

1 Introdução

1.1. Considerações iniciais

Para a modelagem estrutural dos projetos de engenharia é importante saber em quais casos as ligações têm comportamento rígido, semirrígido ou flexível. Ainda hoje, apesar das ligações semirrígidas já serem estudadas há um bom tempo, a grande maioria dos projetos estruturais limitam-se a definir ligações rotuladas ou rígidas. Isso se deve ao fato de que estes casos extremos de rigidez facilitam o estudo e o dimensionamento destas ligações.

Apesar da grande maioria das ligações na realidade possuírem comportamento semirrígido, são estabelecidos alguns limites nas normas que permitem a consideração destas nos extremos citados acima. Vale ressaltar que estes não são limites rígidos, pois variam com alguns fatores e características da estrutura, representando então, indicadores aproximados.

A simplificação da ligação no que se refere ao seu comportamento pode levar a uma concepção errada da estrutura e isto pode gerar consequências tanto na distribuição dos esforços quanto no custo do projeto. Assim, podem ocorrer solicitações na prática que não foram consideradas nos cálculos, bem como seções em que a resistência da seção é muito maior que a solicitação, tornando o projeto mais oneroso.

Para que se possa considerar então o comportamento real da ligação, adotando-a como semirrígida nos projetos, é necessário ter-se o conhecimento da sua curva momento-rotação. Isto ainda é trabalhoso e exige que os projetistas mudem a forma atual de cálculo da estrutura.

Os principais parâmetros referentes às ligações são retirados da curva $M-\theta$: momento fletor resistente, rigidez de serviço e capacidade de rotação. O momento último é necessário para análise da capacidade resistente da ligação e para se ter conhecimento, também, se a rótula plástica irá desenvolver-se na viga ou na ligação. Caso o momento resistente da ligação seja inferior ao da viga mista, a

ligação deve ter capacidade de rotação suficiente (ou seja, ductilidade) para garantir o desenvolvimento do momento plástico positivo da viga e isto justifica a importância do conhecimento da rotação permitida pela ligação. De uma forma mais clara, caso a ligação não proporcione uma rotação suficiente para uma redistribuição de esforços após a plastificação, a viga mista não desenvolverá o máximo da sua capacidade resistente. A rigidez de serviço é de interesse para os cálculos de deslocamentos e com isso pode-se avaliá-los de acordo com os limites máximos impostos pelas normas vigentes.

Assim, para que se tenha uma solução de projeto econômica e mais próxima da realidade é necessário escolher a melhor combinação entre: momento fletor resistente da ligação; momento fletor positivo resistente da viga mista e a capacidade de rotação da ligação.

O presente trabalho tem como foco estudar uma ligação semirrígida mista, com o intuito de explorar suas principais características e seu comportamento através de uma análise experimental, comparando-se os resultados com dois métodos analíticos.

1.2. Objetivos

Neste trabalho busca-se uma nova maneira de transferência de forças, na região de momento negativo da viga semicontínua, através do uso de uma ligação semirrígida mista e com conectores de cisalhamento do tipo “*Perfobond Rib*”.

A ligação metálica estudada é composta por cantoneira dupla de alma e cantoneira de assento, ambas aparafusadas. A viga mista é o conjunto formado por viga metálica e laje tipo “*steel deck*”, através de conectores de cisalhamento do tipo “*Perfobond Rib*”. Para compor a ligação semirrígida mista, são utilizadas a ligação metálica parafusada, a viga mista e barras de aço presentes na laje de concreto, estas últimas responsáveis pela resistência aos esforços de tração resultantes na laje de concreto em região de momento negativo.

A análise da ligação será feita através da comparação do estudo experimental de dois modelos cruciformes, em escala real, realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, com o método de cálculo

proposto por Leon et al. (1996) e o método de cálculo proposto pela NBR 8800:2008.

Para efeito de comparação, foi proposto o estudo inicial de um pavimento de edificação de múltiplos andares, com carregamento especificado, no qual foi obtida uma ligação intermediária que resistisse aos esforços solicitantes. Esta ligação foi posteriormente fabricada e ensaiada em laboratório, com o intuito de se obter dados como momento resistente, curva momento-ligação e os modos de ruína.

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Investigar o comportamento momento-rotação da ligação estudada;
- Avaliar a carga e o modo de ruína da ligação mista;
- Verificar se o método de ancoragem escolhido para as barras de aço, com auxílio do conector tipo “*Perfobond*”, funcionou adequadamente;
- Avaliar a metodologia de cálculo proposta por Leon et al. (1996) e comparar o momento resistente e a rigidez de serviço da ligação com os resultados obtidos experimentalmente;
- Avaliar a metodologia de cálculo proposta pelo Anexo R da NBR 8800:2008 e comparar o momento resistente, a rigidez de serviço e a capacidade de rotação da ligação com os resultados obtidos experimentalmente;
- Apresentar um exemplo com o procedimento de projeto para ligações mistas viga-pilar, parcialmente restringidas, com cantoneiras de alma e de assento, seguindo-se o método proposto por Leon et al. (1996).

1.3. Revisão Bibliográfica

Ligação do tipo parcialmente restringida e sua interação com a laje de concreto recebeu atenção, principalmente, devido aos colapsos de estruturas com ligações metálicas soldadas durante os terremotos *Northridge* (Califórnia, 1994) e *Kobe* (Japão, 1995) (Green et al., 2004). Como as ligações semirrígidas possuem

boa capacidade de rotação, estas são de grande utilidade em zonas de riscos sísmicos, pois possibilitam a reorganização dos esforços após a plastificação.

O uso de barras de aço presentes na região do pilar, para proporcionar ação mista nas ligações, foi primeiramente proposto por Barnard, em 1970 (Ammerman & Leon 1987).

Em 1987, Leon e Ammerman avaliaram os ganhos de uma ligação mista ao compará-la com uma equivalente metálica. Neste estudo, chegou-se à conclusão que as ligações mistas tinham comportamento parecido com as metálicas, possuindo as vantagens de ter maior braço de alavanca (ou seja, maior capacidade resistente), maior rigidez e ductilidade. No gráfico mostrado na Figura 1.1 são apresentadas as curvas momento-rotação obtidas por Leon e Ammerman, 1987. Neste último, percebe-se a diferença entre as características de uma ligação mista e aquela sem a contribuição da laje de concreto.

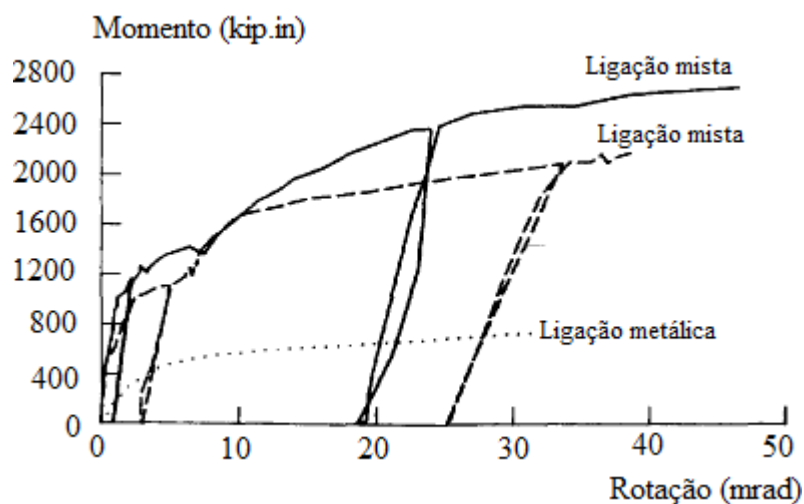


Figura 1.1 - Gráfico comparativo entre uma ligação mista e uma somente metálica, Leon e Ammerman (1987)

Na década de 90 foram realizados estudos importantes a respeito das ligações mistas e alguns destes são encabeçados por Roberto T. Leon, inclusive há a publicação do AISC em 1996, sobre ligações semirrígidas mistas, intitulada “*Partially restrained composite connections*”. Neste manual, existem procedimentos de cálculo para ligações mistas pré-qualificadas e para estruturas com ou sem contraventamento, inclusive tabelas para facilitar o dimensionamento.

Roberto T. Leon estudou principalmente ligações mistas com cantoneira de assento, barras de aço na laje de concreto e com ou sem dupla cantoneira de alma (nas estruturas contraventadas pode-se dispensar estes elementos).

Em 1996, Nethercot et al. avaliaram o comportamento das ligações semirrígidas em um pórtico e compararam-se os resultados com um estudo feito anteriormente das mesmas ligações em protótipos cruciformes. A principal observação foi que o comportamento $M-\theta$ da ligação no pórtico foi inferior quando comparado àquele encontrado para a ligação isolada. As causas usadas como justificativa foram: maiores forças cortante no pórtico devido à influência dos outros elementos da estrutura; carregamento não balanceado no pórtico; impossibilidade de se medir a rotação do pilar no seu eixo, como é feito nos modelos cruciformes, isto contabilizou maiores rotações e conseqüentemente menor rigidez para a ligação.

Em 2004, Green et al. estudaram um modelo em escala real, bidirecional, misto e parcialmente restringido. Este protótipo, do tipo cruciforme, foi submetido a carregamentos cíclicos e a principal conclusão foi em relação à necessidade, percebida neste estudo, de se manter uma altura de concreto fixa por uma distância de, no mínimo, 150 mm da ligação.

A partir da década de noventa, alguns ensaios de ligações metálicas começaram a ser efetuados aqui no Brasil, ver Tabela 1.2. Queiroz realizou, em 1995, uma série de ensaios de ligações soldadas (LIMA, 1999). A seguir são apresentados alguns trabalhos realizados nos últimos 10 anos no Brasil sobre ligações mistas.

Em 2004, Figueiredo realizou ensaios experimentais de quatro modelos com chapa de topo, dos quais dois simulavam ligações de extremidade (tipo “T”) e os outros dois ligações intermediárias (tipo cruciforme). Para cada tipo citado um dos modelos era misto e o outro somente em aço, objetivava-se avaliar as diferenças entre ligações mistas e aquelas somente metálicas.

Em 2005, Mata realizou oito protótipos de nós mistos com ciclos de carregamento e descarregamento.

Em 2006, Tristão estudou ligações de extremidade mistas com cantoneiras de alma e de assento. Foram ensaiados cinco modelos com carregamento monotônico e um com carregamento cíclico com objetivo de avaliar a degradação

da ligação para ações dinâmicas. As ligações ensaiadas apresentaram elevada capacidade de rotação.

Em 2009, Bessa estudou ligações semirrígidas mistas com cantoneiras de alma e de assento com o objetivo de investigar o comportamento destas e compará-lo com o previsto pelo Eurocode 3 e 4. Foram estudados modelos experimentais isolados e um pavimento tipo. Uma das conclusões deste trabalho foi que a perda de rigidez e de resistência após o colapso, devido à abertura excessiva das fissuras na laje de concreto, foi bem menos significativa nas ligações do pavimento tipo, quando comparado aos respectivos protótipos isolados, isto devido à continuidade das vigas na direção do eixo de menor inércia do pilar, possibilitando uma melhor redistribuição dos esforços de tração nas armaduras e laje.

Na PUC-Rio existem estudos experimentais em torno das ligações semirrígidas, especialmente os apresentados na Tabela 1.2.

Outros estudos de interesse para este trabalho, que foram desenvolvidos na PUC-Rio, são os referentes aos conectores do tipo “*Perfobond*”. Estes são citados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1- Estudos experimentais sobre conectores do tipo *Perfobond* realizados na PUC-Rio

Autor/ano	Estudo	Detalhes e principais conclusões
Ferreira, L.T.S 2000	Estudo dos conectores <i>Perfobond</i> e <i>T-rib</i> .	Foram realizados ensaios do tipo <i>push-out</i> e ensaios de arrancamento para avaliar o comportamento do conector <i>T-rib</i> . Foi o primeiro trabalho a sugerir o uso destes conectores em construções mistas de edificações.
Juliana Vianna 2009	Comportamento de conectores do tipo “ <i>Perfobond</i> ” e “ <i>T-Perfobond</i> ”.	Foram realizados ensaios do tipo <i>push-out</i> de acordo com o Eurocode 4. Verificou-se o comportamento dos conectores, avaliando-se a influência de várias configurações. Para validar os ensaios <i>push-out</i> foi ensaiado também um modelo em escala real. Concluiu-se que os conectores <i>T-perfobond</i> possuem maior capacidade de carga e maior rigidez que os do tipo <i>Perfobond</i> . Por fim, comparando-se os resultados do modelo em escala real com o tipo <i>push-out</i> , concluiu-se que este último é adequado para analisar a capacidade do conector de cisalhamento.

Tabela 1.2 – Estudos experimentais sobre ligações semirrígidas na PUC-Rio

Autor/ano	Estudo	Detalhes e principais conclusões
Carvalho, L.C.V.D. 1997	Ligações metálicas semirrígidas com dupla cantoneira de alma e cantoneira de assento. Estudo experimental de três modelos com ligações de extremidade.	Os resultados experimentais variaram pouco quando comparados com o modelo proposto por Kishi e Chen. Foi feita uma observação quanto à posição que devem ser instalados os equipamentos utilizados para obter a rotação. Concluiu-se que LVDT's posicionados mais próximo das linhas de parafuso da alma da viga, conduziram a resultados de rotação mais próximos da realidade.
Lima, L.R.O. de 1999	Ligações metálicas semirrígidas conectadas ao pilar no eixo de menor inércia. Estudo experimental de três modelos com ligações de extremidade.	No primeiro ensaio não se utilizou enrijecedor (composto de cantoneira de alma e de apoio). No segundo ensaio utilizou-se enrijecedor em substituição da cantoneira de apoio, porém nos dois modelos a alma da coluna controlou o comportamento estrutural. No terceiro ensaio um enrijecedor foi soldado à alma da coluna e foi observado um aumento de 68% na resistência ao momento e um ganho de rigidez considerável. Com isto, somente a terceira ligação teve um comportamento semirrígido.
Ferreira, L.T.S 2000	Pórtico em escala real com ligações, intermediárias e de extremidade, semirrígidas mistas no eixo de maior inércia com utilização de conectores do tipo “ <i>perfobond</i> ”.	Na ligação de extremidade foi utilizado o conector “T-rib”. Para as ligações intermediárias foi adaptado o “ <i>perfobond rib</i> ”, antes utilizado apenas em pontes mistas. Uma das principais observações deste trabalho é que a ligação de extremidade estudada, além do bom comportamento estrutural apresentado, oferece uma flexibilidade nas soluções do projeto arquitetônico de fachadas externas.
Lima, L.R.O. de 2003	Estudo experimental de ligações metálicas com placa de extremidade submetidas a momento fletor e esforço axial. Um total de quinze ensaios foram realizados, oito com placa ajustada e os demais com placa estendida.	Para os ensaios com placa ajustada observou-se que a presença de esforço axial não influenciou significativamente na rigidez, mas causou uma variação nos esforços de flexão que não condiziam com a limitação de 10% imposta pelo Eurocode 3. Para os ensaios com placa estendida o mesmo foi observado porém de forma menos significativa que o anterior.

Além dos trabalhos mostrados na Tabela 1.2, é importante citar o estudo feito por Ramires em 2010, na PUC-Rio. Neste último foi avaliado o comportamento estrutural de ligações semirrígidas de aço e mistas com placa de extremidade através do método proposto pelo Eurocode 3 e 4. Para se atingir os objetivos do trabalho foi proposto um programa computacional – *SRJ Tool* – para o cálculo da resistência dos componentes da ligação e ensaios experimentais do tipo “*pull out* modificado” para comparação dos resultados. Verificou-se no trabalho citado que o programa foi capaz de avaliar satisfatoriamente ligações semirrígidas de aço e mistas e que o método de ensaio proposto comprovou na prática o comportamento ideal de uma ligação mista.

Por último, Cordeiro em 2015, deu continuidade à pesquisa de Ramires (2010) estudando os modos de ruína das barras ou das suas ancoragens e a ruptura da solda dos conectores *stud bolt* através de ensaios do tipo *pull out*. Através desta pesquisa obteve-se um maior conhecimento sobre a solda e seus impactos ao sistema.

1.4. Estrutura do documento

O presente trabalho está dividido em oito capítulos, descritos de forma sucinta abaixo.

Esta dissertação começa com o presente capítulo, no qual são apresentados uma introdução a respeito do assunto, os objetivos do presente estudo e uma revisão sobre alguns trabalhos referentes às ligações semirrígidas.

O Capítulo 2 traz uma revisão teórica em torno do tema. São mostrados as principais classificações das ligações semirrígidas e os métodos de análise utilizados são apresentados.

No Capítulo 3 é proposto um exemplo de planta baixa de um pavimento de edificação de múltiplos andares. O objetivo é aplicar o procedimento de cálculo presente no *Steel Design Guide Series 8* do AISC, explorando-se seus detalhes neste exemplo.

O Capítulo 4 é uma apresentação do programa experimental, ou seja, uma exposição de todas as etapas realizadas em laboratório para os testes das duas ligações estudadas.

O Capítulo 5 é composto pela apresentação dos resultados experimentais: gráficos, fotos e observações feitas em laboratório.

O Capítulo 6 apresenta as previsões teóricas para a ligação estudada e ensaiada. Estas previsões são referentes a três métodos de análise: o primeiro proposto por Leon et al. (1996), o segundo pela NBR 8800:2008 e o terceiro através de um modelo simplificado.

O Capítulo 7 é a análise dos resultados, ou seja, uma comparação entre os resultados teóricos e experimentais, bem como uma análise das observações feitas a partir dos testes experimentais.

Por fim, o Capítulo 8 traz as conclusões retiradas deste estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros.