

1 Introdução

Um sistema misto de aço e concreto, segundo Queiroz e Pimenta (2001) pode ser definido como um conjunto onde trabalham o perfil de aço e o concreto armado, formando um elemento misto ou uma ligação mista. A interação entre os elementos pode ocorrer segundo meios mecânicos (conectores, mossas, ressalto, etc.), por atrito, por aderência ou repartição de cargas (como em pilares mistos sujeitos apenas à força normal). Com a interação dos dois elementos, pode-se aproveitar suas melhores características e minimizar as suas desvantagens. Citam-se como vantagens a redução das formas e escoramentos nos elementos, do peso próprio e do volume da estrutura, do uso de materiais e desperdício, aceleração da construção da obra, entre outras.

O aço pode ainda atender às exigências mais atuais do mercado, que visam a preservação do meio ambiente, através da utilização de materiais com menor impacto ao longo de todo seu ciclo de vida (da extração ao descarte), com maior durabilidade, maior conteúdo reciclado em sua composição, e possibilidade de desmontagem, após o período de vida útil do edifício. Suas vantagens podem ser aumentadas quando utilizados como componente de uma estrutura mista, onde são verificadas diminuição das quantidades de materiais empregados para suportar a mesma resistência de uma peça convencional (concreto ou aço), o que permite a redução dos materiais a serem retirados da natureza, colaborando novamente para a proteção do meio ambiente.

As questões de dimensionamento dos elementos mistos já vêm sendo realizadas à muito tempo, o mesmo não acontecendo com os detalhes de ligação, destacando-se a dificuldade de dados para o caso de ligações mistas.

As ligações estruturais influenciam o comportamento global das estruturas, tanto metálicas como mistas. Visando a entender o comportamento real de uma ligação, suas propriedades geométricas e mecânicas, e sua influência na estrutura e na resistência global dos pórticos de edificações mistas, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos, buscando-se formas novas e não convencionais de considerações do comportamento, que tradicionalmente são classificadas como rígidas ou flexíveis.

As ligações rígidas são aquelas em que os elementos da ligação têm a mesma rotação e o momento fletor atuante é transmitido em sua totalidade entre a viga e o pilar, havendo solicitações maiores sobre os pilares. Para as ligações flexíveis, não há continuidade de rotação, tendo como consequência a não transmissão do momento fletor entre os membros da estrutura e o aumento das tensões sobre as vigas. Os casos intermediários são denominados de ligações semirrígidas, apresentando comportamento entre as ligações rígidas e flexíveis, conforme Figura 1.1.

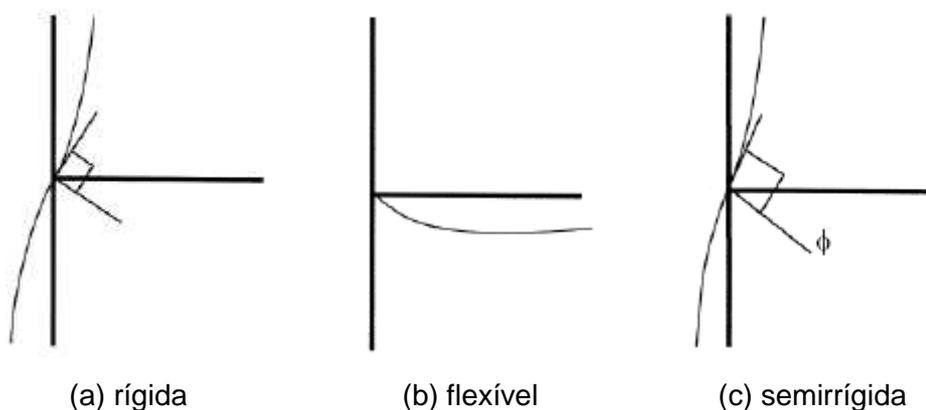


Figura 1.1 – Classificação das ligações de acordo com sua rigidez.

Essa classificação é seguida tanto para ligações compostas por elementos de aço, como para estruturas mistas, constituídas de aço e concreto. Porém, para simplificação de cálculos, no caso de estruturas mistas, algumas normas não consideram a contribuição da resistência e rigidez da laje de concreto e da armadura da região negativa, permanecendo o cálculo equivalente as estruturas de aço.

Com relação à resistência, as ligações podem ser classificadas como ligações de resistência total, parcial ou rotuladas. As ligações de resistência total são aquelas em que a resistência da ligação é maior do que a dos elementos conectados, propiciando o surgimento de rótulas plásticas nos elementos e não na ligação. Já as ligações de resistência parcial são aquelas em que a resistência da ligação é menor do que a dos elementos presentes na ligação, ocorrendo, a formação de rótula plástica na ligação e não no elemento conectado. Para o caso das rotuladas, a ligação somente tem a capacidade de transmitir esforços normais e de cortante. A Figura 1.2 mostra graficamente o

comportamento das ligações, sendo (a) em relação a rigidez e (b) em relação a resistência (Figueiredo; Gonçalves, 2007).

Ainda é possível classificar as ligações quanto a sua ductilidade, considerando que este parâmetro está relacionado à capacidade rotacional: quanto maior a capacidade rotacional da ligação mais dúctil será a ligação.

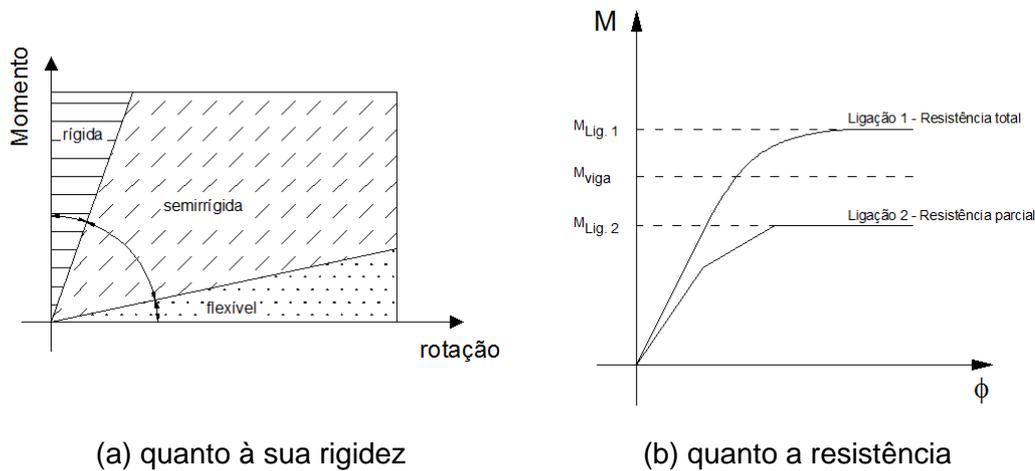


Figura 1.2 – Comportamento das ligações.

Uma ligação é considerada mista quando a laje de concreto participa da transmissão de momento fletor de uma viga mista para um pilar ou para outra viga no vão adjacente. Nas ligações mistas, os limites de capacidade resistente à flexão são definidos pela capacidade resistente à flexão da viga mista e da ligação mista. O seu comportamento é influenciado por seus componentes e pela configuração da ligação. Entende-se por componentes das ligações as chapas, os parafusos, os enrijecedores e as soldas. A configuração influencia na rigidez inicial, resistência e capacidade rotacional da ligação (De Nardin; Souza; El Debs, 2007). A Figura 1.3 apresenta um modelo de ligação entre o aço e o concreto.

Para melhor entender o comportamento real das ligações, pesquisas vem sendo desenvolvidas, com o objetivo de revisar e propor novas recomendações de projetos, e alterações as normas vigentes, quando cabíveis. Os trabalhos acadêmicos auxiliam esta atualização, e poderão conduzir ao dimensionamento mais econômico, melhorias no processo de fabricação e a redução de custos de execução e montagem.

Estas pesquisas já apresentaram muitas contribuições, tais como: as ligações semirrígidas são consideradas uma realidade, e incorporadas em

algumas normas; a influência da parcela de concreto armado no comportamento das estruturas mistas é considerada, podendo modificar a distribuição e magnitude das suas forças internas atuantes.

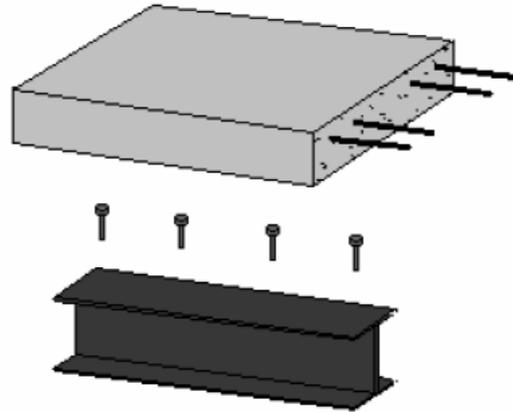


Figura 1.3 – Ligação de cisalhamento entre a laje de concreto e a viga de aço (Figueiredo; Gonçalves, 2007).

Levando-se em consideração o peso da estrutura, a ligação comparada à estrutura global representa uma pequena parcela, porém seus custos são elevados quando verificados os gastos relativos à fabricação e montagem. Desta forma, o interesse no desenvolvimento de dispositivos de ligações eficientes, e a economia destas peças impactarão positivamente no custo total da estrutura. Essa redução pode ser obtida por meio do dimensionamento da ligação como semirrígida.

Uma forma de auxiliar o cálculo de estruturas é a utilização do apoio computacional e a inclusão desses novos parâmetros para o dimensionamento e a determinação dessas incógnitas que podem gerar, devido à maior precisão na determinação das variáveis, estruturas com resultados mais precisos e econômicos, incluindo-se o cálculo das ligações. Porém, ressalta-se, que apesar da facilidade alcançada com os sistemas computacionais, a utilização dos programas de cálculos não substitui a experiência profissional e a análise dos resultados é fundamental para a boa aplicação das ferramentas disponíveis.

1.1. Revisão Bibliográfica

1.1.1. Liew et al. (2000, 2004)

Foram produzidos por Liew et al. diversos artigos relativos a ligações mistas, sendo citados três.

O artigo de Liew et al. (2000) refere-se a testes de ligações mistas em aço e concreto realizados em seis amostras em escala real, com placa de extremidade ajustada soldada à extremidade da viga e aparafusada à mesa da coluna, sendo comparado três tipos de composição da coluna: coluna de aço, parcialmente envolvida e totalmente envolvida por concreto. A avaliação da ligação mista é realizada através do modelo de molas preconizado pelo *Eurocode 3*, sendo verificadas a capacidade de rotação e momento da ligação.

O trabalho concentrou-se no estudo dos comportamentos das ligações sobre os efeitos da armadura de aço da laje e do confinamento do concreto na zona da viga mista, tendo o objetivo principal de estudar, experimentalmente, o comportamento de ligações mistas com diferentes parâmetros para investigar os efeitos desses sobre o comportamento da ligação no que diz respeito a capacidade de momento, capacidade de rotação, rigidez rotacional e ductilidade, através da avaliação do *Eurocode 3* e *Eurocode 4*.

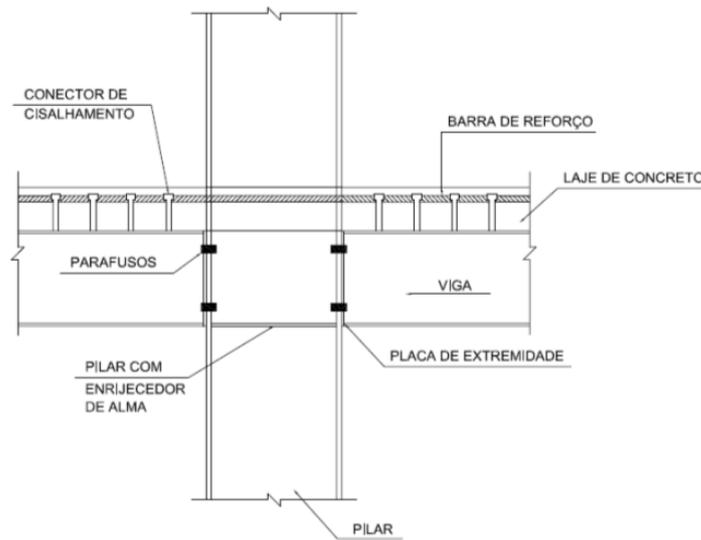
A configuração dos ensaios realizados é apresentada na Figura 1.4.

Os resultados indicaram que a comparação entre o modelo analítico e o experimental foi satisfatória, com escoamento variando de 4 a 10% em relação ao previsto, exceto para SCCB4, em que a resistência alcançou um valor superior ao prevista em 30%, ocorrida devido ao enrijecedor da alma da coluna.

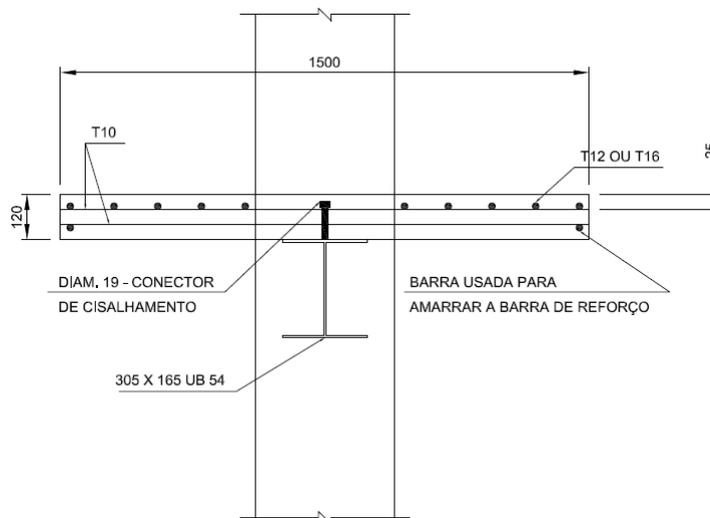
A rigidez inicial e a resistência a primeira fissura teve seu valor elevado com o aumento da armadura na laje de concreto. A influência da relação da armadura na capacidade de rotação não é tão evidente comparado com a rigidez inicial e a capacidade ao momento, indicando que um aumento da armadura não é necessariamente um aumento da capacidade de rotação. O envolvimento da capacidade de rotação devido ao aumento da área da armadura diminuirá quando a armadura alcançar um valor limite, desse modo a taxa de armadura na laje deve ser cuidadosamente selecionada para suportar a resistência local de compressão da mesa da viga.

Verificou-se que a dispensa de reforço na alma da coluna não é aconselhável, pois causam a falha prematura da alma da coluna. Isso leva a

uma queda drástica na capacidade de momento e rotação. Para as duas amostras SCCB5 e SCCB6, que constituíam a coluna mista, o envolvimento de concreto aumenta a resistência à compressão da alma da coluna. Seus efeitos são comprovados sendo equivalentes às dos enrijecedores da alma da coluna. No entanto, a coluna totalmente envolvida em concreto, caso do ensaio SCCB6, não mostra significativa melhoria nas propriedades da ligação viga-coluna comparado com a coluna parcialmente envolta do ensaio SCCB5.



(a) Arranjo Geral



(b) Posicionamento dos elementos

Figura 1.4 – Layout geral das amostras de ligações (adaptado de Liew et al., 2000).

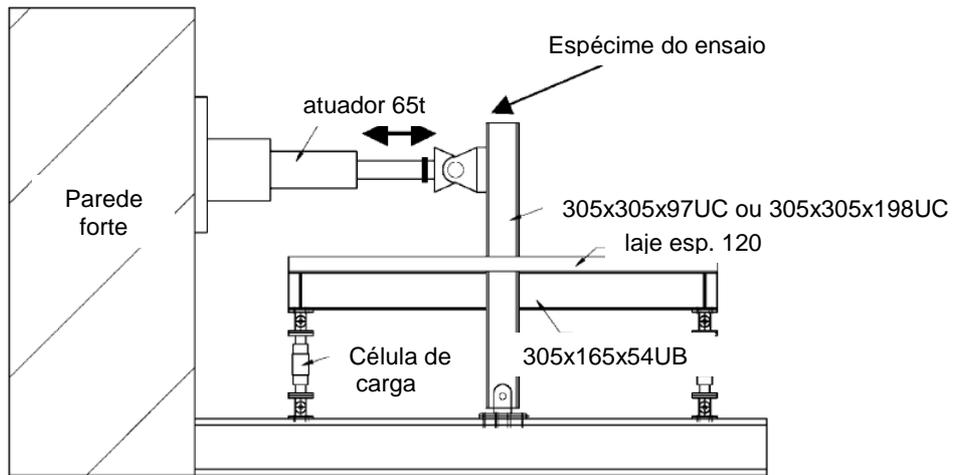
Para a configuração de ligação com alma da coluna enrijecida, o modelo analítico fornece uma boa estimativa da capacidade momento. A relação média entre os resultados dos testes e as capacidades de momento previstos é de 1,12. O ponto de transição ($2 / 3M_{j, Rd}$) entre a rigidez inicial e rigidez secante pode ser modelada com precisão pelo Anexo Revisado J, *Eurocode 3*; no entanto, o modelo da rigidez superestima a rigidez inicial e secante da ligação mista da placa de extremidade ajustada. Muitas incertezas estão envolvidos no cálculo da capacidade de rotação. A razão dos resultados dos testes da capacidade prevista de rotação teve valores entre 1,17 e 2,63 e, portanto, considerações ainda são necessários para chegar em um modelo satisfatório.

No artigo produzido por Liew et al. (2004) foram estudadas as ligações mistas viga-coluna, tendo sido divididas em dois artigos, um relativo a parte experimental e outro sobre a análise analítica. A ligação estudada refere-se a viga-coluna com placa de extremidade aparafusada, ajustada e estendida, sujeitas a reversão de carregamentos. Foram realizados seis amostras de ligações sujeitas a momento negativo, oito amostras cruciformes sujeitas a reversão de cargas, estando o lado da ligação sob o momento negativo e o lado contrário ao momento positivo. Em algumas amostras, os pilares foram enrijecidos com placa dupla ou a coluna envolvida em concreto.

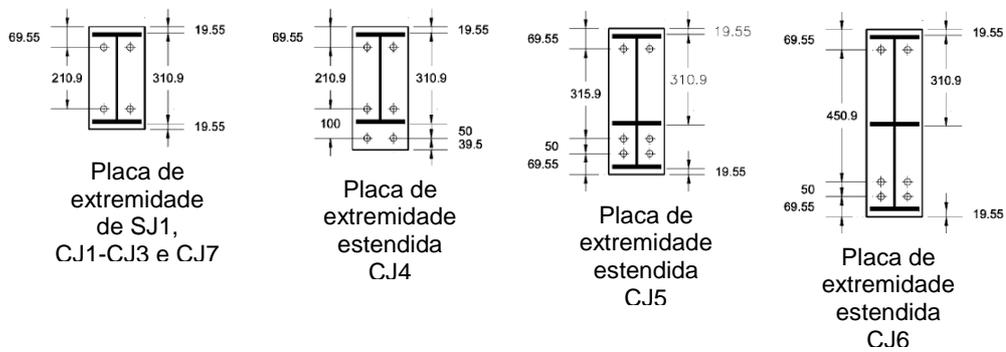
Foram considerados como parâmetros de estudo a taxa de armadura da laje de concreto, a presença de enrijecedores, ligações internas e externas, quantidade de conectores de cisalhamento e a presença de concreto envolvendo a coluna. Instrumentações foram utilizadas para realizar a medição dos ensaios, tais como inclinômetros, extensômetros e transdutores de deslocamento. A Figura 1.5 apresenta detalhe dos ensaios e a forma de realização dos ensaios.

Destaca-se que a resposta da ligação a carga cíclica pode ser usada para verificar da reabilitação da estrutura em termos de tenacidade e estabilidade, especialmente quando a ligação é empregada em pórtico sujeitos a reversão de carga.

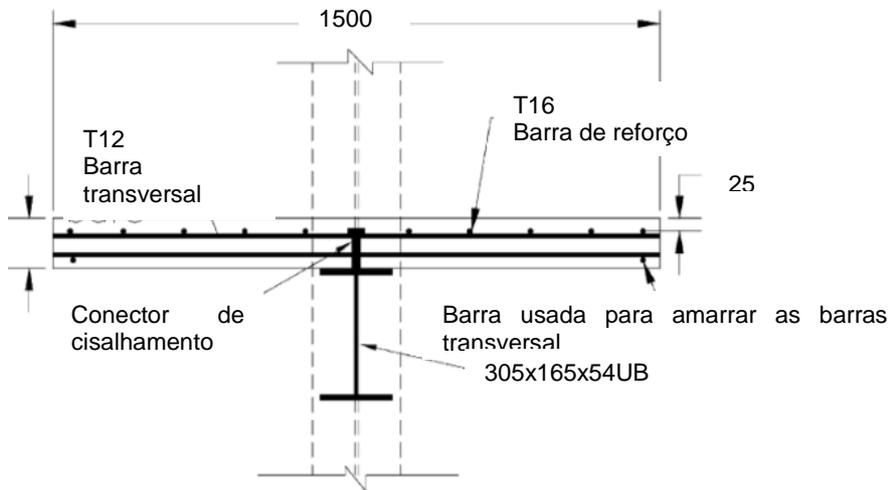
Um ponto interessante mostrado pelas curvas momento *versus* rotação é que a curva seguiu mais ou menos o mesmo caminho de carregamento/descarregamento durante o histórico de carregamento cíclico (exceto no último ciclo). Isto indica que a rigidez da ligação não é muito afetada pelos três ciclos de carga. O efeito de adaptação só pode ser visto quanto mais ciclos de carga são aplicados.



(a) Arranjo dos ensaios



(b) Detalhes das ligações em placa de extremidade



(c) Detalhe da seção transversal da ligação mista

Figura 1.5 – Configuração dos ensaios (adaptado de Liew et al., 2004).

Pode-se concluir com a análise experimental que:

- A resposta rotacional ao momento da ligação mista sujeita a momento positivo e negativo é diferente devido à seção assimétrica nas regiões de momento diferentes.
- Para ligações de placa de extremidade ajustadas sujeitas a momento negativo, a capacidade ao momento e a rigidez inicial é maior que o valor correspondente quando sujeito ao momento positivo. Essa diferença pode ser reduzida pela adoção de ligações de estruturas de aço mais fortes como é o caso das realizadas com placa de extremidade estendida.
- A reversão de carregamento requer uma zona de painel mais forte para resistir a força de cisalhamento resultante gerada pelos momentos desequilibrados e em muitos casos a resistência da zona do painel governa o comportamento das ligações.
- Nos testes a espessura efetiva da área carregada entre a coluna em aço e concreto pode ser levada como a espessura da mesa da coluna quando a ligação é sujeita a momento positivo. Isto é vital para estabelecer a capacidade de momento.
- Nos testes monotônicos e cíclicos com enrijecedores a capacidade de momento negativo é alcançada devido a existência do enrijecedor. As placas duplas aumentam a resistência ao cisalhamento da zona do painel e a resistência a compressão da alma da coluna, que governa a capacidade de momento negativo dos ensaios sem elas. A capacidade de momento positivo não é alcançada considerando a placa dupla por não melhorar à capacidade a tração dos parafusos que governam a capacidade de momento positivo.
- A ligação em placa de extremidade estendida provou ser uma opção efetiva se um aumento da capacidade de momento positivo e negativo da ligação é alcançado, sem aumentar a espessura total da viga. As melhorias são principalmente devido ao aumento da espessura e o braço de alavanca a momento.
- A eficácia da placa dupla na alma da coluna para alcançar a capacidade a momento só é visível para flexão negativa, sendo observado esse fato na comparação dos ensaios com e sem a placa, sob carga cíclica. O envolvimento de concreto também alcançou a rigidez rotacional inicial da ligação sob momento positivo e negativo.

Com os resultados experimentais foi também elaborado um artigo referente a análise analítica da ligações produzida, sendo também avaliadas a capacidade a momento e a rigidez rotacional das ligações.

A Figura 1.6 mostra o diagrama de força de uma ligação de placa de extremidade ajustada submetido ao momento positivo. Se a capacidade do momento da ligação mista é regida por modos de falha dúcteis, tais como a mesa de coluna e placa da extremidade em flexão, e a distribuição de blocos de tensão plástica é assumida como mostrado na Figura 1.6. Por outro lado, a distribuição da força é assumido como sendo linear, quando o modo de falha é detectado, tais como fratura de parafusos e alma da coluna em tração.

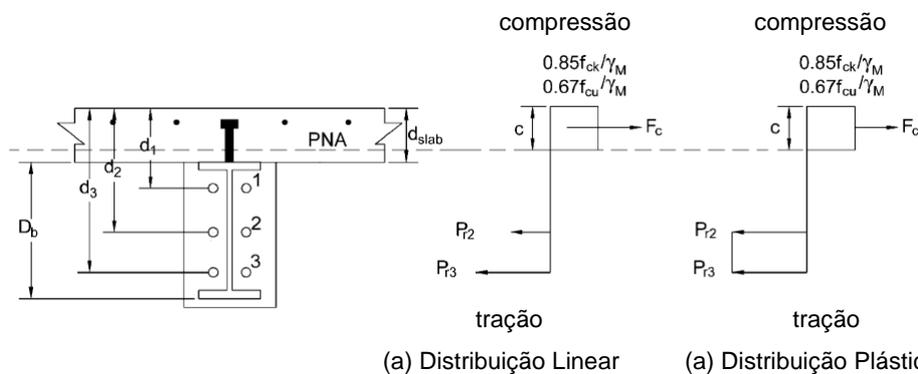


Figura 1.6 – Distribuição de tensões e força sob momento positivo (adaptado de Liew et al., 2004).

Foi observado na comparação entre o experimental e o analítico que o modelo do *Eurocode* prevê rigidez rotacional inicial ligeiramente maior para ligações carregadas somente a carga simétrica, mas não para ligações sujeitas a reversão de carregamento. A razão provável é que o comportamento da deformação da ligação mista sob reversão de carregamento são dominadas pela deformação ao cisalhamento do painel da ligação que é bem capturada pelo modelo da zona do painel usada pelo *Eurocode*.

Das comparações entre os resultados analíticos e experimentais para ligações mistas, as seguintes observações podem ser feitas:

- O procedimento de cálculo documentado no *Eurocode* 3 são superiores ao previsto para a rigidez rotacional inicial para ligações carregadas simetricamente produzindo momento negativo na ligação viga-coluna. O máximo erro encontrado está em torno de 32%.

- Para ligações sob reversão de carregamento em que um lado da ligação é sujeita ao momento positivo e o outro lado está sob momento negativo, a proposta modificada do método das componentes encontrou suficiente aproximação para capturar a capacidade de momento e rigidez inicial de tipos de ligações mistos de placa de extremidade ajustada ou estendida.
- Para ligações sob momento positivo, o procedimento proposto modificado é adequado para determinar a capacidade de momento positivo. A previsão geralmente é conservativa com um desvio máximo em torno de 20%. A rigidez rotacional inicial positiva pode ser determinada com razoável aproximação, baseado nos testes que evidenciaram que o braço de alavanca é levado como a distância entre a linha de parafusos a tração no meio da espessura da laje de concreto em compressão.

Foram ainda realizados testes nos conectores de cisalhamento, para obtenção da rigidez inicial do conector individual, tomando-se como valor a porção linear da curva carga *versus* deslocamento. Os testes tiveram como variáveis o arranjo e espaçamento e quantidade de conectores. A Figura 1.7 mostra a configuração do ensaio.

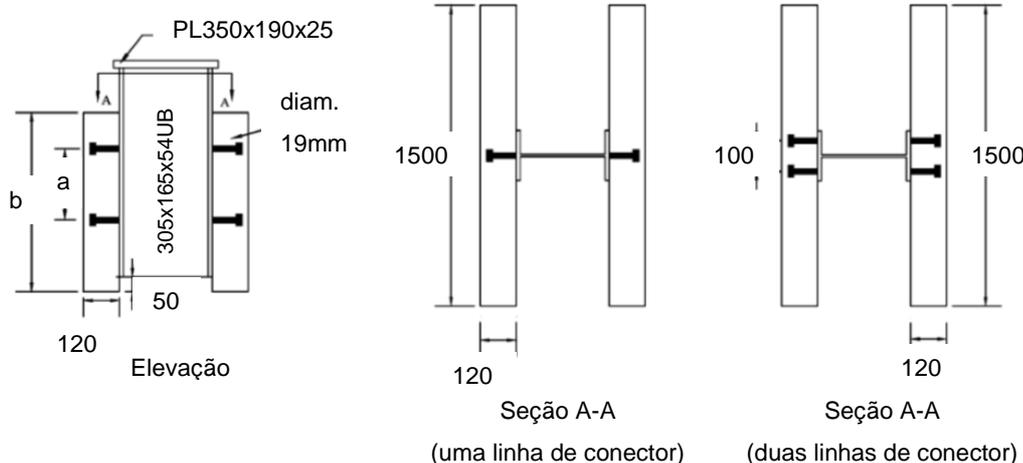


Figura 1.7 – Detalhe típico dos ensaios dos conectores (adaptado de Liew et al., 2004).

O comportamento carga-deslocamento encontrado para os testes são similares e consistentes. O deslocamento, que é o momento relativo (ou deslizamento) entre a viga de aço e a laje de concreto, ocorreu quando a carga foi aplicada. A curva carga-deslocamento iniciam-se lineares e começam a mostrar as características não lineares depois de certo nível de carga. A rigidez

inicial que descreve a resposta dos conectores com respeito a carga antes de algum escoamento da componente é levada a curva da porção linear da curva carga-deslocamento. Os resultados dos testes indicam que a maior resistência do concreto foi a maior rigidez inicial e um valor médio é usado para k_{sc} na análise da ligação.

1.1.2. Kattner e Crisinel (2000)

O trabalho apresentado por Kattner e Crisinel (2000) buscou apresentar o estudo relativo a modelagem de elementos finitos de ligações semirrígidas, através da possibilidade de simular o comportamento das ligações através de métodos dos elementos finitos, comparando os resultados numéricos e os experimentais.

Esse estudo faz parte de um conjunto de estudos que envolviam análises teóricas e experimentais, tendo sido iniciada pelo último, sendo o artigo estudado referente a fase de extrapolação dos ensaios para modelos de elementos finitos, permitindo o estudo de mais casos de estruturas com ligação mistas semirrígidas. Os modelos foram analisados pelo programa DIANA.

Foram simulados uma viga mista, uma ligação mista em placa de extremidade ajustada e em cantoneira dupla. A seguir são apresentadas as vantagens e desvantagens dos modelos:

- Vantagens: usar as condições das constantes lineares cinemáticas incapazes de conectar a viga mista e a coluna de aço; respeitar as dimensões reais da ligação; considerar a posição geométrica real do efeito de transferência de carga; utilizar as medidas de flexibilidade total; flexibilizar a deformação cisalhante na alma da coluna através de um elemento de viga que leva a deformação cisalhante em conta; simular diferentes tipos de ligações de aço pela modificação do número, localização e características das molas, que representam as componentes diferentes das medidas de flexibilidade das ligações; analisar os diferentes modelos sem a necessidade de programação adicional.
- Desvantagens: conhecer o comportamento carga-deslocamento dos elementos de mola translacional que representariam as componentes da ligação; dificuldade de implantação de condições cinemáticas nos modelos dos programas de elementos finitos; limitação dos tipos de ligações

simulados devido a necessidade da informação das medidas de flexibilidade; dependência da qualidade do comportamento das ligações globais de acordo com as características da mola assumidas, que refletem o efeito da carga real transferida entre a viga e a coluna.

1.1.3. Simões et al. (2001)

Simões et al. (2001) apresentaram o comportamento experimental de ligações mistas viga-coluna de placa de extremidade sob carregamentos monotônicos, tendo como maior foco relatar a identificação da contribuição do confinamento do concreto em colunas mistas e a avaliação da possibilidade de várias cargas, modificando o carregamento simétrico e antissimétrico nos nós internos e nós externos, sob momento negativo e positivo, comparando com a metodologia do *Eurocode* para ligações mistas.

Para análise das ligações mistas foram realizadas na Universidade de Coimbra oito testes, sendo quatro representando nós internos e quatro representando os nós externos de uma ligação viga-coluna. O comportamento analítico de uma ligação mista viga-coluna (curva momento-rotação) foi baseado no método das componentes (adotado no *Eurocode 3* e *Eurocode 4*), pelo que cada componente é idealizada como uma mola caracterizada pela curva força-deformação não linear. O método foi dividido em três estágios: identificação das componentes fundamentais nas zonas de tração, compressão e cisalhamento da ligação; avaliação da capacidade de resistência, a rigidez e a deformação de cada componente; montagem das diferentes componentes em ordem para avaliar o comportamento global da ligação.

O programa das pesquisas experimentais apresentaram as seguintes conclusões:

- Ligações entre vigas mistas e colunas de aço sob carregamento estático monotônico mostraram alta ductilidade.
- Ligações entre vigas mistas e colunas de aço sob carregamento simétrico tiveram alta resistência e rigidez inicial. Por outro lado, os testes com carregamento assimétrico foram governados em maioria pelo painel da alma da coluna deformadas em cisalhamento, levando à redução de valores de resistência e rigidez inicial.

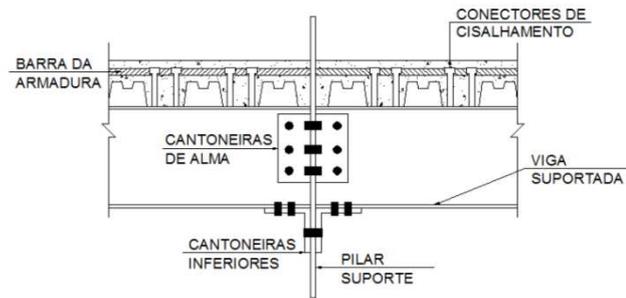
- Ligações onde a coluna e a viga são mistas testadas sob condições de carga similar aos não mistas resultaram em um aumento de resistência e rigidez inicial sem redução significativa da ductilidade, devido ao efeito dos enrijecedores do concreto no painel da alma da coluna.
- Boa aproximação da metodologia analítica reproduziu a resistência e a rigidez inicial para a maioria das configurações testadas.
- Mesmo para ligações sob momento positivo, uma situação ainda não coberta pela Seção 8 do *Eurocode 4*, boa aproximação foi notada em termos de resistência ao momento. Porém a rigidez inicial foi superestimada. Essa discrepância resultou na negligência da deformação do concreto comprimido na interface laje-coluna.

1.1.4. Pires (2003)

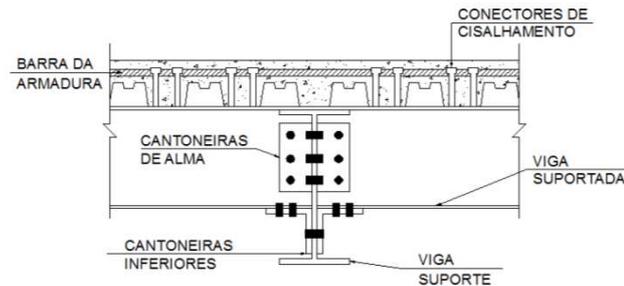
Pires (2003) desenvolveu, em sua dissertação de mestrado, estudo de ligações mistas em de vigas mistas semi-contínuas, com a utilização de um programa desenvolvido pela própria. Para o estudo foram consideradas lajes *steel deck*, ligadas a mesa do pilar, a alma do pilar, ou a viga passante, conforme Figura 1.8. Como conclusões do trabalho pode-se verificar que:

- Em muitos casos estudados verificou-se a necessidade de utilização de apenas um conector de cisalhamento por nervura, sendo que para isso a área de conectores deveria ser estendida para o trecho de momento positivo.
- A influência da flexibilidade do apoio no caso de vigas como elementos de suporte não é significativa, de modo geral.
- A utilização de simplificação para o cálculo da capacidade de rotação apresentou boa aproximação.

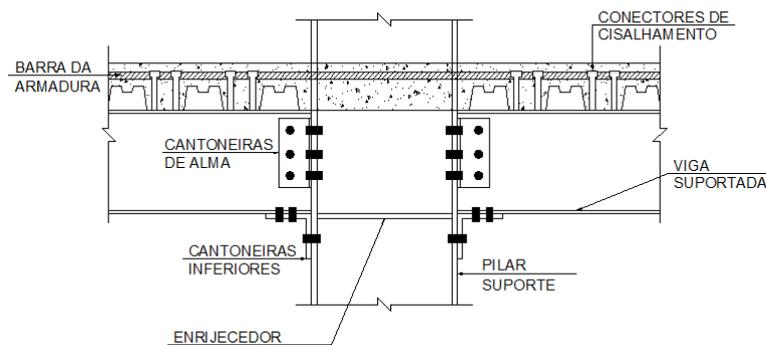
Para o dimensionamento da ligação mista, incluído no programa, foi utilizado o código europeu *Eurocode*.



(a) elemento de suporte - alma do pilar



(b) elemento de suporte - viga



(c) elemento de suporte - mesa do pilar

Figura 1.8 – Ligações mistas estudadas (adaptado de Pires, 2003).

1.1.5. Fu e Lam (2006)

Fu e Lam (2006) escreveram artigo abordando o estudo experimental de ligações mistas semirrígidas com viga metálica em lajes alveolares pré-fabricadas (*Experimental Study on semi-rigid composite joints with steel beams and precast hollowcore slabs*). Os ensaios foram realizados segundo o arranjo mostrado na Figura 1.9, em um total de oito testes em escala real, tendo como variável o parafuso passante, o grau de ligações de cisalhamento, a área da armadura longitudinal e a espessura da laje. Com os resultados obtidos, esses autores propuseram um método para prever a capacidade de rotação e

momento para esse tipo de ligação. Com esses estudos foram apresentadas algumas conclusões, citadas a seguir.

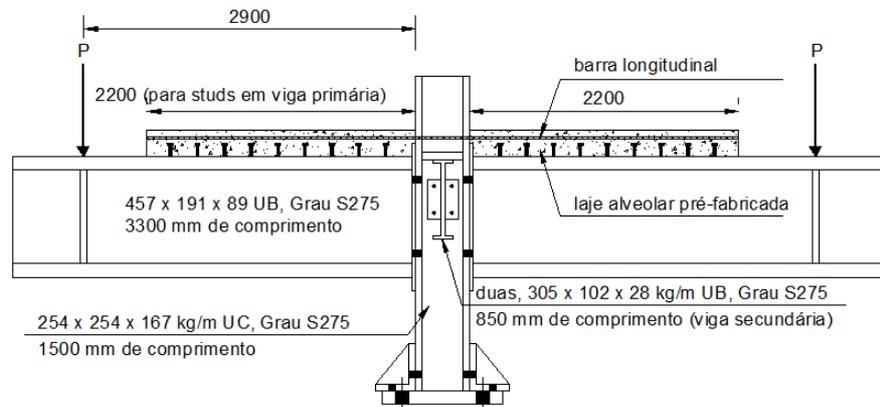


Figura 1.9 – Arranjo geral para os ensaios (Fu e Lam, 2006).

- As ligações semirrígidas com lajes alveolares pré-fabricadas podem proporcionar a capacidade de rotação e momento suficiente para atender as normas de projeto, no que tange a análise do tipo plástica.
- Dois modos de falhas foram observados a partir dos ensaios: fratura da armadura longitudinal e fratura da cabeça dos conectores de cisalhamento. Apesar dessas falhas, pode-se verificar que a resistência à tração da armadura longitudinal deve ser levada em consideração para o cálculo de cisalhamento, devido a constatação de sua influência nos ensaios, e que o espaçamento entre os conectores de cisalhamento tem pouco influência na capacidade de momento e rotação da ligação, desde que se considere o mesmo grau de ligação ao cisalhamento.
- Não foi observada separação durante os ensaios do concreto realizado *in situ* e das lajes alveolares pré-fabricadas, o que comprovou a boa aderência entre os materiais empregados.

O método proposto por esses autores baseou-se nos resultados dos ensaios realizados, atingindo valores aceitáveis para uso de previsão do comportamento dessa forma de ligação mista. Pelo método, a capacidade de rotação, ϕ_u , com as variáveis apresentadas na Figura 1.10, é definida pela equação (1.1).

$$\phi_u = \frac{\Delta L}{D_b + D_r} + \frac{\text{Slip}}{D_b} \quad (1.1)$$

$$\Delta L = \epsilon_{sh} \left(p_1 + p_2 + \frac{D}{2} \right)$$

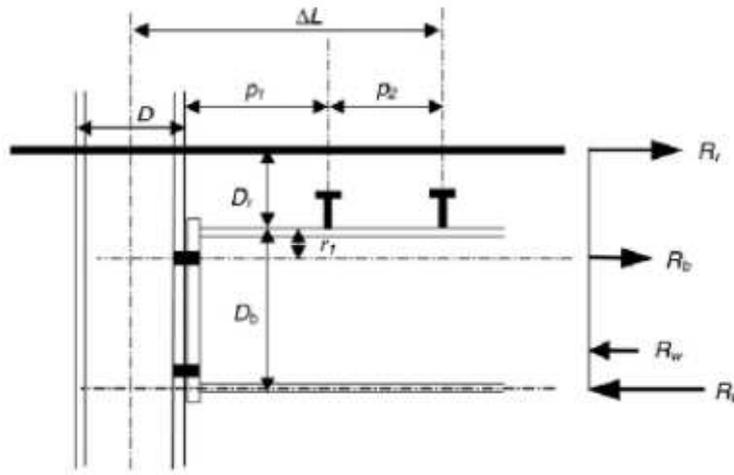


Figura 1.10 – Diagrama de forças e componentes da ligação mista (Fu e Lam, 2006).

Para o momento resistente da ligação, utilizão-se as equações (1.2) a (1.4), onde y_c corresponde a linha neutra.

$$M_{cc} = R_r \cdot (D_b + D_r - 0,5 \cdot t_f) + R_b \cdot (D_b - r_1 - 0,5 \cdot t_f) - R_w \cdot \frac{y_c}{2} \quad (1.2)$$

$$R_w = y_c \cdot t_w \cdot p_y \quad (1.3)$$

$$y_c = \frac{(R_r + R_b - R_f)}{t_w P_y} \quad (1.4)$$

1.1.6. Braconi et al. (2007)

Esse trabalho apresenta o estudo relativo ao comportamento e modelagem de ligações mistas viga-coluna de resistência parcial sob carregamentos cíclicos, sendo proposto um modelo refinado para prever a resposta monotônica inelástica de ligações, e comparado a testes realizados na Universidade de Pisa,

Itália, com complementação de um estudo paramétrico para ilustrar a capacidade e o comportamento das ligações examinadas.

Um modelo de componente foi desenvolvido para reproduzir a resposta observada de entrada dos subarranjos dos testes de amostras viga-coluna, incluindo-se o comportamento a flexão da viga e da coluna. No modelo, a ligação entre a placa de extremidade da viga e a mesa da coluna é representada pelo equivalente *T-stubs* localizado nas mesas superior e inferior da viga. O modelo para a ligação interior leva em conta a resposta do concreto em compressão, o painel da alma da coluna em cisalhamento, a parte superior do *T-stub* em compressão sob momento positivo ou em tração sob momento negativo, a parte inferior em tração sob momento positivo ou em compressão sob momento negativo, a laje de concreto em tração e os conectores de cisalhamento na viga sob momento positivo e momento negativo. Esse modelo foi comparado aos resultados obtidos em testes de ligações internas e externas.

O modelo é capaz de prever de forma satisfatória a rigidez inicial, a progressão suave, a capacidade máxima, a queda da resistência devido a fissuração da laje de concreto contra a coluna, bem como a resistência residual que pode ser mantida em deformação lateral grande.

Um limite paramétrico é apresentado para ilustrar adicionalmente o potencial do modelo proposto em práticas de projeto e dois casos foram examinados.

Dessa forma, e com os resultados alcançados pode-se observar que esse tipo de ligação apresenta bons resultados para o caso de cargas cíclicas. O comportamento de falha da laje de concreto contra a mesa da coluna foi alcançado prematuramente, comparado à metodologia do *Eurocode 8* para determinação do mecanismo de capacidade da transferência da força de compressão entre a laje de concreto e a coluna, devendo ser reavaliado. O modelo desenvolvido considerou a deformação plástica desenvolvida na placa de extremidade da viga / mesa da coluna bem como na zona do painel da coluna. O deslizamento longitudinal entre a laje de concreto e a viga foi incluído e a representação da fibra foi usada para representar a distribuição de tensões não uniformes e a fissuração progressiva para a laje de concreto contra a coluna. O modelo reproduz com precisão a resposta observada e a medição experimental para as duas configurações de ligações. Um estudo paramétrico limitado permitiu ilustrar a capacidade do modelo e examinar adicionalmente o comportamento da tipologia da ligação. O modelo previu com sucesso informações na demanda força-deformação imposta em cada componente da

ligação como uma função da força aplicada lateral ou deslocamento e, assim, se mostra uma ferramenta bem sucedida para a aplicação em projetos que consideram o dimensionamento do *Eurocode*. A Figura 1.11 apresenta a seção transversal dos modelos utilizados.

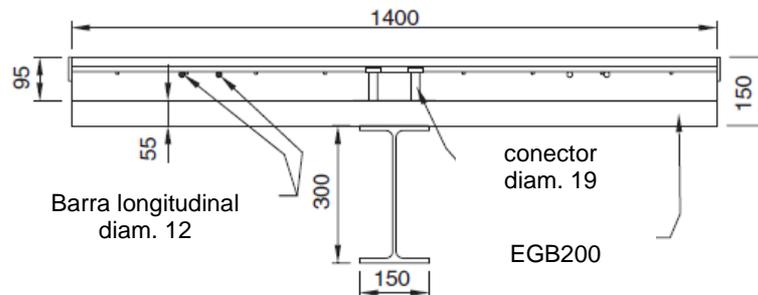


Figura 1.11 – Seção transversal da viga mista (Braconi et al., 2007).

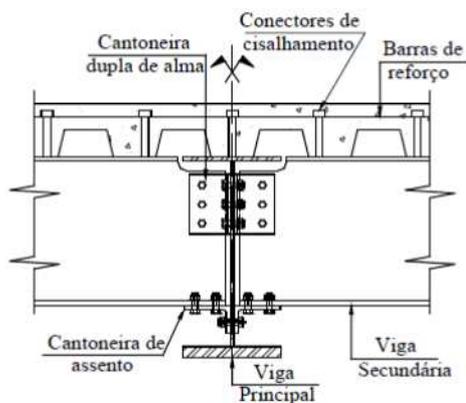
1.1.7. Oliveira (2007)

Oliveira (2007) apresentou em sua tese de doutorado estudo experimental e numérico para pisos mistos com ligações semirrígidas sob a ação de cargas de gravidade, considerando a verificação dos equilíbrios estática e dinâmica, e dos estados limites últimos e de serviço. A tipologia estudada de ligação consistia em cantoneira de assento e alma e armaduras na laje de concreto, com protótipos cruciformes. Mais uma tipologia foi testada, sendo um modelo viga-viga, que teve o objetivo de avaliar as características dinâmicas e o mecanismo de colapso plástico. A estrutura estudada é apresentada na Figura 1.12.

Dos trabalhos realizados, foram obtidas algumas conclusões:

- A rigidez inicial e a capacidade resistente apresentaram valores próximos aos teóricos, fato não ocorrido para a rotação, apesar de não invalidarem o resultado encontrado, por estarem dentro da margem de desvio aceitável.
- O comportamento de rotação da viga é influenciado pela fissuração da laje de concreto, justificando essas estruturas apresentarem ensaios mais flexíveis que quando comparados aos de ligações com placa de extremidade e cantoneiras de assento.
- Observou-se que a presença do trecho comprimido no vão da laje e da viga mista, conduz a curvaturas mais suaves nas regiões de momento negativo, atenuando o comportamento de flexo-tração, diminuindo a velocidade na

abertura das fissuras, contribuindo na rigidez inicial da ligação a parcela do concreto tracionado.



(a) esquema



(b) foto experimental

Figura 1.12 – Ligações mistas do tipo viga-viga (Oliveira, 2007).

1.1.8. Mairal (2010)

Mairal (2010) estudou o comportamento de vigas mistas de aço e concreto em perfis formados a frio, no que tange o estudo da ligação na região de momento negativo. Para tanto foi desenvolvido um estudo teórico e experimental, com foco na ligação mista e a resposta estrutural da região de momento fletor negativo, por meio da análise de dois protótipos cruciformes, conforme Figura 1.13, onde foi determinada a curva momento *versus* rotação, momento resistente, rigidez, capacidade de rotação e modos de falha. Dos estudos pode-se concluir que:

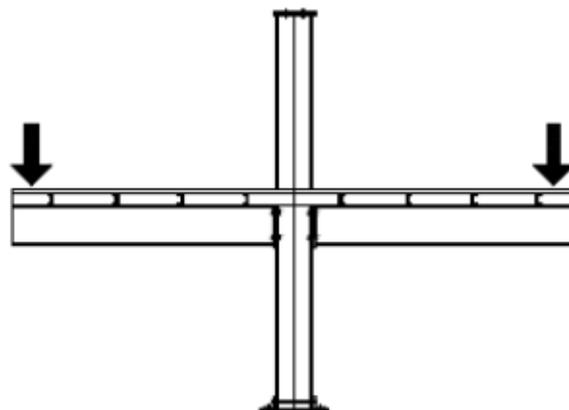


Figura 1.13 – Modelo experimental cruciforme (Mairal, 2010).

- A tipologia de ligação com cantoneiras de assento e de alma apresentou maior capacidade de rotação de ligação quando comparada com a ligação soldada.
- O modelo experimental foi comparado ao modelo adaptado proposto por Leon et al. (apresentado em Mairal, 2010), obtendo bons resultados.
- O momento resistente negativo da viga mista obtido experimentalmente apresentou um valor intermediário entre os valores teóricos obtidos pelos processos plástico e elástico.

1.1.9. Ramires (2010)

Ramires (2010), com a intenção de estudar as ligações semirrígidas mistas, implementou computacionalmente um sistema de análise e dimensionamento capaz de avaliar o comportamento estrutural das ligações a partir da informação das propriedades geométricas de uma ligação mista com placa de extremidade. Em complemento, desenvolveu um ensaio experimental visando estudar o caminho de transmissão de solicitações, realizados por meio de modelos de *pull out*, adaptados para a região de momentos negativos e região de fissuração da laje, obtendo dessa forma um ensaio capaz de produzir resultados para estudo das ligações semirrígidas mistas.

Como principais conclusões do trabalho, podem-se citar:

- O programa computacional utilizado para os cálculos (SRJ Tool) apresentou resultados satisfatórios, quando comparados com os valores teóricos.
- Foram desenvolvidos ensaios de *pull out* modificado, que apresentaram bons resultados, mesmo com problemas detectados durante os ensaios na resistência da solda entre os conectores de cisalhamento e mesas da viga.
- A execução de pré-ensaios auxiliaram a mitigação das falhas da montagem dos ensaios, que foram desenvolvidos com os melhoramentos necessários verificados durante os pré-ensaios.

Apesar das contribuições apresentadas pelo trabalho, principalmente no que diz respeito à forma de modelagem com a utilização de modelos de *pull out*, ocorreram desvios na execução dos ensaios, principalmente relacionados à dificuldade de execução da solda dos conectores de cisalhamento, que influenciaram os resultados pretendidos, e sua análise mais precisa.

1.1.10. Barros (2011)

Barros (2011), em sua dissertação de mestrado, analisou numericamente as ligações entre aço e pilar misto preenchido com concreto. A análise numérica utilizou os ensaios experimentais realizados por De Nardin (2004) para calibração.

O trabalho abordou o estudo de algumas tipologias de ligação viga-pilar misto preenchido com concreto. O objetivo principal foi desenvolver um modelo numérico que representasse dois modelos de ligações: ligação viga-pilar aparafusada com aderência entre os parafusos passantes e o núcleo de concreto (tipologia 1) e uma ligação viga-pilar soldada (tipologia 2). O estudo paramétrico foi desenvolvido após validação com os ensaios experimentais, tendo como objetivo entender a influência de alguns parâmetros no comportamento global da estrutura, sendo esses: a resistência à compressão do concreto, espessura do perfil tubular e perfil da viga. O estudo foi realizado por meio do comportamento da curva momento *versus* rotação, e os resultados obtidos foram aceitáveis, mesmo com as simplificações realizadas.

Como principais conclusões do trabalho, citam-se:

- Os resultados obtidos para a tipologia 1 foram satisfatórios, apesar de não ter sido considerado a força de protensão dos parafusos, entre outros aspectos. As diferenças encontradas do numérico para o experimental podem estar relacionadas a instabilidade e perturbações ocorridas durante o ensaio, que não foram incorporadas ao modelo numérico.
- Do estudo da tipologia 1 foi observado que a resistência do concreto e a espessura do perfil tubular não influenciaram de forma significativa no comportamento da estrutura, diferente do que ocorreu quando analisada a influência da variação do perfil da viga.
- Para a tipologia 3, a dificuldade encontrada para o desenvolvimento do modelo numérico foi a representação da solda. Algumas simplificações também foram inseridas para este modelo, como feito para a tipologia 1.
- Do estudo paramétrico observou-se que houve mudança para todas as variações realizadas, com maior relevância para a mudança do perfil da viga, estando o comportamento representado como ligação flexível.
- Os modelos numéricos conseguiram representar o comportamento dos ensaios experimentais, apesar das simplificações.

1.1.11. Piluso et al. (2012)

Piluso et al. estudaram um modelo mecânico para avaliar as ligações mistas sob momento fletor positivo e negativo, abordando as diferentes tipologias de ligações mistas semirrígidas, o estudo da extensão da zona comprimida foi avaliada, sendo proposto um processo alternativo em relação a codificação, não sendo incluído qualquer suposição preliminar sobre a localização do centro de compressão. Os resultados encontrados foram comparados aos testes experimentais.

De acordo com esses autores, o *Eurocode 4* sugere um procedimento para caracterizar o comportamento de ligações sujeitas a momento fletor positivo, com algumas indicações no *Eurocode 8*, anexo C, para o caso de cargas sísmicas. Esse último apresenta alguns possíveis mecanismos de colapso, dependendo do local da ligação (externa ou interna), presença ou não do concreto entre as mesas do pilar, entre outros. Porém, para sua aplicação, são impostos alguns limites: superior para a área da armadura longitudinal a ser localizado na largura efetiva da laje para evitar deformação prematura da peça de aço; inferior para a área de reforço transversal em frente da coluna, para evitar o esmagamento prematura da laje de concreto.

É desenvolvido um modelo mecânico para ligações mistas de cantoneira de topo e assento e de placa de extremidade submetidos tanto por momento fletor positivo como negativo, baseado no método das componentes e incorpora o efeito da laje (concreto e armadura de aço), a deformação da zona do painel e sua interação com a ligação de aço. Em seguida, o procedimento foi comparado com o sugerido pelo *Eurocode 4* e os testes experimentais, tendo bons resultados.

Os mecanismos de carga de transferência de ligações mistas viga-coluna submetidos a momento positivo são diferentes daquelas das ligações sujeitas a momento negativo, principalmente porque a laje de concreto é submetida a compressão. Nesse caso, as linhas superiores dos parafusos contribuem essencialmente para a resistência à tração e o braço de alavanca entre as forças de tensão e compressão é menor quando comparado com a mesma ligação mista sob momento negativo, porque o centro de compressão é regido principalmente pela laje de concreto. A fim de estender a abordagem de componentes e de prever todo o comportamento rotacional de ligações mistas semirrígidas, como as ligações de cantoneira de topo e assento e de placa de

extremidade estendidos submetidos a momento positivo, um processo gradual semelhante ao adotado para as ligações sob momento negativo foi utilizado e as seguintes suposições admitidas: a localização do centro de compressão não é preliminarmente assumida, mas tem que ser derivado de equilíbrio interno entre os componentes de tração e compressão; as mesmas premissas adotadas para ligações sob momento negativo foram admitidas a respeito do deslizamento dos parafusos, as linhas de parafusos e conectores de cisalhamento; a laje de concreto em compressão é modelado por meio de uma mola extensional cuja lei constitutiva é derivado a partir da lei constitutiva tensão-deformação do concreto.

Os testes experimentais comparados ao modelo proposto, no caso de ligação com placa de extremidade, mostraram uma bom grau de precisão do modelo, tanto para a rigidez quanto para resistência, apesar das suposições indicadas.

1.1.12. Pisarek (2012)

Pisarek (2012) apresentou em seu artigo trabalho relacionado ao modelo mecânico de ligações mistas em aço-concreto sob ação de solicitações como vento, terremotos ou ações acidentais, que geram momento fletor positivo sob a estrutura. Para tanto foi proposto um modelo mecânico baseado no método das componentes com o objetivo de avaliar as características da ligação mista estudada.

Observou-se então que devido a eventos acidentais, como foi o caso da aplicação dos ensaios realizados, onde são conferidas cargas de compressão sobre a laje, o momento fletor positivo na ligação pode também ocorrer. Então a laje estará em compressão e a ligação de aço na zona de tração, conforme Figura 1.14.

Observa-se que em ligações mistas sujeitas a momento positivo as seguintes componentes devem ser incluídas: alma da coluna em tração (cwt), alma da coluna em compressão (cwc), alma da coluna em cisalhamento (cws), mesa da coluna em flexão (cft), placa de extremidade em flexão (ept), parafusos em tração (bt), alma da viga em tração (bwt), laje de concreto em compressão (csc) e conectores de cisalhamento sob compressão (st/c).

Desta forma, apesar das ligações de estruturas mistas aço-concreto serem projetadas para condição de momento fletor negativo, em algumas situações, essas ligações poderão transferir momento fletor positivo, que devem considerar

as questões relativas a mudança da direção do momento, as forças devido aos efeitos de bielas e tirantes e o efeito de alavanca. Para representar essas questões foi apresentado um modelo analítico no artigo, onde é possível incluir novas componentes da ligação, tais como o piso da laje de concreto em compressão e a influência do histórico de carregamento.

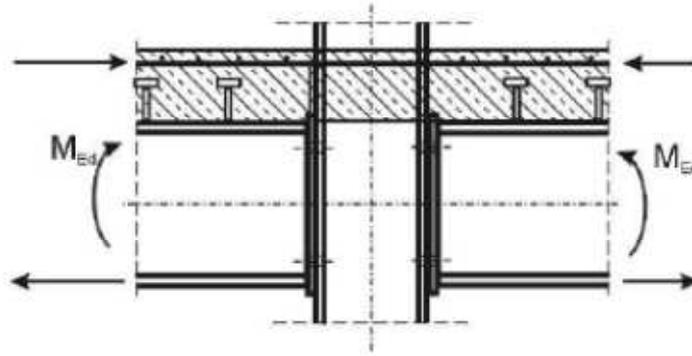


Figura 1.14 – Ligação viga-coluna em placa de extremidade sob momento fletor positivo.

1.1.13. Higashiyama et al. (2013)

O trabalho apresentado por Higashiyama et al. (2013) buscou avaliar a resistência à fadiga de um conector de cisalhamento tipo *stud*, sob a ação da força de cisalhamento rotacional, cujo processo de solda sofreu alterações para melhorias.

A comparação entre os *studs* com cabeça soldadas de forma convencional e os propostos no trabalho são apresentados na Figura 1.15. Para a ponteira de soldagem do lado direito na Figura 1.15, o fim do castelão na parte inferior está fechada para permitir que o gás de alta temperatura tenha o bico para cima. As quatro saliências na borda superior do arco do metal da solda funciona como um guia para o alinhamento de pino com cabeça e também proporciona uma passagem para o bico de gás a alta temperatura. No lado inferior do arco do metal de solda, o sulco circunferencial é formado para armazenar mais metal fundido em torno da raiz do pino.



Figura 1.15 – Comparação entre os *studs* soldados de forma convencional e melhorados (adaptado de Higashiyama et al., 2013).

1.2. Motivação

Com os vários estudos realizados até o momento sobre o assunto, pode-se observar que ainda existem questões a serem verificadas, no que diz respeito ao dimensionamento das ligações mistas semirrígidas. Experimental e numericamente, o auxílio de ferramentas computacionais em conjunto com a realização de ensaios experimentais auxiliam no desenvolvimento de novas técnicas sobre as expressões já utilizadas para os cálculos das ligações. Desta forma, é possível adotar novos modelos para estudo de problemas de engenharia civil, possibilitando cálculos mais precisos e estruturas mais leves quando comparadas aos cálculos convencionais, gerando assim estruturas mais confiáveis, com custos reduzidos.

Numerosas pesquisas de construção mista têm sido realizadas no mundo todo (Ramires, 2010), porém, são poucas relacionadas à resposta estrutural da

região próxima aos conectores de cisalhamento. Nessa região, as fissuras do concreto geradas pelas tensões de tração, transversais às barras de reforço em aço, reduzem a aderência entre os materiais, e conseqüentemente, a rigidez da ligação.

Com o intuito de contribuir com o estudo e o melhoramento das premissas existentes para o dimensionamento de ligações mistas será desenvolvido este trabalho, por meio da realização de ensaio experimental e a comparação dos dados obtidos com as fórmulas existentes, tendo como principal abordagem a barra de armadura e sua contribuição para o método das componentes, estudando-se a parcela mista da ligação semirrígida, e os conectores de cisalhamento e o estudo da solda de ligação.

O modelo numérico desenvolvido para o estudo da solda da ligação permitirá o estudo das características e configurações, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com os ensaios experimentais.

1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho será estudar o comportamento estrutural de ligações semirrígidas em estruturas mistas, utilizando como premissa de dimensionamento o apresentado no *Eurocode 3* (método das componentes) e *Eurocode 4*, bem como resultados de trabalhos anteriores sobre o assunto, comparando-os com os ensaios e modelo numérico desenvolvido. Dessa forma, será possível avaliar a influência dos elementos incorporados pela parcela mista da ligação, como é o caso da barra de armadura, no cálculo das ligações mistas semirrígidas.

Para tanto, o trabalho será dividido em duas análises: experimental e analítica, relacionadas a um grupo, baseado nos testes apresentados na tese de Ramires (2010), acrescido de uma nova série, possibilitando a análise e confirmação dos dados obtidos naquele evento. Para o estudo da influência da solda sobre os conectores, ainda é desenvolvido uma série de ensaios com apenas este elemento, possibilitando a análise direta do comportamento da componente. Os modelos utilizados serão apresentados nos capítulos posteriores.

Os modelos experimentais desenvolvidos, para a primeira fase do trabalho, serão realizados através do método de *pull out*, cuja configuração foi proposta para o estudo do comportamento estrutural da região de momentos negativos,

com a laje de concreto e a armadura submetidas à tração, desenvolvido por Ramires (2010), possibilitando a identificação do comportamento destes dois elementos nas ligações da estrutura.

O objetivo da investigação proposta é determinar o caminho e a distribuição das forças nos componentes estruturais do conjunto aço-concreto, para as ligações viga-coluna semirrígidas, com foco na barra de armadura, contribuindo para o estudo das estruturas mistas, através de uma solução mais eficiente para o sistema.

1.4. Contribuições

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica, para analisar os estudos que vêm sendo desenvolvidos para ligações semirrígidas em estruturas mistas. Esta tese será dividida em seis capítulos. No próximo capítulo serão apresentados os princípios básicos do método das componentes, para ligações semirrígidas, apresentado no *Eurocode 3* e no *Eurocode 4*.

Posteriormente, serão apresentadas descrições breves para o modelo de ensaios de *pull out*, com o objetivo de verificar o desempenho da armadura, do concreto da laje e dos conectores de cisalhamento, elementos esses componentes da área tracionada do concreto. Será mostrado o modelo desenvolvido para o estudo da solda dos conectores. Esses resultados possibilitam a análise do comportamento da ligação e a verificação de suas componentes.

Desta forma, visa-se contribuir com a análise da região referente a parcela mista, especificamente na contribuição do elemento da barra de armadura para as ligações mistas, por meio dos modelos desenvolvidos, propiciando uma análise das fórmulas das normas atualmente utilizadas.

1.5. Descrição do escopo

É prevista a composição da tese em seis capítulos, que serão desenvolvidos conforme descrições abaixo.

O primeiro capítulo contém uma breve descrição do tema a ser estudado, revisão bibliográfica, motivação, objetivos e as contribuições previstas.

O capítulo dois apresenta uma visão geral das ligações semirrígidas mistas, conforme preconizado pelo *Eurocode 3*, a metodologia de

dimensionamento por meio do método das componentes. O terceiro capítulo apresentará a caracterização dos ensaios a serem desenvolvidos, relativos aos ensaios *pull out* e os estudo sobre a solda dos conectores, modelos utilizados e a forma de execução.

O capítulo quatro mostra os resultados obtidos para os ensaios realizados e a análise destes resultados. No capítulo cinco é apresentado a análise numérica do estudo dos conectores.

As considerações finais sobre os temas abordados no decorrer da tese são os assuntos do último capítulo, de número seis, assim como as contribuições confirmadas do trabalho, principais conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.