

2 Ligações mistas viga-pilar

2.1. Considerações gerais

Este capítulo apresenta os aspectos mais importantes relacionados às ligações mistas. Uma ligação mista pode ser definida como uma junção entre elementos onde um ou mais destes é uma seção mista (usualmente a viga) e a armadura ligada a estes elementos tem função de contribuir com a resistência, a rigidez e a ductilidade da ligação (NETHERCOT, 2004).

As ligações mistas são estudadas como semirrígidas desde os anos 80. Ligações parcialmente restringidas, referidas como “*PR connections*” nas especificações LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) e Tipo 3 nas especificações ASD (*Allowable Stress Design*), são permitidas pelo AISC desde 1949 (LEON et al., 1996).

Como vantagem deste sistema tem-se uma melhor distribuição dos momentos fletores e isto proporciona uma minimização dos custos e uma maior segurança no projeto, além de ganhos no que se diz respeito à rigidez e capacidade resistente. Pode-se citar também que para as ligações semirrígidas, os detalhes de fabricação não são complicados e as soldas são eliminadas, resultando em construções mais rápidas e simples quando comparadas às ligações rígidas. Outras vantagens, segundo Couchman (1998), são:

- Redução na altura das vigas;
- Redução no peso das vigas;
- Controle da fissuração nas lajes na região próxima ao pilar;
- Comportamento melhorado para cargas de serviço.

Como desvantagem tem-se as características momento-rotação não linear e as dificuldades na análise quando comparadas aos sistemas convencionais (ligações rígidas e ligações rotuladas). Outro ponto negativo é que a rigidez varia

ao longo da viga, pois nas regiões de momento negativo o concreto estará fissurado, resultando-se em uma menor rigidez nesta região.

Além disso, a definição de ligações semirrígidas em projeto exige uma mudança no que se diz respeito à ordem de pensamento da ligação, ou seja, muitos projetistas calculam as estruturas definindo-se inicialmente apenas a condição da ligação, se rígida ou simples. Ao pensar-se em ligação semirrígida é necessário definir a ligação antecipadamente ao projeto para assim saber suas características de transferência de momento, ductilidade, etc.

O verdadeiro comportamento das ligações é tradicionalmente desprezado no projeto das estruturas de aço. Na realidade, a análise das estruturas metálicas é normalmente realizada assumindo-se que as ligações cumprem a condição ideal, seja como rígida ou flexível. Desta maneira, os cálculos são um pouco mais simples, mas o modelo estrutural não é capaz de refletir o comportamento real da estrutura (FAELLA et al., 2000).

Para exemplificar o citado acima, a Figura 2.1 representa os gráficos de momento fletor, considerando-se carregamento uniformemente distribuído (q), para cada um dos tipos de ligação: flexível, rígida e semirrígida. O pórtico adotado refere-se ao do presente estudo, no qual as ligações de extremidade são rotuladas e, para efeito de comparação variou-se as ligações intermediárias para atender a cada tipo citado. Pelos gráficos percebe-se a melhor distribuição de momentos fletores positivos e negativos citada anteriormente.

A melhor forma de se obter o real comportamento destas ligações é através de ensaios experimentais realizados em laboratório. Entretanto, o elevado custo destes ensaios e a dificuldade de medição dos resultados experimentais, faz com que esta não seja uma técnica adotada correntemente, limitando-se muitas vezes, a propósitos de investigação (LIMA, 2003).

Os estudos experimentais de ligações intermediárias são geralmente feitos através de modelos cruciformes, nos quais há um pilar central representando um pilar intermediário do pórtico e duas vigas ligadas a este. Este tipo de modelo está representado na Figura 2.2. Já para as ligações de extremidade são utilizados os modelos chamados “T”.

Nos próximos itens são apresentadas as classificações das construções e ligações e, posteriormente, o foco deste trabalho será uma ligação semirrígida

mista constituída de dupla cantoneira de alma, cantoneira de assento e as barras de aço presentes na laje de concreto.

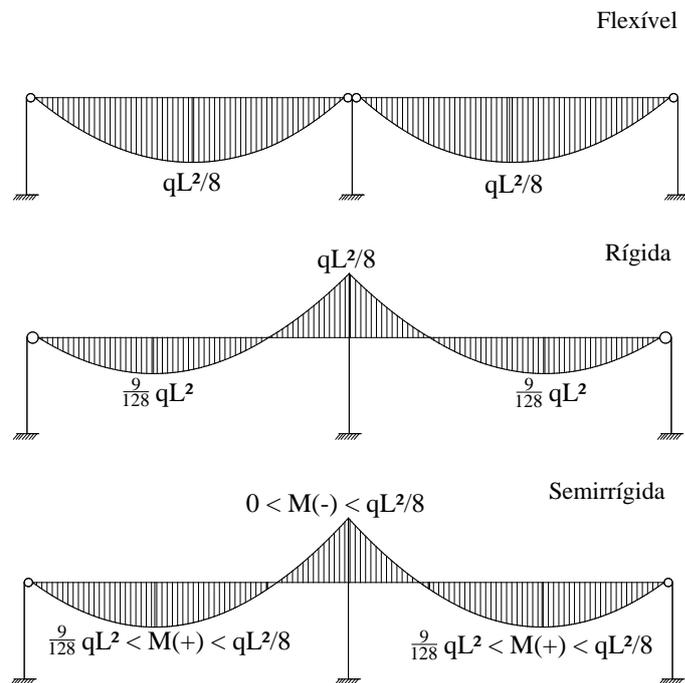


Figura 2.1 - gráficos de momento fletor para ligações flexíveis, rígidas e semirrígidas

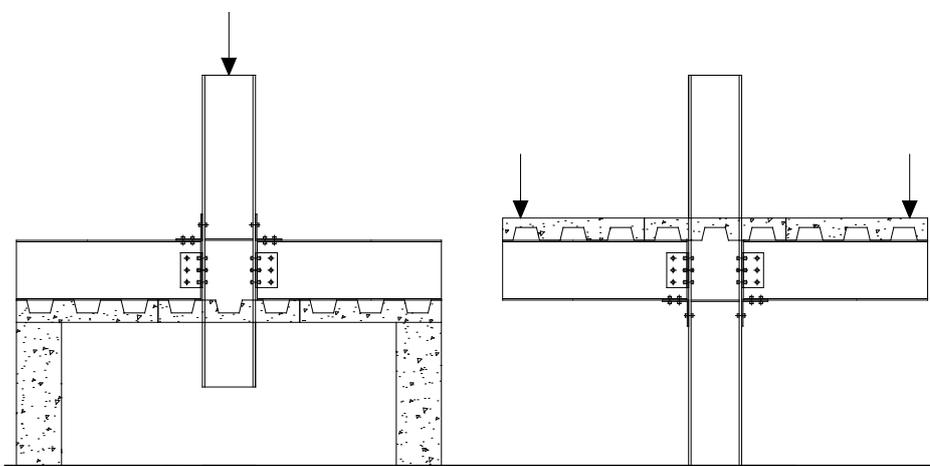


Figura 2.2 - Modelos cruciformes para análise experimental de ligações intermediárias

2.2. Classificação das construções segundo o AISC (American Institute of Steel Construction)

Para atenderem-se as necessidades específicas do projeto, as construções são classificadas de acordo com as características dos pórticos utilizados.

Anteriormente, quando nas especificações ASD (*Allowable Stress Design*), AISC/ASD (1978), as construções eram classificadas em Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3. As construções do Tipo 1 englobavam os pórticos rígidos, do Tipo 2 os pórticos simples e do Tipo 3 os pórticos semirrígidos. Após a mudança para as especificações LRFD (*Load and Resistance Factor Design*), AISC/LRFD (1986), a classificação não se alterou, porém se reorganizou, ou seja, as construções dos tipos 2 e 3 juntaram-se em uma categoria chamada “Tipo PR” – *partially restrained* (parcialmente restringidas) e as do Tipo 1 são agora chamadas “Tipo FR” – *fully restrained* (completamente restringidas).

2.3. Classificação das Ligações

Neste item serão apresentadas as classificações adotadas pelo AISC/LRFD (2010), o Eurocode 3 (2005) e a ABNT NBR 8800:2008.

2.3.1. Classificação das ligações segundo o AISC

As ligações podem ser classificadas em relação à rigidez ou à resistência, a depender do tipo de análise que será utilizada para a estrutura. As análises com suas classificações associadas são:

- Análise global elástica: classificação quanto à rigidez;
- Análise global plástica: classificação quanto à resistência;
- Análise elastoplástica: classificações quanto à rigidez e quanto à resistência.

O AISC/LFRD (2010), com base na rigidez, divide as ligações em dois tipos: ligações simples e ligações de resistência. Ligações simples são definidas como aquelas que transmitem um momento insignificante e são capazes de rotacionar suficientemente para acomodar as rotações previstas em projeto. De acordo com Leon et al., 1996, uma ligação rotulada é aquela que é capaz de transmitir menos de 20% do momento de plastificação da viga a uma rotação de 20 mrad.

As ligações de resistência são aquelas que, como o próprio nome sugere, transmitem momento através da ligação, e são subdivididas em:

- Ligações completamente restringidas, chamadas também de ligações FR (*fully-restrained*): ligações que transmitem momento com uma rotação insignificante entre os elementos ligados. Estas devem ter rigidez e resistência suficientes para manter o ângulo entre os elementos nos estados limites.

- Ligações parcialmente restringidas, chamadas também de ligações PR (*partially restrained*): também transmitem momento, mas a rotação entre os elementos ligados não é desprezível.

As ligações ainda podem ser classificadas pelo AISC/LRFD (2010), segundo a capacidade resistente, em dois casos:

- De resistência parcial, chamadas PS (*partial strength*): quando a resistência à flexão da ligação é menor que a de plastificação da viga. Neste caso, a ligação é determinante para a formação da rótula plástica e deve ter capacidade de rotação suficiente para permitir a redistribuição dos momentos após a plastificação;

- De resistência total, chamadas FS (*full strength*): quando a resistência à flexão da ligação é igual ou superior à de plastificação da viga. A Figura 2.3 apresenta uma esquematização das classificações citadas de acordo com uma curva momento-rotação tomada como exemplo.

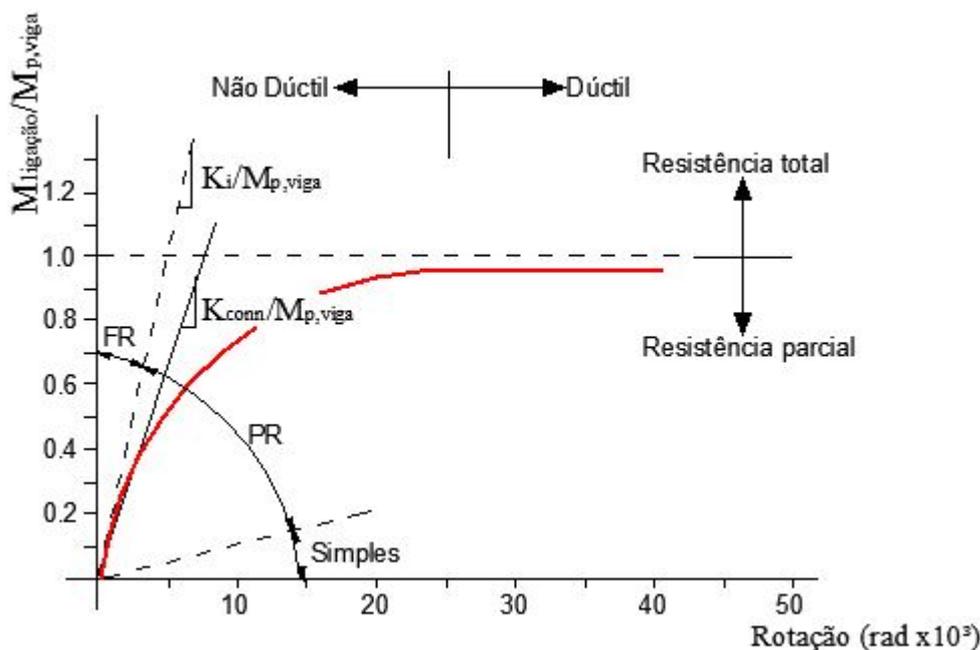


Figura 2.3 – Limites de classificação representados na curva momento-rotação, adaptada de Leon (1999)

Quanto à rigidez, o AISC/2010 utiliza a rigidez de serviço, K_{serv} , (correspondente à rotação de 2,5 mrad) para classificar as ligações, assim, quando:

- $K_{serv} \geq 20EI_b/L_b$ a ligação é do tipo FR;
- $K_{serv} \leq 2EI_b/L_b$ a ligação é dita simples;
- e para K_{serv} intermediária aos valores acima, a ligação é dita PR.

Onde:

I_b : momento de inércia da viga;

L_b : comprimento da viga.

Como muitas ligações do tipo PR não exibem patamar na relação M- θ mesmo em grandes rotações, a resistência da ligação pode ser definida para uma rotação de 20 mrad. A capacidade rotacional da ligação (θ_u) deve ser definida quando o momento na ligação diminuir 80% do seu momento resistente ou quando a ligação atingir 30 mrad. (TRISTÃO, 2006)

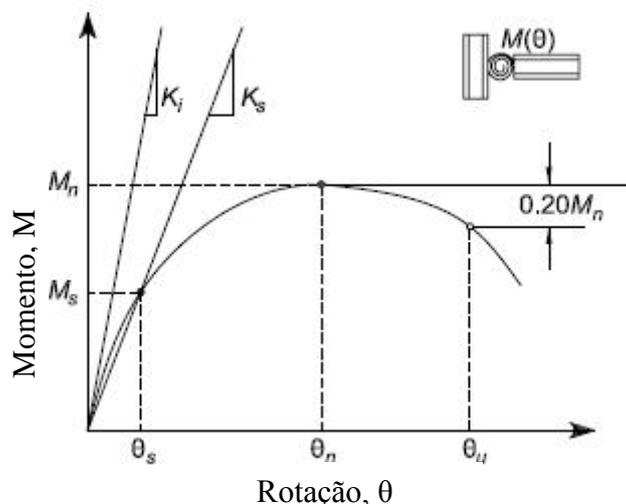


Figura 2.4 - Definição da capacidade de rotação, θ_u , da ligação segundo a revisão do AISC/LRFD (2005)

A Tabela 2.1, adaptada de CHEN et al. (2011), resume a classificação segundo o AISC (2010).

Leon (1999) classifica ainda as ligações em dúcteis ou frágeis. Em geral uma ligação pode ser classificada como dúctil quando esta possuir capacidade de rotação superior a 20 mrad ou, em áreas com riscos sísmicos, maior que 30 mrad.

Tabela 2.1 - Classificação das ligações segundo o AISC (adaptada de CHEN et al. 2011)

Ligação		Rigidez	Resistência	Ductilidade
Simples		$K_{serv} \cdot L_b / EI_b \leq 2$	Resiste às forças solicitantes de cisalhamento sob estado limite último e $M \leq 0,02M_p$ para 20 mrad	Atende a rotação necessária para estado limite último ou $\theta_u = 30$ mrad
PR		$2 < K_{serv} \cdot L_b / EI_b < 20$	Resiste às forças solicitantes combinadas: flexão e cisalhamento sob estado limite último	Atende a rotação necessária para estado limite último ou $\theta_u = 30$ mrad
FR	De resistência parcial	$K_{serv} \cdot L_b / EI_b \geq 20$	Resiste às forças solicitantes combinadas: flexão e cisalhamento sob estado limite último	Atende a rotação necessária para estado limite último ou $\theta_u = 30$ mrad
	De resistência total		-	

2.3.2. Classificação das ligações segundo o Eurocode

O Eurocode 4 (2002) estabelece que uma ligação mista é aquela entre um elemento misto e algum outro elemento no qual a armadura tem função de contribuir para a resistência da ligação.

Quanto à classificação das ligações, o Eurocode 3 parte 1.8 as classifica de acordo com a rigidez e a resistência.

No que se refere à rigidez a ligação pode ser classificada em rígida, semirrígida ou flexível. Para enquadrá-la em um destes casos, o Eurocode 3 compara a rigidez inicial da ligação ($S_{j,ini}$) com um dos limites que seguem:

- Rígida: $S_{j,ini} \geq 8EI_b/L_b$ (para pórticos contraventados) e $S_{j,ini} \geq 25EI_b/L_b$ (para pórticos não contraventados)
- Semirrígida: $0,5EI_b/L_b < S_{j,ini} < 8EI_b/L_b$
- Rotulada: $S_{j,ini} < 0,5EI_b/L_b$

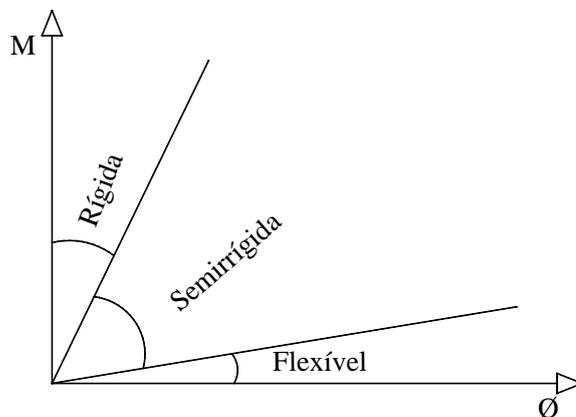


Figura 2.5 - Classificação do Eurocode segundo à rigidez

Quanto à resistência, a ligação pode ser classificada como rotulada, de resistência parcial ou de resistência total. Para ser classificada como rotulada, a ligação deve ter momento resistente igual ou menor a 25% do momento de plastificação da viga conectada. No caso em que o momento fletor resistente é maior ou igual ao da viga, a ligação é dita de resistência total e para o caso intermediário aos citados acima, de resistência parcial.

Com a junção das duas classificações citadas acima, a ligação pode ser dita simples, contínua ou semicontínua, de acordo com a Tabela 2.2. A tabela também mostra o tipo de análise indicada para cada situação.

Tabela 2.2 - Classificação das ligações segundo o EC3

Análise global		Classificação da ligação	
Elástica	Flexível	Rígida	Semirrígida
Rígido-plástica	Flexível	Resistência total	Resistência parcial
Elasto-plástica	Flexível	Rígida e resistência total	Rígida e resistência parcial Semirrígida e resistência total Semirrígida e resistência parcial
Tipo de ligação	Simple	Contínua	Semi-contínua

2.3.3. Classificação das ligações segundo a NBR 8800:2008

A NBR 8800:2008 classifica as ligações quanto à rigidez, em rotuladas, rígidas e semirrígidas. Os limites para classifica-las em cada caso citado são:

- Rotulada: $S_i \leq 0,5EI_v/L_v$;
- Rígida: $S_i \geq 25EI_v/L_v$, neste caso há uma condição a ser atendida para que se possa utilizar esta equação, $K_v / K_p \geq 0,10$, caso este limite não seja atendido a ligação deve ser considerada semirrígida;
- Semirrígida: quando a rigidez é intermediária aos casos citados acima.

Onde:

S_i : rigidez inicial (pode ser considerada para 2/3 do momento resistente da ligação ou calculada precisamente de acordo com o Eurocode 3 parte 1.8 ou com base em resultados experimentais);

I_v : momento de inércia da viga;

L_v : comprimento da viga;

I_p : momento de inércia do pilar;

L_p : comprimento do pilar;

K_v : valor médio de I_v/L_v para todas as vigas no topo do andar;

K_p : valor médio de I_p/L_p , para todos os pilares do andar.

2.4. Ligações semirrígidas mistas

A ligação é dita mista quando a laje participa da transmissão de momento fletor e é usada em vigas mistas contínuas e semicontínuas. Para este trabalho, o foco será uma viga mista semicontínua, na qual uma ligação semirrígida é utilizada com a finalidade de obter-se maior rigidez e capacidade resistente.

Na região do apoio de vigas mistas, a colocação de barras de aço, dando-se continuidade à viga na região da ligação, pode aumentar substancialmente a rigidez e a resistência da ligação e absorver os esforços solicitantes devidos ao vento atuante na estrutura, com pouco trabalho adicional (LEON et al., 1996).

As ligações semirrígidas mistas são ditas ligações de resistência parcial (PS), pois não têm a mesma resistência à flexão da viga ligada a ela e, ainda,

ligações parcialmente restringidas (PR), pertencentes a uma categoria classificada por Leon et al. (1996) como PR-CC (*partially restrained composite connections*).

Leon (1990) classifica as ligações mistas semirrígidas em ligações dos tipos I, II, III e IV. As ligações do tipo I correspondem às ligações que possuem cantoneira de assento, dupla cantoneira de alma e barras de aço na laje de concreto. As do tipo II consistem de uma chapa de assento soldada, cantoneiras de alma e barras de aço na laje de concreto. Ligações do tipo III são semelhantes às do tipo I, excluindo-se as cantoneiras de alma. Por fim, as ligações do tipo IV possuem dupla cantoneira de alma parafusada e barras de aço na laje de concreto, sem as cantoneiras de assento.

As ligações dos tipos I, II, III e IV estão representadas na Figura 2.6.

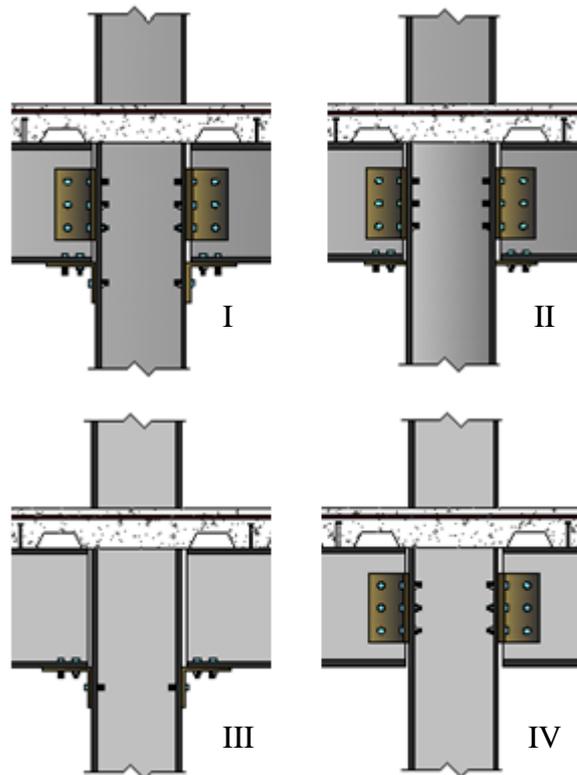


Figura 2.6 - Ligações semirrígidas dos tipos I, II, III e IV

Para o presente estudo as ligações de interesse são as do tipo I, apresentadas anteriormente, com algumas variações: o conector usado será o “*Perfobond Rib*” e as armaduras serão ancoradas com o auxílio deste. O caso estudado está apresentado na Figura 2.7.

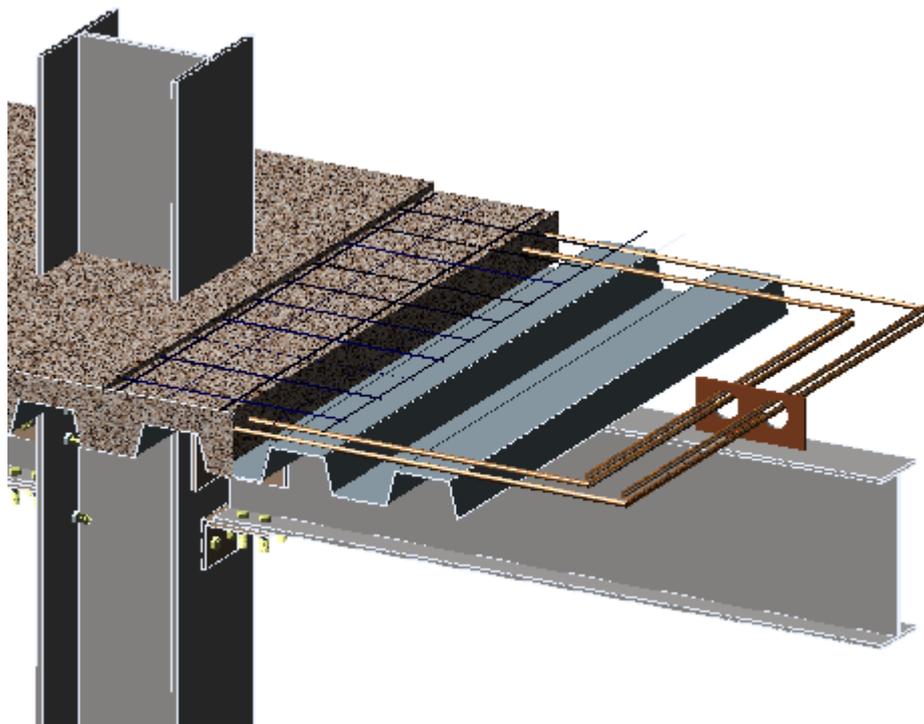


Figura 2.7 - Ligação semirrígida mista proposta

2.4.1. Ligações semirrígidas mistas do Tipo I

Como já foi dito no item anterior, ligações do Tipo I são ligações mistas que possuem ligação metálica, composta por duas cantoneiras de alma e cantoneira de assento, trabalhando em conjunto com o aço presente na laje de concreto.

Para o projeto destas ligações é assumido que o aço na laje entrará em escoamento primeiro, quando a ligação estiver sob momento fletor negativo, ou seja, parte-se do pressuposto que a ligação de assento tem maior capacidade resistente do que as barras de aço.

O concreto, apesar de contribuir significativamente no início, não é considerado para a rigidez, pois após ocorrer sua fissuração (devido às cargas de construção, acidentais...) há um decréscimo considerável no momento de inércia.

Para o projeto destas ligações, escolhe-se inicialmente uma viga de aço com base nas cargas iniciais (antes da cura do concreto), já que inicialmente a

viga de aço trabalha isoladamente. As cargas iniciais são, em geral: cargas de construção, peso próprio da viga, peso da laje.

Para definir-se qual ligação será usada, uma indicação presente em Leon et al. (1996), é que a resistência última à flexão da ligação seja por volta de 75% do momento de plastificação da viga de aço. Assim, como ponto de partida, encontra-se a quantidade de barras de aço na laje através da relação entre o momento calculado (pela porcentagem do momento de plastificação da viga de aço) e a multiplicação entre o braço de alavanca e a tensão de escoamento do aço. O braço de alavanca (y) é a soma entre a distância do centroide da armadura ao topo do perfil de aço e a altura do perfil de aço.

Quanto aos modos de ruptura da ligação, alguns possíveis são:

- Flambagem ou escoamento dos elementos em compressão;
- Deslizamento e corte dos parafusos;
- Cisalhamento da ligação de alma.

Segundo Leon (1990), a flambagem do elemento em compressão é improvável devido ao número de parafusos, da relativamente baixa tensão no componente quando as barras de aço na laje começam a escoar e as curtas distâncias que os mesmos vencem. Como para o projeto é assumido que as barras de aço escoam primeiro, o escoamento das cantoneiras de assento é excluído das opções.

2.4.2. Largura efetiva da laje para regiões de momento negativo (NBR 8800:2008)

A largura efetiva da laje define quais barras de aço participarão da resistência a momento fletor negativo da ligação mista.

Segundo a NBR 8800: 2008, em trechos onde há momento fletor negativo, a largura contribuinte da laje de concreto, de cada lado da linha de centro, para a viga mista é adotada igual ao menor entre os valores:

- $1/8$ do vão da viga mista (o vão, neste caso, é adotado como a distância entre pontos de momento nulo, segundo Figura 2.8);
- $1/2$ da distância da linha de centro da viga à linha de centro da viga adjacente.

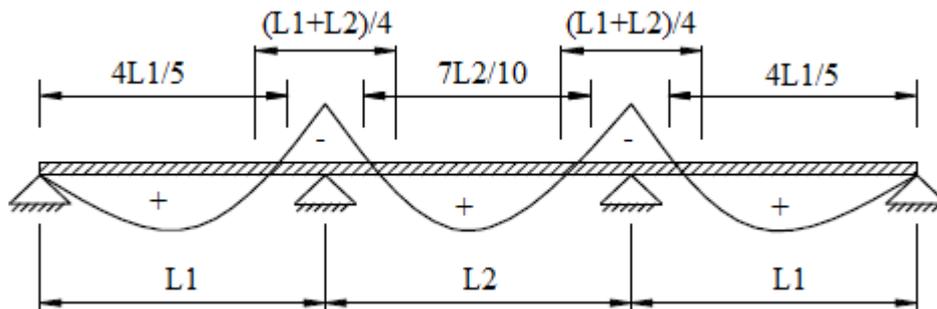


Figura 2.8 – Distância simplificada entre os pontos de momento nulo em uma viga contínua e semicontínua, NBR 8800: 2008

2.4.3. Conectores de cisalhamento

Os conectores de cisalhamento são responsáveis pela transferência dos esforços entre a laje de concreto e a viga de aço. Os conectores mais utilizados na atualidade são os de pino com cabeça, chamados “*stud bolt*”. Neste estudo, porém, será utilizado o conector do tipo “*Perfobond Rib*” que possui a vantagem, quando comparados aos citados anteriormente, de utilizar equipamentos mais simples para a sua aplicação. Este tipo de conector foi utilizado inicialmente em pontes e depois adaptado para obras de edificações.

Quando os conectores de cisalhamento são capazes de resistir a todo o esforço cisalhante solicitante, diz-se que a interação entre o conector e a viga é total. Caso contrário, a interação é classificada como parcial.

Para as ligações semirrígidas, a interação parcial só pode ser adotada nos casos em que a ligação não contribui para a resistência do sistema às cargas laterais (“*braced frames*”) e o mínimo de interação permitido neste caso, segundo Leon (1999), é de 50%.

2.4.3.1. Conectores de cisalhamento do tipo “*Perfobond rib*”

Os conectores de cisalhamento do tipo “*Perfobond Rib*” são confeccionados a partir de uma chapa com furos, nos quais passam armaduras transversais. Um detalhe da geometria de um “*Perfobond*” com dois furos é apresentado na Figura 2.9.

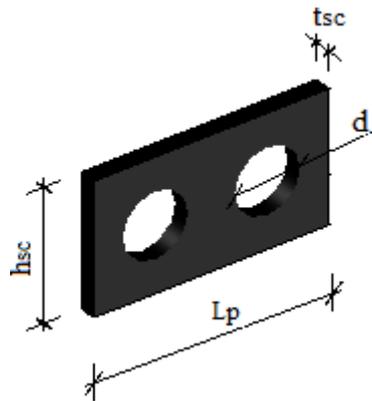


Figura 2.9 – Representação do conector tipo “Perfobond Rib”

O conector “Perfobond” possui contribuição da laje de concreto, da armadura transversal e dos cilindros de concreto para a sua resistência. Oguejiofor & Hosain (1997) propõem a Equação 2.1 para o cálculo da resistência a cisalhamento do conector “perfobond”.

$$q_u = 4,5 \cdot h_{sc} \cdot t_{sc} \cdot f'_c + 0,91 A_{tr} \cdot f_y + 3,31 \cdot n \cdot d^2 \sqrt{f'_c} \quad (2.1)$$

onde:

q_u : resistência nominal ao cisalhamento do conector “Perfobond Rib” (N);

h_{sc} : altura do conector (mm);

t_{sc} : espessura do conector (mm);

f'_c : resistência característica do concreto à compressão (MPa);

A_{tr} : área das barras de armadura transversal presente nos furos do conector (mm²);

f_y : resistência nominal ao escoamento do aço (MPa);

n : número de furos do conector;

d : diâmetro do furo do conector (mm).

2.5. Curva momento-rotação das ligações

As ligações podem ter seus comportamentos caracterizados pelas curvas M- θ , nas quais M corresponde ao momento fletor atuante na ligação e θ à rotação relativa entre o pilar e a viga. Desta curva, podem-se tirar as características fundamentais da ligação: rigidez inicial, momento resistente e ductilidade.

De acordo com Leon (1999), a rigidez de serviço será levada em conta para o cálculo das deformações sob cargas de serviço, o momento fletor resistente

será usado para avaliar a resistência última da estrutura e a ductilidade para verificar a capacidade de redistribuição de esforços após a plastificação.

As curvas momento-rotação podem ser obtidas via análise experimental, numérica ou analítica. As não linearidades destas curvas as tornam pouco práticas e por isso há simplificações que permitem utilizá-las de forma aproximada. Tais aproximações dependem do nível de precisão desejado na análise, assim, os tipos de curvas aproximadas são:

- linear (pouco precisa);
- bilinear (mais utilizada);
- trilinear, multilinear e não linear (para uma análise mais rigorosa).

A Figura 2.10 representa os tipos de curvas citados acima.

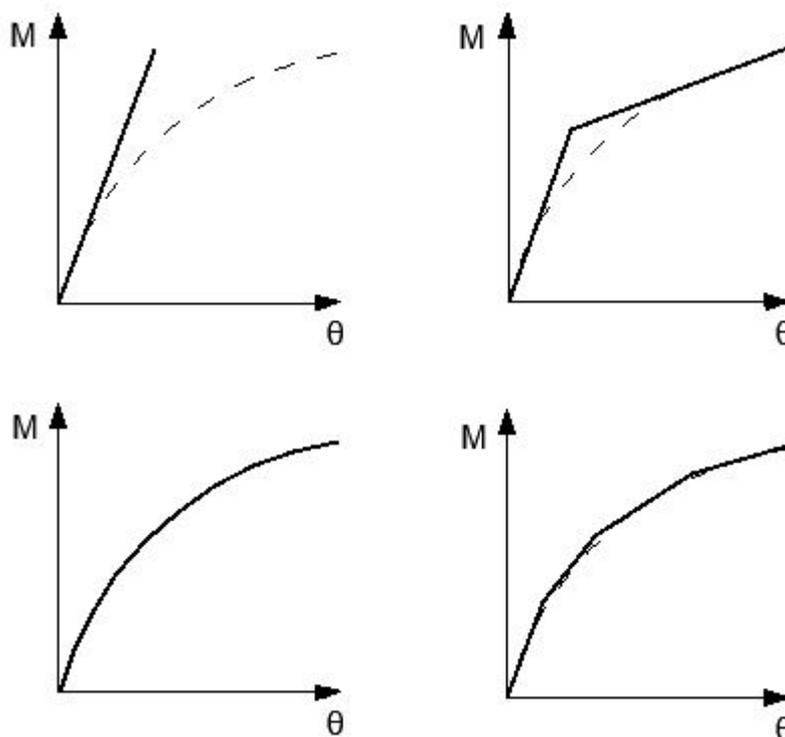


Figura 2.10 - Tipos de curvas momento-rotação, CHEN et. al 2011

A rigidez da ligação varia para cada ponto da curva M-θ, assim caso deseje-se a rigidez em qualquer ponto, usa-se então a rigidez tangente ($K_{tan} = \Delta M / \Delta \theta$). Entretanto, pode-se assumir uma aproximação linear para os cálculos de serviço, com isto tem-se a rigidez de serviço (K_{serv}) da ligação. Esta última pode ser assumida como a inclinação da reta para uma rotação igual a 2,5 mrad:

$$K_{serv} = \frac{M_{serv}}{\theta_{serv}} \quad (2.2)$$

A rotação de serviço (θ_{serv}) é uma aproximação para às ações gravitacionais, nas quais os deslocamentos limites são tomados iguais a $L/360$, o que leva ao valor de 2,5 mrad para a rotação.

A rigidez de serviço é geralmente menor que a rigidez inicial da ligação (K_i) e é aproximadamente igual à rigidez no descarregamento ($K_{des.}$). As rigidez citadas são ilustradas na Figura 2.11, de acordo com uma curva M- θ .

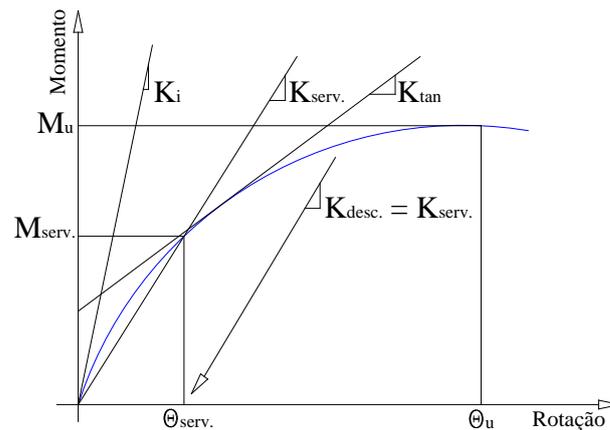


Figura 2.11 - Definição das rigidezes de uma ligação, adaptada de Leon et al. (1996)

O comportamento M- θ das ligações mistas pode ser dividido em três fases: trecho elástico, inelástico e plástico. As fases citadas são mostradas na Figura 2.12.

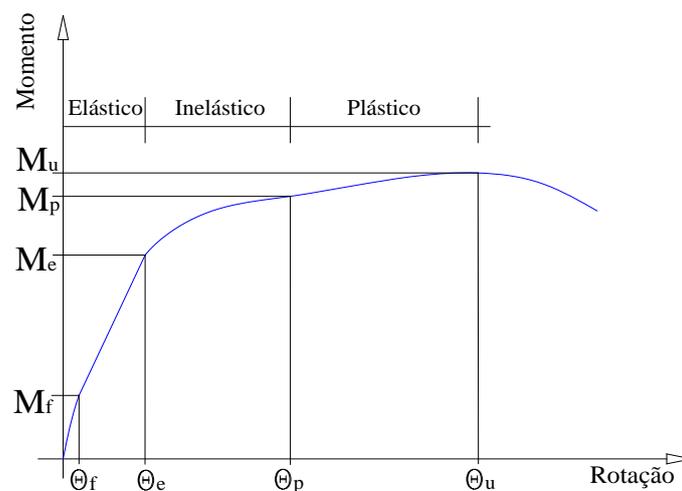


Figura 2.12 - Fases da curva M- θ de uma ligação mista, adaptada de Nethercot (1995)

O trecho elástico é composto por duas etapas, uma antes de o concreto fissurar e a outra logo após a fissuração, onde a rigidez já é menor, mas o trecho continua próximo do linear.

2.6.

Método de análise proposto pelo AISC: “Steel Design Guide Series: 8”

2.6.1.

Considerações iniciais

A publicação de número 8 do AISC *reports* traz recomendações e métodos de cálculo para pórticos contraventados e não-contraventados, com ligações mistas parcialmente restringidas, chamadas de PR-CC (*partially restrained composite connections*).

Segundo Leon et al. (1996), devido ao aumento de flexibilidade quando comparado às ligações rígidas, o sistema apresentado é recomendável para estruturas com até dez pavimentos.

O método proposto por Leon neste manual é específico para ligações com cantoneiras de alma e de assento ou com somente cantoneiras de assento. Este manual apresenta expressões mais simples que outros métodos, como o do Eurocode, por exemplo. Estas equações foram obtidas através de análises e estudos anteriores feitos pelo autor e simplificadas para que a rigidez e o momento resistente da ligação fossem obtidos mais facilmente.

2.6.2.

Comportamento das ligações

Os elementos que compõem a ligação mista estão representados na Figura 2.13.

O comportamento da ligação pode ser visualizado na sua curva momento-rotação. Como já foi dito nos itens anteriores, esta curva traz informações importantes da ligação, como a rigidez (representada pela inclinação da curva), o momento resistente e a capacidade de rotação correspondente.

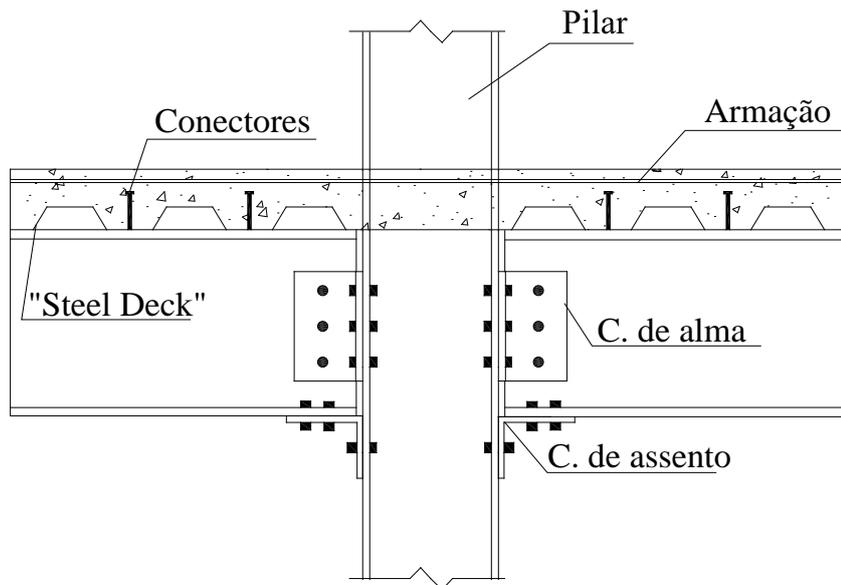


Figura 2.13 - Ligação proposta por Leon et al, 1996

Estudos de Leon et al., 1996, chegaram à relação momento-rotação para PR-CC, sob momentos negativos, mostrada na Equação 2.3.

$$M_n^- = C1(1 - e^{-C2\theta}) + C3\theta \quad (2.3)$$

onde:

$$C1 = 0,18(4 A_s F_{yrb} + 0,857 A_l F_y)(d + Y3);$$

$$C2 = 0,775;$$

$$C3 = 0,007(A_l + A_{wl})F_y(d + Y3);$$

θ : rotação final da viga, em mrad;

d: altura da viga, in;

Y3: distância do topo da viga ao centroide do vergalhão, in;

A_s : área de aço da armadura na largura efetiva da laje, in²;

A_l : área da cantoneira de assento, in²;

A_{wl} : área bruta da dupla cantoneira de alma para cálculo de cisalhamento, in²

F_{yrb} : tensão de escoamento do aço da armadura (vergalhão), ksi;

F_y : tensão de escoamento das cantoneiras de alma e de assento, ksi.

Um esquema das forças resistentes de tração, compressão e cisalhamento da ligação é mostrado na Figura 2.14.

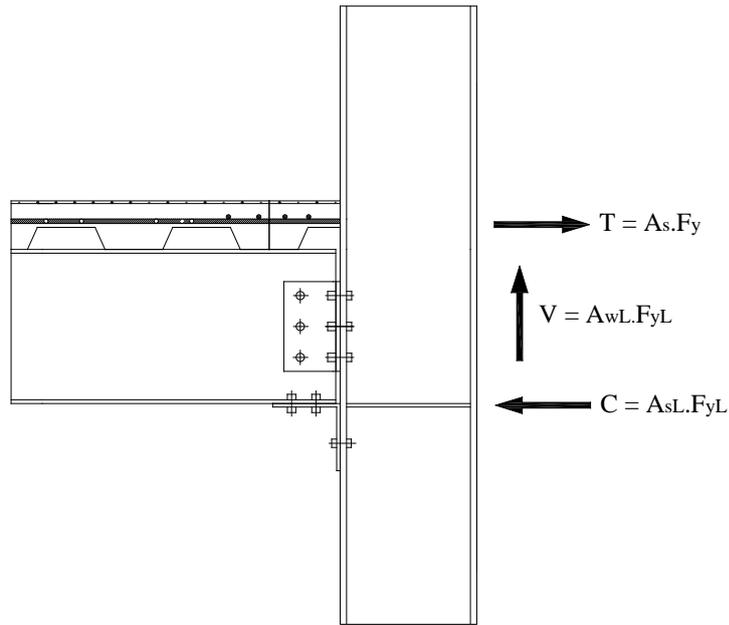


Figura 2.14 - Forças resistentes na ligação

2.6.3. Condições para escolha inicial da ligação

Nos gráficos mostrados na Figura 2.15, é considerada uma viga solicitada por carregamento uniformemente distribuído (w); “ u ” corresponde à relação entre as rigidezes da viga e da ligação, ou seja, $u = (EI/L)/K_{conn}$; M_{pos} é o momento no meio do vão; M_{con} é o momento negativo na ligação e, por fim, M_0 corresponde ao momento solicitante para uma ligação rígida.

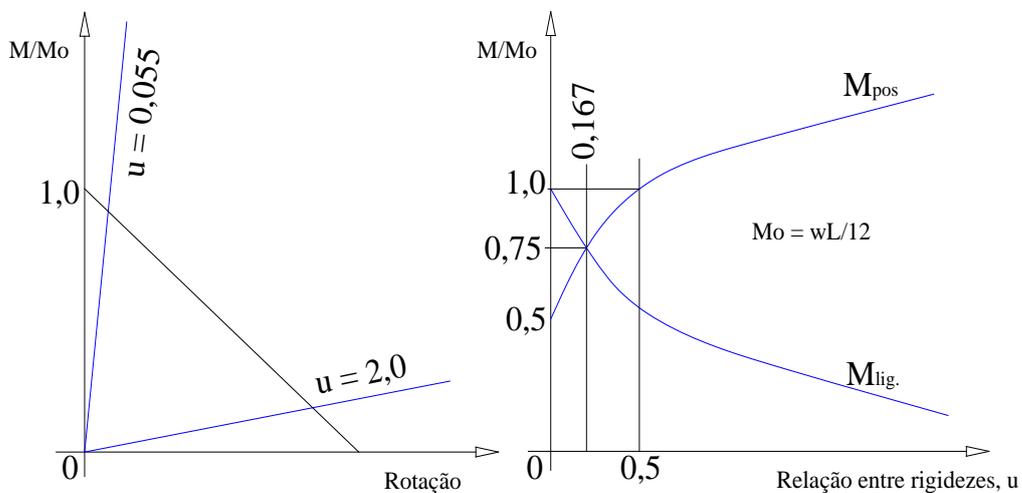


Figura 2.15 - Classificação quanto à rigidez, AISC 2010

Para análise elástica, a situação mais econômica para dimensionamento é aquela na qual o momento positivo é igual ao negativo, então, através do gráfico presente na Figura 2.15, percebe-se que esta situação ocorre quando a relação “u” é igual a 0,167 e o momento positivo é igual ao negativo dado por $0,75M_0$.

Para análise plástica, segundo Leon (1990), a forma de se obter essa “condição ideal” de distribuição dos momentos é adotando-se, para dimensionamento da ligação, um momento fletor resistente em torno de 75% do de plastificação da viga de aço.

2.6.4. Análise

2.6.4.1. Análise “*Beam Line*”

A “*beam line*” representa a relação entre o momento e a rotação na extremidade de uma determinada viga. A máxima rotação corresponde ao momento zero (ligação simples) e a rotação zero corresponde ao momento fletor máximo (ligação rígida).

A intersecção entre a curva momento-rotação da ligação e a “*beam line*” define o momento na extremidade da viga e a resistência desejada para a qual a ligação PR deve ser projetada. (AISC, LRFD, 2010)

Os três elementos chave para a análise “*beam line*” são: a relação momento-rotação da ligação, a rotação final para viga simplesmente apoiada e o momento na extremidade fixa, assumindo-se uma ligação totalmente rígida. Notar que a “*beam line*” como assumida aqui somente é aplicável no regime elástico. (LEON et al., 1996).

Para se traçar a “*beam line*” é necessário o conhecimento do momento máximo para extremidade fixa, M_F , e a rotação final devida à carga de serviço, θ_{ss} . M_F depende do tipo de ligação na extremidade da viga. Caso ambas as ligações sejam do tipo PR, então o momento fixo-fixo (M_{ff}) é usado e se uma das extremidades for composta por ligação simples e a outra por PR, o momento fixo-apoiado, M_{fp} , é usado.

Uma ilustração para a intersecção entre uma curva momento-rotação e a “*beam line*” é apresentada na Figura 2.16.

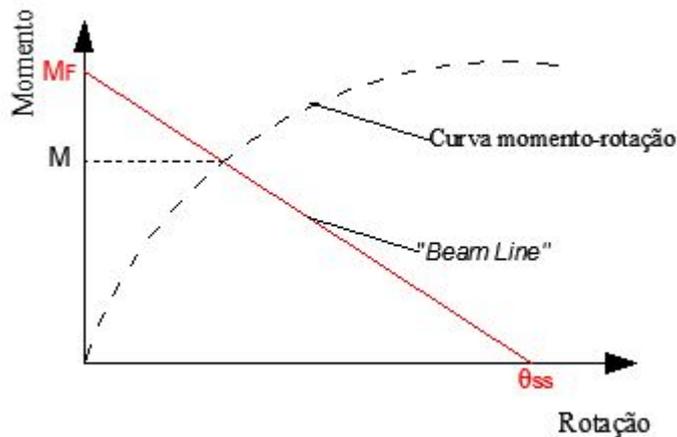


Figura 2.16 - "Beam Line", adaptada de Leon et al., 1996

Através da Equação 2.4, retirada da equação da "beam line" é possível obter diretamente a rotação da ligação.

$$\theta = \frac{M_F}{K_{grav} + \frac{M_F}{\theta_{ss}}} \quad (2.4)$$

onde:

$$K_{grav} = M1/\theta1;$$

$$\theta1 = 0,0025 \text{ rad};$$

M1: momento nominal da ligação correspondente à rotação $\theta1$.

Com o valor da rotação θ conhecido, é possível, então, encontrar-se o momento para o qual a ligação deve ser projetada, dado pela Equação 2.5.

$$M = M_F - \left(\frac{M_F}{\theta_{ss}} \right) \theta \quad (2.5)$$

2.6.4.2. Momento resistente para cargas gravitacionais

O momento resistente da ligação, para momentos fletores negativos, correspondente às ligações compostas por cantoneiras de alma e de assento, é encontrado através da Equação 2.6.

$$M_n^- = 0,245(4A_s F_{yrb} + A_{wl} F_y)(d + Y3) \quad (2.6)$$

onde:

Y3: distância do topo da viga ao centroide do vergalhão.

Para as ligações somente com cantoneiras de assento a Equação 2.7 é utilizada.

$$M_n^- = A_s F_{yrb} (d + Y_3) \quad (2.7)$$

O fator usado para minoração da resistência é $\phi = 0,85$.

Vale ressaltar que estes momentos fletores fatorados, para uma rotação de 10 miliradianos, tabelados para uma série de perfis para as vigas e variadas áreas de barras de aço, são encontrados na publicação de número 8 do AISC.

2.6.5. Considerações de projeto

O método proposto é baseado em dois tipos de análise: elástica para as cargas de serviço, já que nesta etapa o comportamento da ligação é aproximadamente linear, e plástica para a carga última.

2.6.5.1. Deslocamentos de vigas com PR-CC

Para se determinar o deslocamento de uma viga com PR-CC é necessário que se identifiquem, primeiramente, quais são as condições de apoio das extremidades da viga: ligações PR com rigidezes iguais, PR com rigidezes diferentes ou vigas com uma extremidade rotulada e a outra PR.

Cada caso citado possui uma equação própria para o cálculo dos deslocamentos. Como o caso em estudo neste trabalho é composto por uma ligação rotulada e outra semirrígida, a Equação 2.8 é a indicada.

$$\delta_{sr} = \delta_{fp} + \theta \frac{L}{5,4} \quad (2.8)$$

onde:

δ_{fp} : deformação da viga com uma extremidade fixa e a outra rotulada (*fixed-pinned*);

θ : rotação real para a ligação semirrígida (esta rotação pode ser encontrada pela análise “*beam line*”, utilizando-se o momento M_{fp}).

2.6.5.2. Rigidez da viga

Como já foi dito anteriormente, a variação da rigidez da viga é uma das desvantagens do sistema semicontínuo. Para que esta mudança seja levada em consideração nos cálculos, as rigidezes da viga para momento negativo (I_n) e positivo (I_{LB}) devem ser calculadas.

Definidos os valores de I_n e I_{LB} , é permitido calcular-se uma rigidez equivalente (I_{eq}) para a viga através de uma média ponderada. Para vigas com ligações semirrígidas nas duas extremidades, I_{eq} é calculada conforme a Equação 2.9.

$$I_{eq} = 0,6I_{LB} + 0,4I_n \quad (2.9)$$

Para vigas com uma extremidade rotulada e a outra semirrígida a Equação 2.10 é utilizada.

$$I_{eq} = 0,75I_{LB} + 0,25I_n \quad (2.10)$$

O cálculo do momento de inércia para regiões de momento negativo é obtido desconsiderando-se a participação do concreto, ou seja, é admitido o cálculo após a fissuração. Assim, somente a viga de aço e as armaduras transversais, presentes na largura efetiva da laje de concreto, participarão desta conta, conforme Figura 2.17.

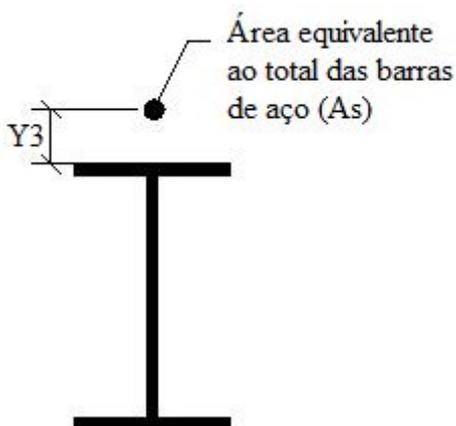


Figura 2.17 - Componentes que contribuem para a rigidez sob momento negativo

2.6.6. Detalhamento da armadura

A Figura 2.18 apresenta as recomendações relativas ao detalhamento das barras de aço, longitudinais e transversais, para uma ligação intermediária, segundo Leon et al. (1996).

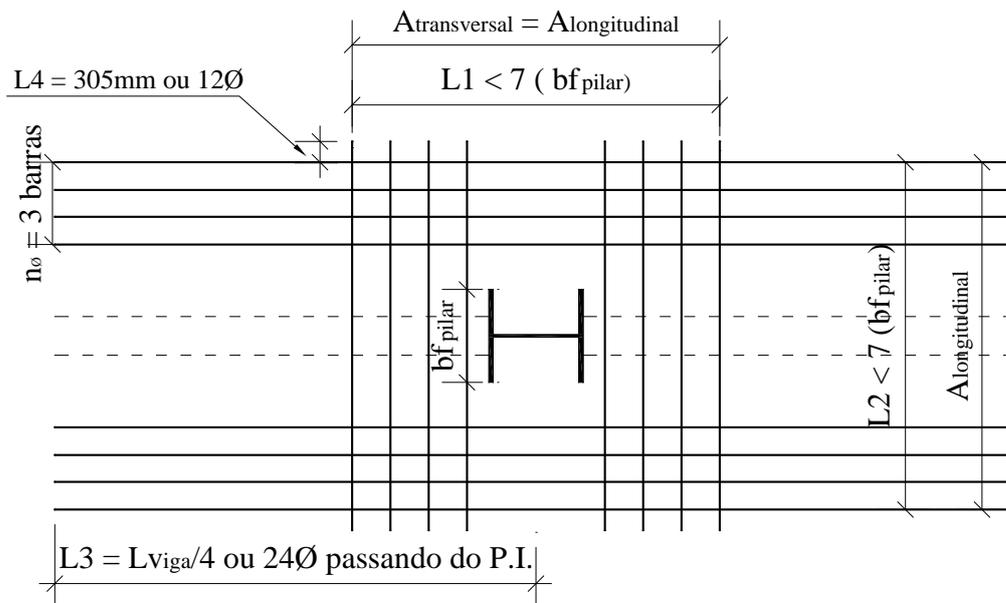


Figura 2.18 - Recomendações para o detalhamento da armadura, segundo Leon et al. (1996)

2.7. Método de análise proposto pela ABNT NBR 8800: 2008

2.7.1. Ligações mistas

As ligações mistas foram adicionadas a NBR 8800 na revisão de 2008, em substituição a de 1986, e estão presentes no Anexo R. Nesta norma só consta o procedimento de projeto para ligações mistas semicontínuas sujeitas a momento negativo e que não participam da estabilidade lateral da edificação.

Os tipos de ligações presentes na NBR 8800 são: ligação mista com chapa de extremidade com altura total, ligação mista com cantoneiras parafusadas na alma e na mesa inferior da viga apoiada e ligação mista com cantoneira

parafusada na mesa inferior da viga apoiada. Em todas as ligações citadas o elemento de apoio pode ser um pilar ou uma viga.

Os elementos que compõem as ligações mistas, segundo a NBR 8800, são três: a armadura da laje de concreto (contida na largura efetiva), a ligação metálica e os conectores de cisalhamento. O método de cálculo proposto leva em consideração a rigidez inicial, a força resistente e a capacidade de deformação dos componentes da ligação. Assim, o cálculo da resistência, rigidez e capacidade de rotação total da ligação mista associa os valores encontrados para os elementos isolados.

Uma das exigências presentes na Norma é que as barras de armadura longitudinais devem estar situadas, de cada lado da linha de centro do pilar, a uma distância máxima de $(2,5b_c)$ dessa linha, onde b_c corresponde à largura do pilar na direção transversal a viga. Além disso, deve-se prever uma armadura transversal à linha de centro da viga, com no mínimo 50% da área da armadura principal, também a uma distância máxima de $(2,5b_c)$ de cada lado do pilar.

Para a ligação em estudo neste trabalho, mostrada na Figura 2.19, a NBR 8800 propõe a Equação 2.11 para o cálculo do momento fletor resistente.

$$M_{Rd}^- = f_{sd} A_{sl} (d + y) \quad (2.11)$$

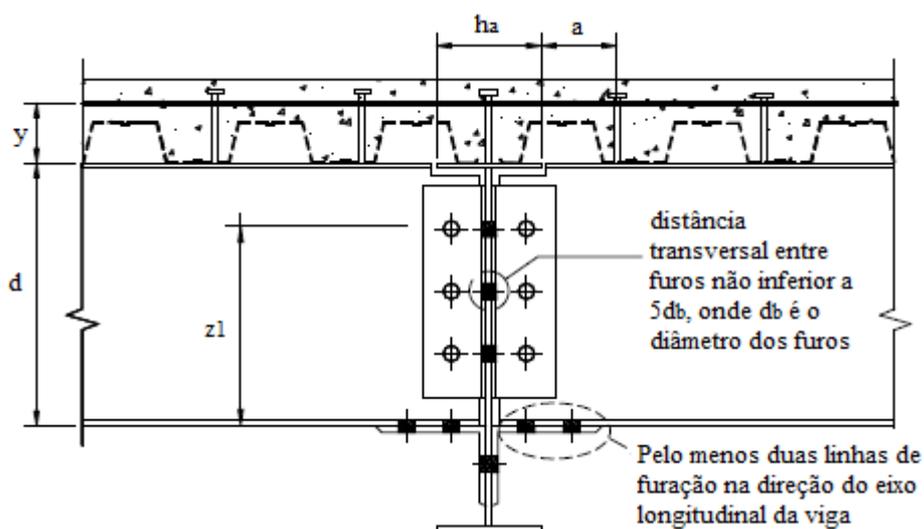


Figura 2.19 - Ligação mista proposta pela NBR 8800:2008

A rigidez inicial da ligação é dada pela Equação 2.12.

$$S_i = \frac{M}{\theta} = \frac{(d + y)^2}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_{cs}} + \frac{1}{k_i}} \quad (2.12)$$

onde:

d e y : altura do perfil de aço e distância do topo do perfil ao centroide da armadura, respectivamente;

k_s : rigidez inicial das barras de aço;

k_{cs} : rigidez inicial dos conectores;

k_i : rigidez inicial da ligação inferior.

A capacidade de rotação da ligação é determinada atribuindo-se aos deslocamentos dos componentes seus valores limites, conforme a Equação 2.13.

$$\theta_u = \frac{\Delta_{us} + \Delta_{ui} + s^{(B)}}{d + y} \quad (2.13)$$

onde:

Δ_{us} : capacidade de deformação das barras de armadura;

Δ_{ui} : capacidade de deformação da ligação inferior;

$s^{(B)}$: capacidade de deformação dos conectores.

Como é perceptível nas equações anteriores, a ligação de alma não contribui para as propriedades da ligação mista. Para que isto seja possível, a norma traz limitações referentes à posição da linha neutra plástica, conforme Figura 2.20. Caso esta condição não seja atendida, ou eventualmente se queira considerar a contribuição da cantoneira de alma na resistência a momento fletor da ligação, recomenda-se usar o procedimento descrito em CHEN et al. (1993).

A posição da LNP, a partir da face inferior do perfil de aço, é dada pela Equação 2.14.

$$y_{LNP} = \frac{(d + y)\Delta_{ui}}{\Delta_{us} + \Delta_{ui} + s^{(B)}} \quad (2.14)$$

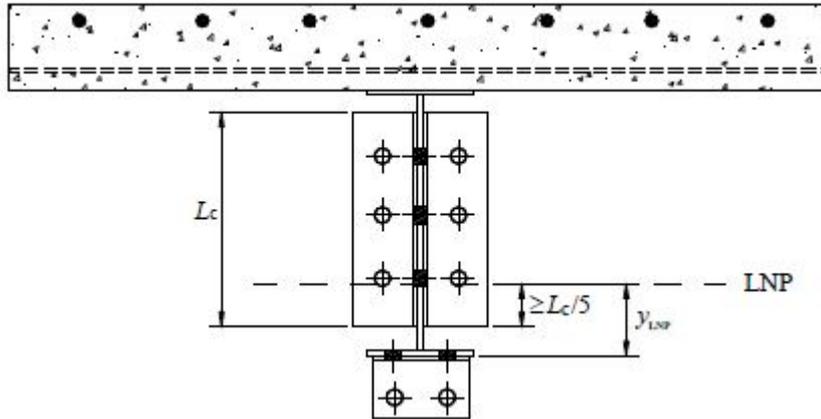


Figura 2.20 - Posição da LNP para que a contribuição da ligação de alma seja desconsiderada, NBR 8800:2008

2.7.2.

Momento fletor resistente de cálculo em regiões de momento negativo para vigas mistas

O cálculo para resistência da viga mista em regiões de momento fletor negativo está descrito no item O.2.4 da NBR 8800:2008.

Este método determina que, em regiões de momento fletor negativo, a seção transversal da viga mista é composta pelo perfil de aço associado à seção de armadura longitudinal, presente na largura efetiva da laje de concreto.

A distribuição de tensões nas vigas mistas submetidas a este tipo de solicitação, de acordo com a NBR 8800, é mostrada na Figura 2.21.

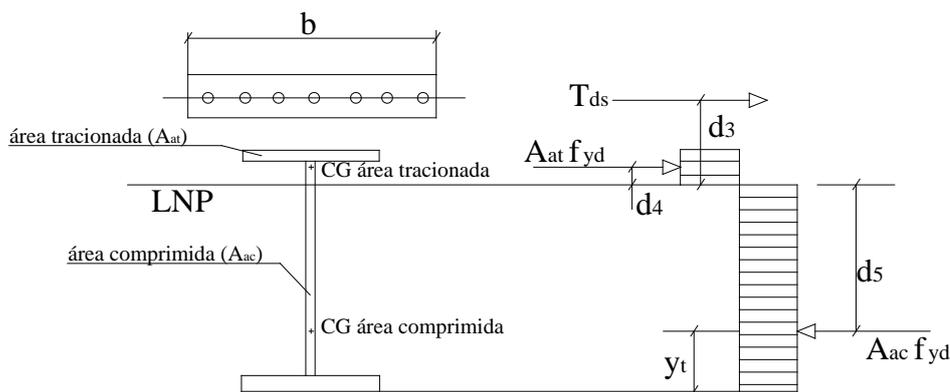


Figura 2.21 - Distribuição de tensões para momento fletor negativo (NBR 8800:2008)

A força resistente de cálculo das barras de armadura (T_{ds}) é calculada de acordo com a Equação 2.15.

$$T_{ds} = A_{sl} f_{sd} \quad (2.15)$$

O momento fletor resistente de cálculo é encontrado através da Equação 2.16.

$$M_{Rd}^- = T_{ds} d_3 + A_{at} f_{yd} d_4 + A_{ac} f_{yd} d_5 \quad (2.16)$$

onde:

A_{at} : área tracionada da seção do perfil de aço;

A_{ac} : área comprimida da seção do perfil de aço;

d_3 : distância do centro geométrico da armadura à LNP;

d_4 : distância do centro geométrico da área tracionada do perfil à LNP;

d_5 : distância do centro geométrico da área comprimida do perfil à LNP.

É importante ressaltar que esta equação só é válida para vigas mistas com seções compactas.

2.7.3. Capacidade de rotação necessária

Como a ligação mista geralmente é de resistência parcial, a própria ligação tem que garantir a rotação necessária para o desenvolvimento do máximo momento positivo da viga.

Li et al. (2000) apresentam um método para determinar-se a capacidade de rotação necessária de uma ligação mista, esta rotação é dividida em duas parcelas: uma elástica e uma plástica. Estes autores não consideraram, por exemplo, a influência do grau de interação entre a laje e o perfil metálico na rotação necessária da ligação, com este objetivo, Queiroz et al. (2001) fizeram o estudo deste fator. Com isto determinaram que quando se utiliza interação parcial na região de momento positivo, a capacidade de rotação necessária da ligação é inferior a que se obteria utilizando-se interação total.

A NBR 8800:2008 traz tabelas para se determinar a capacidade de rotação necessária de ligações mistas. Estas tabelas, obtidas a partir da relação momento-curvatura no regime elástico e no elasto-plástico, para construções não-escoradas,

variam conforme o coeficiente β_{vm} . Este coeficiente para as vigas semicontínuas pode assumir os valores de 0,85, 0,90 ou 0,95 e são utilizados nos cálculos do momento fletor positivo resistente de cálculo. Assim, β_{vm} é um fator que reduz o momento fletor resistente de acordo com a capacidade de rotação disponível da ligação utilizada.

As Tabelas 2.3 a 2.5 são as presentes na NBR 8800:2008 para determinação da capacidade de rotação das ligações.

Tabela 2.3- Capacidade de rotação necessária (mrad) – $\beta_{vm} = 0,95$

L/d _t	f _y = 350 MPa		f _y = 275 MPa	
	DL e 1CL	2CL	DL e 1CL	2CL
15	29	43	28	39
20	46	64	38	52
25	57	80	46	63
30	67	95	54	74

L/d_t: relação comprimento/altura da viga mista; DL: carga uniformemente distribuída; 1CL: carga concentrada no centro da viga; 2CL: duas cargas concentradas nos terços dos vãos. Obs: para construções escoradas pode-se usar 70% do valor encontrado na tabela.

Tabela 2.4 - Capacidade de rotação necessária (mrad) – $\beta_{vm} = 0,90$

L/d _t	f _y = 350 MPa		f _y = 275 MPa	
	DL e 1CL	2CL	DL e 1CL	2CL
15	22	32	21	29
20	35	48	29	39
25	43	60	35	47
30	50	71	41	56

L/d_t: relação comprimento/altura da viga mista; DL: carga uniformemente distribuída; 1CL: carga concentrada no centro da viga; 2CL: duas cargas concentradas nos terços dos vãos. Obs: para construções escoradas pode-se usar 70% do valor encontrado na tabela.

Tabela 2.5 - Capacidade de rotação necessária (mrad) – $\beta_{vm} = 0,85$

L/d _t	f _y = 350 MPa		f _y = 275 MPa	
	DL e 1CL	2CL	DL e 1CL	2CL
15	15	22	14	20
20	23	32	19	26
25	29	40	23	32
30	34	48	27	37

L/d_t: relação comprimento/altura da viga mista; DL: carga uniformemente distribuída; 1CL: carga concentrada no centro da viga; 2CL: duas cargas concentradas nos terços dos vãos. Obs: para construções escoradas pode-se usar 70% do valor encontrado na tabela.

As tabelas mostradas são válidas para perfis de aço com tensão de escoamento igual a 350 MPa ou 275 MPa, atendem três configurações de aplicação de carga e diferentes relações entre a seção e a altura da viga mista.

As tabelas apresentadas só são aplicadas às ligações que possuam momento fletor resistente superior a 30% do momento fletor positivo resistente de cálculo da viga mista. Outra condição é que as ligações nas extremidades das vigas sejam ambas mistas ou uma mista e uma rotulada.

Pode-se ainda tirar algumas conclusões das Tabelas 2.3 a 2.5. A capacidade de rotação necessária:

- aumenta conforme a relação L/d_t aumenta;
- diminui conforme a tensão de escoamento do aço diminui;
- diminui conforme o momento fletor resistente positivo da viga mista diminui (ou seja, β_{vm} menor);
- é menor para construções escoradas.

2.8. Método de análise proposto pelo Eurocode

Como método analítico, o Eurocode propõe o método dos componentes. Este método consiste em dividir a ligação em seus componentes básicos, como por exemplo, as armaduras, os conectores de cisalhamento, os elementos de ligação, os parafusos, entre outros. (QUEIROZ, 2001).

Como este método de cálculo não é o foco do presente trabalho, explicando-o de uma forma sucinta, ele propõe uma divisão da ligação em componentes, uma posterior confecção dos gráficos de força versus deslocamento dos mesmos e depois uma associação destes componentes, representados por molas, assim como eles estão dispostos na estrutura (em série ou em paralelo). Após esta associação é possível encontrar-se as características da ligação como um todo.

Por fim, este método de cálculo está presente no Eurocode 3, para ligações metálicas, e as observações quanto às modificações necessárias para aplica-lo às ligações mistas encontram-se no Eurocode 4.