva análise experimental com variação de parâmetros dimensionais para compreender o seu comportamento mecânico sob solicitação de tração. Para tal também será apresentado um estudo paramétrico por meio da análise numérica empregando a ferramenta computacional de elementos finitos ANSYS 13, 2010. Também será apresentado uma formulação analítica considerando o equilíbrio de forças e compatibilidade das deformações da ligação aparafusada.

As ligações estruturais desempenham um papel fundamental no comportamento global e local das estruturas de aço. Buscando entender o comportamento real de uma ligação aparafusada constituída em aço inoxidável,

muitos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos por Burgan BA, (2000); Kouhi J, (2000); Van Den Berg GJ, (2000); Gardner L, (2004); Graham Gedge, (2008) e A. Bouchaïr, (2008). A principal motivação desses trabalhos de pesquisa tem caráter científico, com o objetivo de buscar a solução estrutural mais econômica resultante de um projeto mais coerente das ligações, bem como a melhoria dos processos de fabricação com respectiva redução dos custos de execução. Com o entendimento do comportamento real das ligações aparafusadas constituídas de aço inoxidável, torna-se possível o desenvolvimento de novas recomendações de projeto. Esses fatos motivaram a presente investigação, que envolve o estudo de uma configuração aparafusada com furos alternados muito utilizada em estruturas metálicas.

O cálculo de uma ligação desse tipo constituída de aço inoxidável tem a mesma forma que a do aço carbono, embora os comportamentos mecânicos dos dois aços sejam inteiramente diferentes. Ressalta-se que muitos tipos de aço carbono têm patamar de escoamento e o aço inoxidável não têm esse limiar; além disso, as razões entre os valores da tensão limite de escoamento (f_y) e a tensão limite de ruptura (f_u) são muito diferentes nos dois materiais.

Existe uma grande variedade de tipos de aço inoxidável, como no caso do aço carbono, devido a variação da composição química e o tratamento térmico aplicado na sua fabricação. Pode-se classificar em cinco principais grupos: Austenítico, Ferrítico, Martensítico, Duplex e Precipitation Hardening (Euro Inox, 2006). O teor de cromo (Cr) classifica os aços inoxidáveis em grupos diferenciados. A excepcional auto restauração da camada superficial “passiva” no aço ocorre devido à presença desse elemento. Os aços disponíveis comercialmente tem cerca de 11% de cromo, no mínimo, na sua composição.

Nesta pesquisa serão usados os aços inoxidáveis: austenítico S304 ferrítico 430 e duplex 2205, os mais indicados para utilização em estruturas, devido a sua maior deformação em relação aos aços martensíticos e Precipitation Hardening. Esse grupo de ligas de aço inoxidável contém níquel em um intervalo 8-20%, com vários elementos adicionais. As propriedades mecânicas podem ser aumentadas com a conformação a frio. Os aços dúplex que têm uma estrutura mista de austenita e ferrita compartilham de algumas das propriedades dos outros dois tipos de aços, mas a sua característica mecânica fundamental é a maior resistência mecânica que os aços ferrítico ou austenítico. Apresentam-se na Figura 1.6 fotos da análise metalográfica dos aços inoxidáveis e carbono utilizados nesse trabalho.

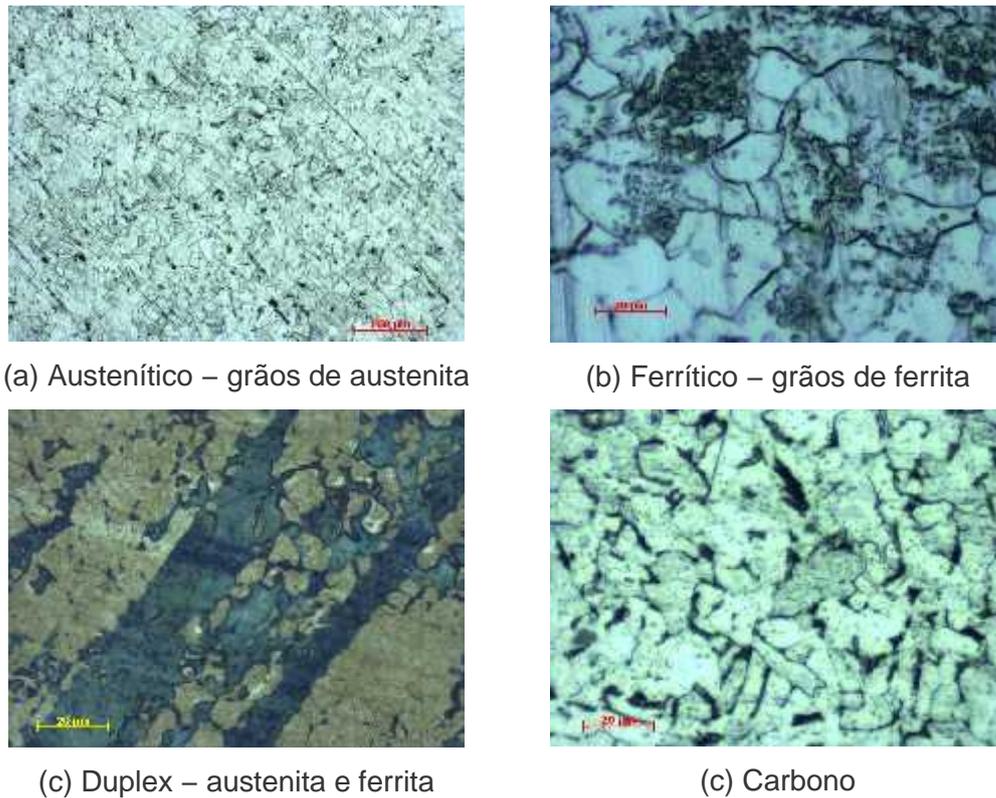


Figura 1.6 – Fotos da análise metalográfica dos aços dessa tese.

1.2

Objetivos

Como objetivo principal esta tese busca avaliar e estudar, por meio da realização de vários ensaios experimentais, o comportamento estrutural de configurações aparafusadas alternadas, em chapas formadas a frio de aço inoxidável e carbono.

Esta investigação visa obter dados adicionais para recomendações que melhor quantifiquem a resistência à ruptura da seção líquida de ligações aparafusadas alternadas. Pretende-se também determinar a validade da utilização da mesma formulação para o dimensionamento de uma ligação aparafusada em aço carbono e a ligação similar em aço inoxidável. Será analisado a utilização do fator de redução k_r e a redução da tensão limite de ruptura (f_u) no estudo do esmagamento. A realização desses ensaios fornece, também, informações fundamentais para a calibração de modelos numéricos de elementos finitos, pois levam em consideração as situações reais de execução das estruturas e as características específicas dos materiais utilizados no país.

A presente investigação compreende:

- uma análise detalhada dos estudos que vem sendo realizados por pesquisadores ao longo dos anos;
- uma melhoria substancial da análise paramétrica iniciada em Aalberg e Larsen (2001), adicionando novos dados, como diferentes comprimentos nas seções longitudinais e transversais da ligação aparafusada;
- a melhoria no processo de aplicação e medição das solicitações durante o ensaio de escala real na ligação, como, por exemplo, a introdução de dois sistemas de aquisição de dados, um da empresa Dinateste e outro da empresa National Instruments;
- a avaliação das deformações, deslocamentos, ou seja, o comportamento mecânico do modelo experimental constituído de aço carbono e aço inoxidável, por meio das curvas: experimentais, analíticas e bilineares dos ensaios de corpos de prova em comparação com os ensaios experimentais das ligações aparafusadas;
- um estudo do comportamento mecânico por meio de metodologias teóricas comparando com os resultados experimentais e com modelo numérico em elementos finitos realizado no programa ANSYS 13 (2010).

Durante a fase de pesquisa não foi encontrado na atividade técnica um programa experimental executado em escala real e em proporções reais de utilização de uma ligação aparafusada alternada em aço inoxidável, e esse é o motivo para realização dos estudos propostos da tese.

1.3

Escopo

A tese está dividida em sete capítulos: introdução, referências bibliográficas, programa de ensaios experimentais, resultados dos ensaios experimentais, análise dos resultados experimentais, método da resistência contínua, e considerações finais.

O presente capítulo apresenta informações sobre o aço inoxidável, a motivação para o desenvolvimento dessa tese, um breve resumo do estado da arte para as configurações aparafusadas e os principais objetivos dessa

pesquisa. Além de apresentar uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo dessa tese, conforme pode ser observado a seguir.

No capítulo dois são apresentados alguns dos principais trabalhos que avaliam a influência da força axial nas ligações e, seu comportamento global e local. Também apresenta uma metodologia analítica de equilíbrio e compatibilidade, onde se considera a influência da rigidez na transferência de solicitações na ligação aparafusada. São apresentadas algumas considerações sobre ligações aparafusadas, e uma descrição detalhada do dimensionamento das ligações segundo recomendações do EUROCODE 3 (2003).

No capítulo três é elaborado o programa de ensaios experimentais utilizando-se o conhecimento teórico das normas, elucidando-se as dificuldades de execução dos ensaios, a caracterização dos aços e descrevendo-se a instrumentação usada.

No capítulo quatro são descritos os ensaios experimentais realizados. Os resultados obtidos e caracterização mecânica e geométrica das peças utilizadas nos ensaios também são apresentadas nesse capítulo.

No capítulo cinco são apresentados a análise dos resultados experimentais obtidos para as ligações aparafusadas, por meio de comparações, com tabelas e gráficos, centrada nos diversos parâmetros geométricos presentes na ligação em estudo. É apresentada ainda uma formulação analítica de compatibilidade e um estudo numérico da ligação aparafusada calibrada com os resultados experimentais centrada no comportamento mecânico com a variação do parâmetro s , da espessura da placa, e a inversão da configuração geométrica da ligação.

No capítulo seis é apresentado o Método da Resistência Contínua para o estudo da ligação aparafusada em aço inoxidável. Esse método terá sua formulação adaptada com avaliação dos resultados dos ensaios em aço carbono a tração e será adotado este resultado aos comportamentos mecânicos dos aços inoxidáveis em estudo, com base na curva analítica e na curva bilinear proposta. Essa formulação alternativa permite a determinação da deformação de referência para os três tipos de aço inoxidável estudados. Também é possível estabelecer os coeficientes a serem incorporados teoricamente, por meio das análises dos resultados experimentais.

E no capítulo sete, são tecidas as considerações finais com as conclusões do presente estudo, além de algumas propostas para trabalhos futuros.