

1

Introdução

1.1

Motivação

As ligações estruturais desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço. Baseando-se em uma tentativa de se entender o comportamento real de uma ligação e sua influência na resistência global dos pórticos de edificações em aço, muitos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos. Com o entendimento do comportamento real das ligações, torna-se possível o desenvolvimento de novas recomendações de projeto para se avaliar as propriedades mecânicas das ligações e, conseqüentemente, os procedimentos de projeto de estruturas de edifícios que considerem esta hipótese [1-7].

A principal motivação destes trabalhos de pesquisa tem caráter científico mas sempre buscando estruturas mais econômicas resultantes de um projeto mais coerente das ligações, bem como a melhoria dos processos de fabricação com respectiva redução dos custos de execução.

Atualmente, sabe-se que o comportamento real das ligações encontra-se entre duas situações extremas, ou seja, rígidas ou flexíveis.

Avaliando-se o momento fletor e a rotação associada da ligação apresentada na Figura 1.1, percebe-se que uma ligação é classificada como rígida quando os membros ligados por ela sofrem a mesma rotação, Figura 1.1(a). Desta forma, as ligações estão submetidas a uma rotação global de corpo rígido que é a rotação absoluta do nó comumente utilizada na análise estrutural.

O outro extremo considera que a viga se comporta como simplesmente apoiada e a ligação é denominada flexível, Figura 1.1(b).

Para casos intermediários, o momento transmitido será resultante da rotação relativa entre a viga e a coluna. A ligação é denominada, então, semi-rígida, Figura 1.1(c).

Na análise global de uma estrutura, quando se utilizam ligações semi-rígidas ao invés de ligações rígidas ou flexíveis, modificam-se não apenas os

deslocamentos ocorridos nesta estrutura, mas também, a distribuição e a magnitude das forças internas por toda a estrutura.

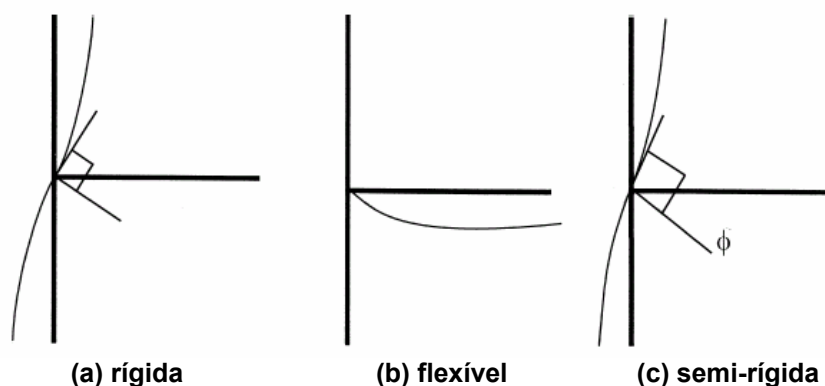


Figura 1.1 – Classificação das ligações de acordo com sua rigidez

O dimensionamento de pórticos utilizando-se o conceito de ligações rígidas faz com que o momento máximo positivo atuante nas vigas do pórtico seja maior do que o calculado. Esta diferença, que também gera um alívio de solicitação nas colunas, pode levar ao colapso da estrutura em casos extremos ou, pelo menos, ao desconhecimento da segurança envolvida no projeto destas peças. Isto ocorre porque o momento de engastamento perfeito existente na viga não é totalmente absorvido pela ligação.

Por outro lado, se o dimensionamento for executado utilizando os conceitos de ligações flexíveis, as colunas estarão, na realidade, sujeitas à flexo-compressão. Se por um lado, as vigas estão superdimensionadas, um colapso das colunas, ou melhor, vigas-colunas, poderá ocorrer, e mais uma vez, a segurança estrutural será desconhecida. Como exemplo, na Figura 1.2 são apresentados dois diagramas de momento fletor de um pórtico engastado, submetido a um carregamento uniformemente distribuído, onde as ligações viga-coluna são consideradas flexíveis ou semi-rígidas.

Em uma primeira análise, a utilização de ligações semi-rígidas em pórticos indeslocáveis mostra que os esforços na viga tornam-se menores. Ao refinar-se esta análise, pode-se também diminuir os tirantes utilizados no contraventamento do pórtico. No caso de ligações semi-rígidas em pórticos deslocáveis, estas contribuem com uma parcela da rigidez necessária a estabilidade lateral do mesmo, de forma mais econômica. Esta economia é advinda do fato de que na grande maioria dos casos, as ligações semi-rígidas

são mais leves e envolvem menos componentes como soldas e parafusos quando comparadas com a solução rígida tradicional.

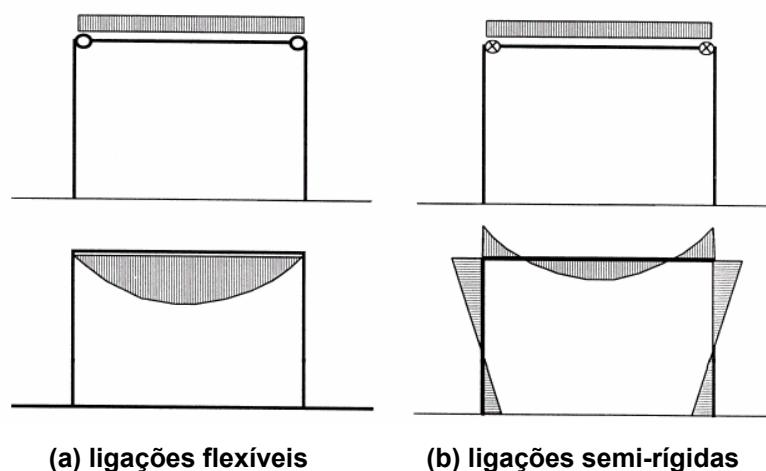


Figura 1.2 – Distribuição elástica de momentos fletores num pórtico simples

Uma análise da estabilidade de pórticos com ligações semi-rígidas exige uma modelagem adequada e precisa desta ligação. A curva momento *versus* rotação destas ligações apresenta um comportamento não-linear que pode ser avaliado através do Método dos Estados Limites. Na avaliação destes pórticos, a flexibilidade da ligação e os efeitos de segunda ordem estão intrinsecamente relacionados.

As ligações representam uma parcela pouco significativa do peso total da estrutura, porém, possuem preços de fabricação e montagem elevados. Avaliando-se estes fatores, soluções que considerem a economia representada pelo uso de ligações semi-rígidas, merecem uma análise mais refinada.

Uma das razões para esta economia provém do fato de que as ligações rígidas aparafusadas são caras e difíceis de serem montadas quando comparadas com a solução semi-rígida. Por outro lado, as ligações flexíveis não consideram uma parcela significativa de resistência que, ao ser considerada, pode minimizar o custo global da estrutura.

Algumas normas de projeto e dimensionamento de estruturas de aço atuais consideram que as ligações possuem um comportamento semi-rígido, como por exemplo, o Eurocode 3 (Anexo J) [8] e sua última atualização, Eurocode 3, parte 1.8 (versão “*stage 49 draft*”) [9]. Estas normas, porém, somente consideram ligações submetidas ao corte e/ou ao momento fletor. A primeira regulamentação citada [8] não considerava a presença de esforço axial (tração/compressão) nas ligações, impondo apenas uma limitação empírica de

10% da resistência plástica da viga como esforço axial máximo para o qual, os procedimentos disponíveis se mantêm aplicáveis. Vale ressaltar que não existe nenhum fundamento teórico para justificar este limite de 10%. Todavia, na última versão de revisão da norma divulgada até a data de entrega deste trabalho [9], este limite foi reduzido para 5% em função dos diversos trabalhos publicados oriundos desta tese além de outros resultados publicados por diversos autores conforme será comentado posteriormente. Esta limitação será o principal objeto de estudo deste trabalho cujos objetivos serão apresentados em um item a seguir, neste capítulo. Existem alguns tipos de estruturas onde a presença do esforço axial deve ser avaliada, tais como:

- pórticos de estruturas submetidos a carregamentos horizontais (terremotos ou cargas de vento), especialmente em estruturas não-contraventadas;
- Pórticos irregulares submetidos à cargas gravitacionais ou horizontais, especialmente em pavimentos incompletos;
- Ligações de pórticos de galpões onde a inclinação das vigas gera esforços axiais significantes nas ligações, ver Figura 1.3.



Figura 1.3 – Ligação de um pórtico de galpões com vigas inclinadas

Com o objetivo de investigar este tipo de solicitação em ligações viga-coluna, alguns autores têm proposto modelos para o dimensionamento destas ligações sujeitas a momento fletor e esforço axial. Todavia, as propostas iniciais não foram devidamente validadas ou calibradas com resultados experimentais. Dentre estes trabalhos, pode-se citar, Jaspart [6], Finet [10], Cerfontaine [11] e Silva & Coelho [12].

Somente Wald [14,15] realizou alguns ensaios experimentais em laboratório para ligações viga-coluna com placa de extremidade estendida e ligações de emendas de vigas submetidas a momento fletor e esforço axial de compressão. Os resultados obtidos nestes ensaios estão sendo utilizados na calibração do modelo proposto pelo mesmo autor. Estes trabalhos serão abordados com mais ênfase no capítulo seguinte desta tese.

1.2

Evolução Histórica das Ligações Semi-Rígidas

Um resumo do estado da arte de ligações estruturais em aço foi realizado por Chan and Chui [17] onde são citados diversos trabalhos efetuados nesta área. Desde os primeiros estudos que avaliaram a rigidez rotacional de ligações viga-coluna com rebites efetuados por Wilson e Moore em 1917 [18], centenas de ensaios têm sido realizados na tentativa de se investigar o real comportamento das ligações viga-coluna.

Anteriormente a 1950, ligações soldadas e rebitadas com cantoneiras foram testadas por Young e Jackson em 1934 [19] e por Rathbun em 1936 [20]. Um pouco mais tarde, Bell *et al* [21] realizou alguns ensaios com o mesmo tipo de ligações mas com parafusos de alta resistência.

Subseqüentemente, o comportamento de ligações com placa de extremidade soldada verticalmente à mesa da coluna (*header plate*) foi investigado através de dezesseis ensaios realizados por Sommer em 1969 [22]. Este mesmo autor realizou quatro ensaios de ligações aparafusadas com cantoneiras.

Ligações com placa de extremidade estendida e/ou ajustada à altura da viga começaram a ser utilizadas por volta de 1960, sendo projetadas para transferir predominantemente momentos fletores da viga para a coluna. Estes tipos de ligações começaram a ser estudados na década de setenta. Dentre os diversos ensaios documentados na literatura, pode-se citar os realizados por Ostrander [23], Bailey [24] e Surtees & Mann [25], todos em 1970, por Agerskov em 1976 [26], além dos ensaios de Packer & Morris em 1977 [27] e Johnson & Walpole em 1981 [28]. Todos estes autores procuraram avaliar a influência da utilização de enrijecedores na coluna de ligações com placa de extremidade.

Mas foi a partir de meados da década de oitenta que muitos pesquisadores realizaram ensaios de ligações semi-rígidas conforme revisão bibliográfica realizada por Mesquita [29] que cita um banco de dados onde estes

ensaios estão catalogados, denominado SERICON II [13,30]. Neste banco de dados são citados diversos autores conforme apresentado a seguir.

Jaspart *et al.* [5,13,30] realizou em 1987, treze ensaios com três tipos básicos de ligações identificadas como sendo da série 101 considerando ligações com placa de extremidade estendida, ligações com cantoneiras de alma e ligações com cantoneiras de apoio.

Os dezesseis ensaios da série 102 foram realizados por Brozetti em 1980 [13,30] que abordou ligações com placa de extremidade ajustada e estendida. Zoetemeijer [13,30], em 1981, foi o responsável pela realização dos sete ensaios que compõem a série 104 e também abordou ligações com placa de extremidade ajustada.

Mas foi na Universidade de Innsbruck, Áustria, onde foi realizada a maior parte dos ensaios catalogados neste banco de dados. Em 1985, Klein [13,30] realizou os vinte e cinco ensaios da série 105, todos com ligações soldadas onde foram considerados nós externos e internos. Este tipo de ligação também foi objeto de estudo de outros dois autores, Braun em 1987 [13,30] e Ellmerer em 1988 [13,30], que ensaiaram respectivamente, quinze ensaios da série 106 e quatro da série 107. Sabe-se que a série 108 foi composta por quarenta e cinco ensaios realizados por Lener em 1988 [13,30], mas apesar de serem apresentados os resultados destes ensaios, nenhuma consideração sobre a tipologia das ligações foi mencionada. Ainda na mesma instituição, em 1987, Humer [13,30] realizou os seis ensaios da série 109 de ligações com placa de extremidade de nós internos com enrijecedores na mesa da coluna. Com relação à série 103, são apresentados cinqüenta e seis ensaios de ligações mistas com as mais variadas tipologias realizados por diversos autores.

Azizinamini [31,32] realizou dezoito ensaios de ligações viga-coluna com cantoneiras de alma, de apoio e de topo submetidas a carregamento estático.

A partir da década de noventa, alguns ensaios de ligações metálicas começaram a ser efetuados por pesquisadores brasileiros. Alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura serão citados a seguir.

Queiroz [33] realizou, em 1994, em Innsbruck, uma série de ensaios de ligações soldadas no âmbito de sua tese de doutorado.

Carvalho [34], em 1997, realizou três ensaios de ligações com cantoneiras de alma, cantoneiras de topo e apoio no eixo de maior inércia da coluna. Lima [35,36], em 1998, seguindo a mesma metodologia utilizada por Carvalho, também realizou três ensaios com o mesmo tipo de ligação mas efetuadas segundo o eixo de menor inércia da coluna.

Em 1998, Ribeiro [37] realizou uma série de 35 ensaios de ligações com placa de extremidade onde procurou avaliar a influência da espessura da placa e o diâmetro dos parafusos no comportamento das ligações semi-rígidas.

1.3

Objetivos e Metodologia

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar o comportamento estrutural de ligações viga-coluna com placa de extremidade submetidas a momento fletor e esforço axial de tração ou compressão na tentativa de se averiguar a limitação empírica de 5% imposta pelo Eurocode 3 [8-9].

A metodologia utilizada nesta avaliação consistiu da realização de quinze ensaios em laboratório, sendo oito de ligações com placa de extremidade ajustada e os demais, com placa de extremidade estendida.

Numa segunda etapa, propõe-se um modelo mecânico elasto-plástico calibrado através dos resultados experimentais e baseado nas recomendações de projeto apresentadas no Eurocode 3 [8-9].

1.4

Escopo

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, um breve resumo do estado da arte para as ligações semi-rígidas, especificou os principais objetivos deste trabalho além de apresentar uma pequena descrição do conteúdo de cada capítulo conforme pode ser observado a seguir.

No capítulo dois são apresentadas algumas considerações sobre ligações viga-coluna e uma descrição detalhada do método das componentes por se tratar do procedimento mais completo para o projeto de ligações estruturais em aço. Ainda neste mesmo capítulo, são apresentados alguns dos principais trabalhos que avaliam a influência do esforço axial nas ligações e, conseqüentemente, seu comportamento global.

No capítulo três são descritos os ensaios experimentais realizados no Laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal. A caracterização mecânica e geométrica das peças utilizadas nos ensaios e o modelo estrutural adotado são apresentados,

além do dimensionamento das ligações segundo recomendações do Eurocode 3 [8-9].

No capítulo quatro são apresentados os resultados experimentais obtidos para as ligações com placa de extremidade ajustada através de curvas momento *versus* rotação ($M \times \phi$), momento *versus* deformação ($M \times \varepsilon$), momento *versus* tensão ($M \times \sigma$) e momento *versus* deslocamento ($M \times \Delta$) para as diversas componentes presentes na ligação em estudo.

O capítulo cinco consiste da análise dos resultados experimentais de ligações com placa de extremidade estendida utilizando-se a mesma metodologia mencionada acima.

No capítulo seis, apresenta-se uma descrição do modelo mecânico proposto e ainda, algumas comparações com os resultados experimentais. Também são apresentadas algumas comparações com um outro modelo existente na literatura.

Finalmente no capítulo sete, são tecidas as considerações finais com as principais conclusões obtidas além de algumas propostas para trabalhos futuros.