

## 2 Sistemas Mistos

### 2.1 Introdução

Para engenheiros estruturais o termo construção mista é geralmente empregado para caracterizar sistemas que utilizam elementos estruturais de concreto e perfis de aço soldados, laminados ou em chapa dobrada solidarizados mecanicamente por conectores de cisalhamento. A construção mista compreende uma grande variedade de sistemas e elementos estruturais desde as vigas mistas, colunas mistas, treliças mistas, sistemas “stub-girders”, entre outras. Alguns destes sistemas estão ilustrados na Figura 2.1 a Figura 2.2.

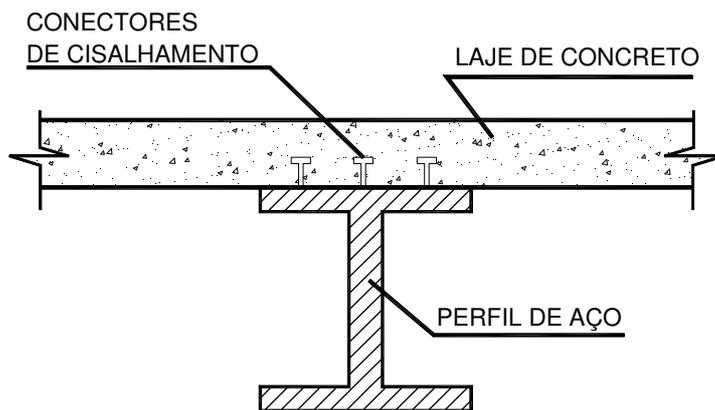


Figura 2.1 – Viga mista e conectores [120]

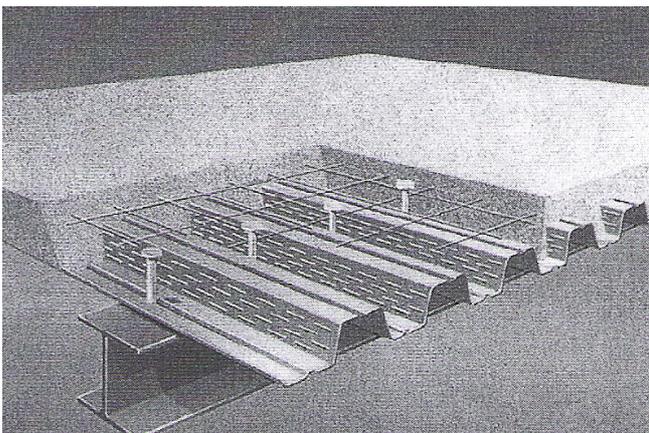


Figura 2.2 – Viga mista com forma metálica (*steel Deck*) [120]

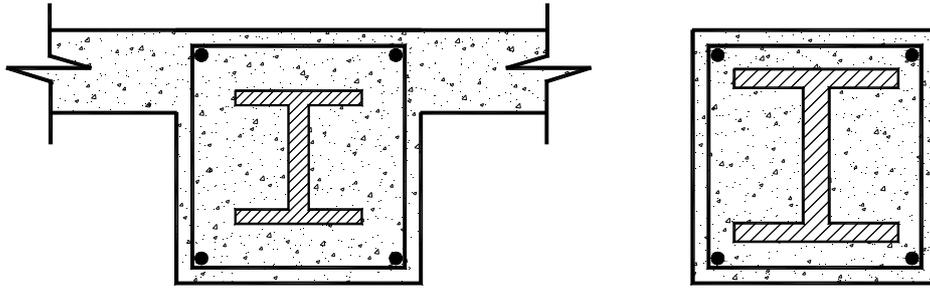


Figura 2.3 – Perfis soldados de aço embutidos em viga e pilar de concreto armado

Um tipo de sistema estrutural bastante freqüente em edifícios e pontes utiliza lajes de concreto apoiados em vigas de aço. A laje transfere as cargas aplicadas ao piso para as vigas de aço. Estas por sua vez devem resistir a este carregamento acrescido do peso próprio da laje e transmiti-lo às colunas. Normalmente as lajes e as vigas se deformam em conjunto devido à proximidade da parte comprimida das vigas a laje. Este fato conduz a uma expectativa que esses materiais possam se comportar mecanicamente acoplados, criando o que se denomina de uma seção transversal mista. Usualmente essa compatibilidade de deformações é garantida através de conectores mecânicos de cisalhamento posicionados na interface entre os dois materiais.

Uma das principais vantagens da construção mista está associada ao fato de que os materiais envolvidos (aço e concreto) são utilizados de forma a aproveitar suas melhores características de resistência mecânica, ou seja, aço trabalhando em tração e o concreto em compressão. Por exemplo, no caso de momentos positivos a laje de concreto passa a agir como parte da mesa em compressão do perfil misto possibilitando ao novo sistema, em que o concreto e o aço agem solidariamente, possuir um aumento significativo de rigidez e resistência quando comparados com soluções estruturais utilizando perfis de aço isolado. Este fato conduz a uma redução no peso final de aço, gerando uma economia direta, e também a uma redução na altura total do sistema estrutural de piso. Esta última redução pode não ser significativa em edificações com poucos pavimentos, mas é substancial no caso de edifícios de andares múltiplos, pontes e viadutos para tal o sistema de construção mista resultante vem provando ao longo do tempo em diversos países ser eficiente, eficaz e economicamente viável. Entretanto, a principal desvantagem dos sistemas mistos está associada ao custo adicional envolvido com a garantia de compatibilidade de deformações entre o concreto e o aço em sua interface. Quando esses aspectos são devidamente avaliados, com exceção de vigas com

vão muito curtos ou pouco carregadas, o custo adicional dos conectores de cisalhamento é sempre inferior à redução de seção de aço obtida em soluções mistas.

No que tange a critérios de projeto, no dimensionamento de vigas mistas o engenheiro estrutural deve considerar além dos estados limites últimos, que levam ao colapso estrutural, os estados limites de utilização, que fazem com que a estrutura não atenda aos fins para os quais ela foi projetada. Para um piso misto os estados limites de utilização mais comuns são associados à avaliação de níveis aceitáveis de vibração, deflexão e fissuração. Já os estados limites últimos devem incluir a avaliação da resistência e estabilidade da seção de aço isolada (antes da cura do concreto) no caso de construção não escorada e da seção mista em todos os casos de construção.

### **2.1.1 Dimensionamento de vigas mistas – interação total**

A análise se baseia em um diagrama de blocos simples onde se considera que o concreto e o aço somente resistem a compressão e tração respectivamente. Quando se impõe o equilíbrio em uma viga mista sujeita a momentos positivos, Figura 2.4, usualmente três possibilidades para a posição da linha neutra ocorrem:

- na laje de concreto, Figura 2.4a;
- na mesa superior comprimida da viga de aço, Figura 2.4b;
- na alma da viga de aço, Figura 2.4 c.

A quarta possibilidade em que a linha neutra se situa na mesa inferior, apesar de teoricamente possível, conduz a vigas antieconômicas e por isto não será abordada neste trabalho.

Para melhor descrever o processo de dimensionamento a flexão de vigas mistas sujeitas a momentos positivos, os três casos relativos à posição da linha neutra serão estudados individualmente. É importante ressaltar que cada um dos casos descritos anteriormente poderá estar sujeito a interação total ou parcial.

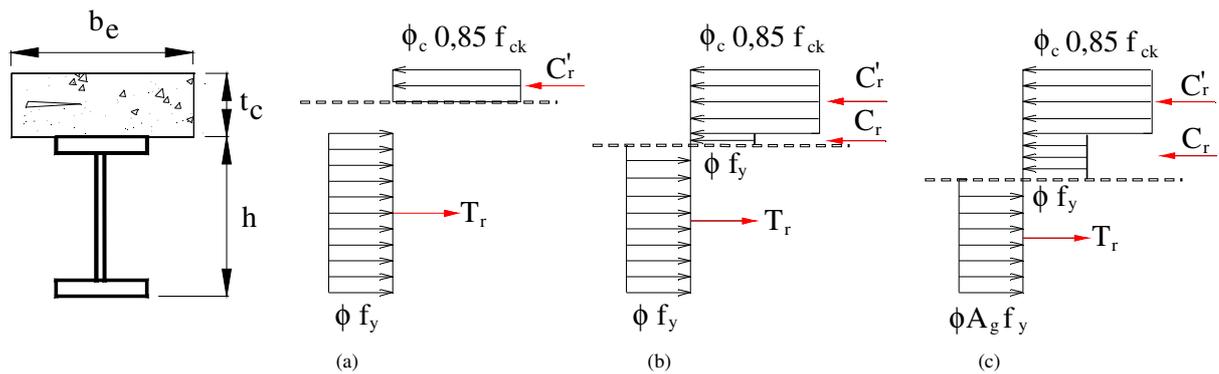


Figura 2.4 – Posição da linha neutra em vigas mistas [120]

### 2.1.1.1

#### Interação total - linha neutra na laje de concreto

A Figura 2.5 apresenta um esquema da análise efetuada em uma viga mista em que a linha neutra situa-se na laje de concreto.

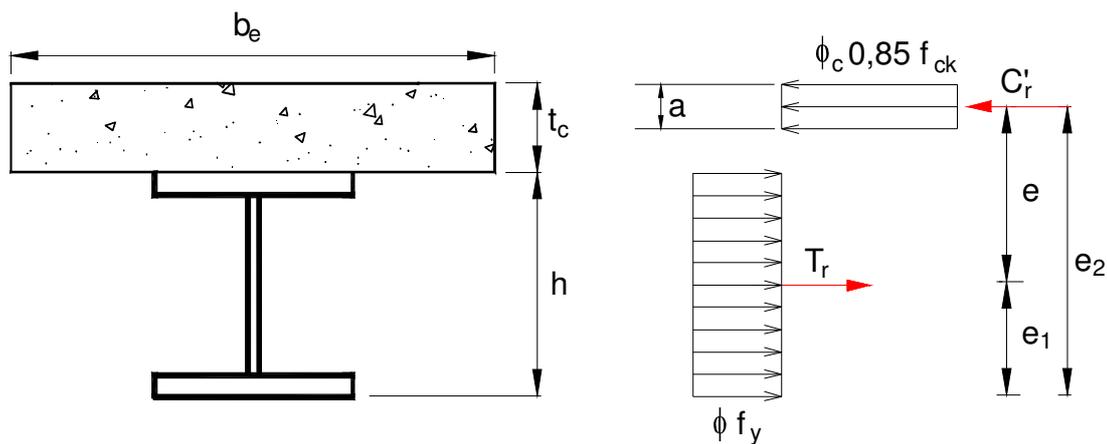


Figura 2.5 – Linha neutra na laje de concreto [120]

A componente resistente em compressão da laje de concreto é dada por:

$$C'_r = \phi_c 0,85 f_{ck} b_e a \quad (2.1)$$

onde  $\phi_c$  é o coeficiente de segurança do concreto igual a 0,6;  $0,85 f_{ck}$  é um termo relativo a resistência característica do concreto a compressão diminuída pelo efeito Rush e pela deformação lenta,  $b_e$  é a largura efetiva e  $a$  é a distância da fibra superior da laje de concreto a linha neutra.

A componente resistente em tração do pelo perfil de aço é dada por:

$$T_r = \phi A_g f_y \quad (2.2)$$

onde  $\phi$  é o coeficiente de segurança do aço igual a 0,9;  $A_g$  é a área da seção transversal do perfil de aço e  $f_y$  é a tensão de escoamento do aço do perfil.

Aplicando o equilíbrio de forças simples é possível se calcular a posição da linha neutra,  $a$ , e dos braços de alavanca  $e_1$  e  $e_2$  através de:

$$C_r' = T_r \quad \therefore \quad a = \frac{\phi A_g f_y}{\phi_c 0,85 f_{ck} b_e} \quad (2.3)$$

$$e_1 = h + t_c - (a/2) \quad (2.4)$$

$$e_2 = h/2 \quad (2.5)$$

Se o valor de  $a$ , calculado pela equação, for inferior a espessura da laje de concreto  $t_c$ , a linha neutra se situa na laje de concreto confirmando a hipótese original de cálculo. Por outro lado se isto não ocorrer, a linha neutra se situa no perfil de aço cujo dimensionamento será descrito nos próximos itens. O momento resistente da viga mista é avaliado pela equação (2.6):

$$M_r = \phi A_g f_y (e_2 - e_1) = \phi A_g f_y (h/2 + t_c - a/2) \quad (2.6)$$

Alternativamente o momento pode ser também calculado pela equação (2.7). Esta equação, para o caso presente, é mais complexa que a equação (2.6).

$$M_r = C_r' e_2 - T_r e_1 = \phi_c 0,85 a f_{ck} b_e (h + t_c - a/2) - \phi A_g f_y h/2 \quad (2.7)$$

### 2.1.1.2

#### Interação total - linha neutra na mesa superior da viga

Na Figura 2.6 apresenta-se um esquema estrutural de uma viga mista na qual a linha neutra se situa na mesa superior da viga de aço.

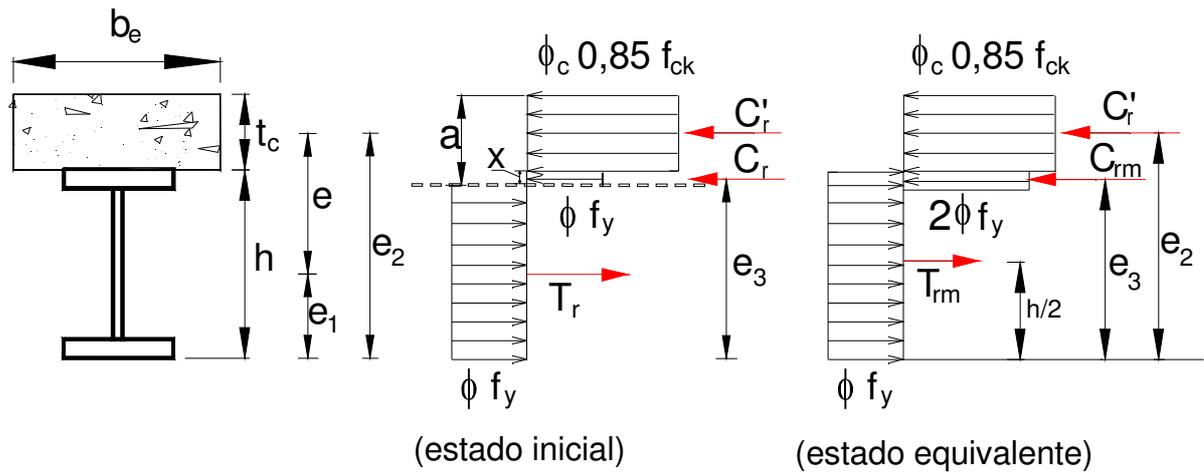


Figura 2.6 – Linha neutra na mesa superior da viga de aço [120]

A componente resistente em compressão resistida pela laje de concreto é dada por:

$$C'_r = \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c \quad (2.8)$$

onde  $\phi_c$  é o coeficiente de segurança do concreto igual a 0,6;  $0,85 f_{ck}$  é um termo relativo a resistência característica do concreto a compressão diminuída pelo efeito Rush e pela deformação lenta,  $b_e$  é a largura efetiva;  $t_c$  é a espessura da laje de concreto. Usando conceitos simples de equilíbrio obtêm-se as equações (2.9) e (2.10).

$$T_r = C_r + C'_r \quad (2.9)$$

$$T_r = \phi A_g f_y - C_r \quad (2.10)$$

Substituindo as equações (2.8) e (2.9) na equação (2.10) obtêm-se o valor para a parcela de aço sujeita a compressão,  $C_r$ :

$$C_r = \frac{\phi A_g f_y - \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c}{2} \quad (2.11)$$

Já a parcela do aço sujeita a tração passa a ser dada por:

$$T_r = \frac{\phi A_g f_y + \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c}{2} \quad (2.12)$$

Para que a linha neutra se situe na mesa superior da viga de aço é necessário que:

$$C_r \leq \phi f_y b_f t_f \quad (2.13)$$

Se esta condição não for atendida a linha neutra estará situada na alma da viga de aço cujo dimensionamento será descrito nos próximos itens. Se a equação (2.13) for atendida pode-se avaliar a posição da linha neutra através de:

$$a = t_c + x \quad \text{onde} \quad x = \frac{C_r}{\phi b_f f_y} \quad (2.14)$$

Um processo de cálculo alternativo para a resistência a flexão de vigas mistas usa o conceito de diagrama de esforços equivalentes mostrado na Figura 2.6. Este engenhoso processo, proposto por Oehlers e Bradford [58], dispensa o usual cálculo do centróide da área de aço comprimida. Isso é feito considerando a parcela de aço tracionada totalmente plastificada agindo sobre a área total do perfil enquanto a parcela de aço comprimida estará sujeita a uma tensão igual ao dobro da tensão de escoamento. Essa idéia simplifica o processo de avaliação dos braços de alavanca associados a cada componente de resistência, acelerando o processo de cálculo. Dessa forma o momento resistente da viga mista pode ser avaliado com o auxílio da equação (2.15).

$$M_r = C_r' e_2 + C_{rm} e_3 - T_{rm} \left( \frac{h}{2} \right) \quad (2.15)$$

Onde:

$$C_{rm} = 2 C_r = \phi A_g f_y - \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c \quad (2.16)$$

$$T_{rm} = \phi A_g f_y \quad (2.17)$$

$$e_2 = h + \left( \frac{t_c}{2} \right) \quad (2.18)$$

$$e_3 = h - \frac{a - t_c}{2} \quad (2.19)$$

### 2.1.1.3 Interação total - linha neutra na alma da viga de aço

A Figura 2.7 apresenta um esquema estrutural de uma viga mista em que a linha neutra se situa na alma da viga de aço.

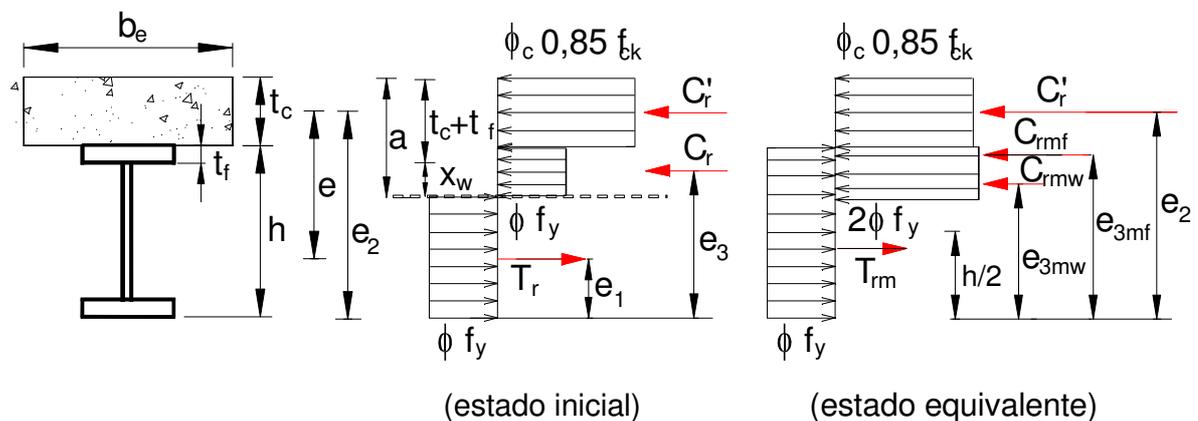


Figura 2.7 – Linha neutra na alma da viga de aço [120]

O dimensionamento de uma viga mista nesta situação é bastante semelhante ao caso anterior. A componente resistente em compressão resistida pela laje de concreto continua sendo dada por:

$$C'_r = \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c \quad (2.20)$$

onde  $\phi_c$  é o coeficiente de segurança do concreto igual a 0,6;  $0,85 f_{ck}$  é um termo relativo a resistência característica do concreto a compressão diminuída pelo efeito Rush e pela deformação lenta,  $b_e$  é a largura efetiva;  $t_c$  é a espessura da laje de concreto. Ainda pode-se usar os mesmos conceitos simples de equilíbrio gerando as equações (2.21) e (2.22).

$$T_r = C_r + C_r' \quad (2.21)$$

$$T_r = \phi A_g f_y - C_r \quad (2.22)$$

Substituindo as equações (2.20) e (2.21) na equação (2.22) obtêm-se o valor para a parcela de aço sujeita a compressão,  $C_r$ :

$$C_r = \frac{\phi A_g f_y - \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c}{2} \quad (2.23)$$

Já a parcela do aço sujeita a tração passa a ser dada por:

$$T_r = \frac{\phi A_g f_y + \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c}{2} \quad (2.24)$$

Como neste caso a linha neutra se situa na alma da viga de aço é necessário que:

$$C_r > \phi f_y b_f t_f \quad (2.25)$$

Se esta condição não for atendida a linha neutra estará situada na mesa superior da viga de aço. Se a inequação (2.25) for atendida pode-se avaliar a posição da linha neutra através de:

$$a = t_c + t_f + x_w$$

$$\text{onde } x = \frac{C_r - \phi b_f t_f f_y}{\phi t_w f_y} \quad (2.26)$$

Mais uma vez faz-se uso do conceito de diagrama de esforços equivalentes mostrado na Figura 2.7. Considera-se a parcela de aço tracionada totalmente plastificada agindo sobre a área total do perfil enquanto a parcela de aço comprimida estará sujeita a uma tensão igual ao dobro da tensão de escoamento. Desta forma o momento resistente da viga mista pode ser avaliado com o auxílio da equação (2.27).

$$M_r = C_r' e_2 + C_{rmf} e_{3mf} + C_{rmw} e_{3mw} - T_{rm} \left( \frac{h}{2} \right) \quad (2.27)$$

Onde:

$$C_{rmf} = 2 \phi b_f t_f f_y \quad (2.28)$$

$$C_{rmw} = 2 C_r - C_{rmf} \quad (2.29)$$

$$T_{rm} = \phi A_g f_y \quad (2.30)$$

$$e_2 = h + \left( \frac{t_c}{2} \right) \quad (2.31)$$

$$e_{3mf} = h - \frac{t_f}{2} \quad (2.32)$$

$$e_{3mw} = h - \frac{a - (t_c + t_f)}{2} \quad (2.33)$$

### 2.1.2 Dimensionamento de vigas mistas – Interação parcial

Vigas mistas simplesmente apoiadas sujeitas a carregamento uniformemente distribuído com conectores de cisalhamento igualmente espaçados ao longo do vão possuem uma distribuição elástica de esforço cortante linear com máximos nos apoios. Esta hipótese quando estendida para cargas próximas ao colapso estrutural pressupõe uma distribuição igual de esforço de cisalhamento para cada conector de cisalhamento independente de sua posição ao longo do vão, conforme mostra a Figura 2.8.

Por outro lado, a distribuição real do fluxo de cisalhamento na região próxima ao centro do vão indica que os conectores situados nesta região são

sujeitos a esforços menores. A maioria das normas, no caso de carregamentos uniformemente distribuídos, permite conectores igualmente espaçados baseado no fato de que na ruína grandes deformações associadas ao deslizamento ocorrem na interface concreto/aço. No caso de cargas concentradas a distribuição de conectores de cisalhamento deve ser feita de acordo com os esforços cortantes presentes nos pontos de aplicação de carga.

Como já foi visto anteriormente onde a força de cisalhamento a ser transmitida na interface concreto/aço é o menor valor entre as forças resistidas pela laje de concreto em compressão ou pelo perfil de aço em tração. Para garantir que não haja deslizamento na interface entre os dois materiais o número de conectores de cisalhamento utilizado deve ser capaz de resistir a essa força gerando o que se denomina de interação total ou completa.

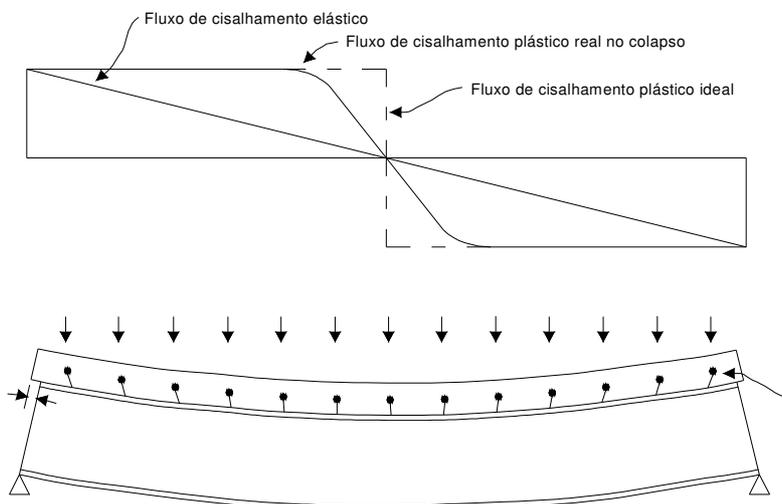


Figura 2.8 – Mecanismo de transmissão de forças na interface concreto aço [120]

Quando o número de conectores utilizados é menor do que o necessário não se atinge o momento de projeto mas sim um valor inferior a este. A Figura 2.9 apresenta um gráfico onde se percebe a influência do grau de interação,  $\alpha$ , ou seja, a resistência dos conectores usados  $\eta q_n$ , sobre a resistência necessária para garantir a interação total,  $L_{cs}$ , na capacidade resistente a flexão de vigas mistas.

$$\alpha = \frac{\eta q_n}{L_{cs}} \quad (2.34)$$

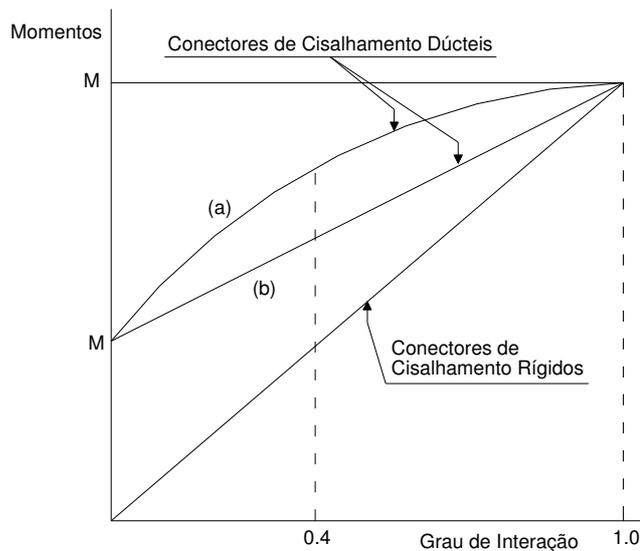


Figura 2.9 – Influência do grau de interação parcial sobre a resistência a flexão de vigas mistas: (a) método rígido plástico; (b) aproximação linear [120]

A maioria das Normas limita o grau de interação entre valores na faixa de 0,4 a 0,5 para evitar os efeitos adversos da capacidade de deformação limitada associada com os conectores de cisalhamento rígidos. A Figura 2.9 é possível se observar a diferença entre conectores de cisalhamento dúcteis e rígidos.

Uma comparação entre o dimensionamento baseado em uma análise rígido plástica, curva (a), e uma simples aproximação linear, reta (b), demonstra claramente a vantagem do primeiro método para graus de interação entre 0,3 e 0,7. O processo de dimensionamento de vigas mistas baseado em uma análise rígido plástica, curva (a), é geralmente dividido em dois casos. A diferenciação entre ambos depende da força de cisalhamento a ser transmitida na interface concreto/aço. No primeiro caso a força para garantir a interação total é igual resistência à tração do perfil de aço (linha neutra na laje de concreto). Já no segundo caso esta força é igual à resistência da laje de concreto em compressão (linha neutra no perfil de aço). De acordo com a Norma Canadense [57], o grau mínimo de interação permitido em ambos os caso é igual a 0,5.

### 2.1.2.1

#### Interação parcial - linha neutra na laje de concreto

A Figura 2.10 (a) apresenta uma viga mista em que, na hipótese de interação total, a linha neutra se situa na laje de concreto. Nesse caso, se o processo de interação parcial for utilizado, a força na interface será menor que seu valor original igual a resistência a tração do perfil de aço. Isso faz com que a

componente em compressão da laje de concreto diminua e, conseqüentemente, para garantir o equilíbrio, parte das tensões do perfil que antes estavam somente em tração passem a estar sob compressão conforme mostra a Figura 2.10 (b). É interessante notar que duas linhas neutras ocorrem devido à possibilidade de deslizamento entre os materiais. A primeira,  $a_1$ , divide as regiões em compressão e tração da laje de concreto enquanto a segunda linha neutra  $a_2$ , exerce a mesma função no perfil de aço. É importante notar que dependendo da relação entre as propriedades físicas e geométricas dos materiais envolvidos é possível que a linha neutra, no caso de interação parcial,  $a_2$ , se situe na alma do perfil de aço. Neste caso deve-se utilizar o processo de dimensionamento descrito na próxima seção.

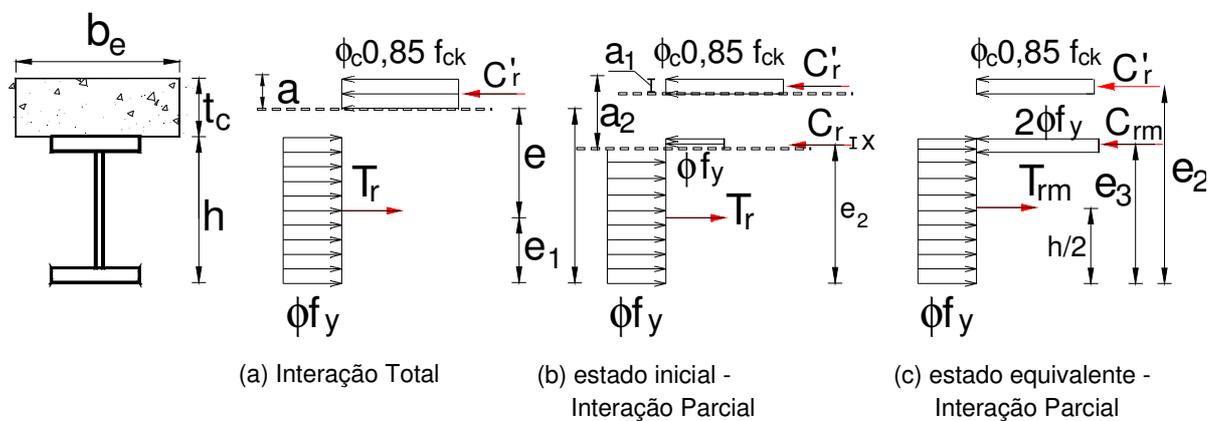


Figura 2.10 – Interação parcial - força na interface concreto/aço igual à resistência à tração do perfil de aço [120]

A partir da escolha do número de conectores a ser utilizado,  $\eta$ , pode-se avaliar a força máxima resistida na interface concreto aço,  $Q_r$ , e o grau de interação  $\alpha$  através das equações (2.35) e (2.36):

$$Q_r = \eta q_n \quad (2.35)$$

$$\alpha = \frac{\eta q_n}{L_{cs}} = \frac{\eta q_n}{\phi A_g f_y} \leq 0,5 \quad (2.36)$$

A componente resistente em compressão da laje de concreto é dada por:

$$C'_r = Q_r = \eta q_n \quad (2.37)$$

Usando conceitos simples de equilíbrio obtêm-se as equações (2.38) e (2.39).

$$T_r = C_r + C_r' \quad (2.38)$$

$$T_r = \phi A_g f_y - C_r \quad (2.39)$$

Substituindo as equações (2.37) e (2.38) na equação (2.39), obtêm-se o valor para a parcela de aço sujeita a compressão,  $C_r$ :

$$C_r = \frac{\phi A_g f_y - Q_r}{2} = \frac{\phi A_g f_y - \eta q_n}{2} \quad (2.40)$$

Já a parcela do aço sujeita a tração passa a ser dada por:

$$T_r = C_r' + C_r = \frac{\phi A_g f_y + Q_r}{2} = \frac{\phi A_g f_y + \eta q_n}{2} \quad (2.41)$$

Para que a linha neutra,  $a_2$ , se situe na mesa superior da viga de aço é necessário que:

$$C_r \leq \phi f_y b_f t_f \quad (2.42)$$

Se esta condição não for atendida a linha neutra estará situada na alma da viga de aço cujo dimensionamento será descrito no próximo item. Se a inequação (2.42) for atendida pode-se avaliar as posições das linhas neutras através de:

$$a_1 = \frac{C_r'}{\phi_c 0,85 b_e f_{ck}} = \frac{\eta q_n}{\phi_c 0,85 b_e f_{ck}} \quad (2.43)$$

$$a_2 = t_c + x \quad \text{onde} \quad x = \frac{C_r}{\phi b_f f_y} \quad (2.44)$$

Usando o processo de cálculo alternativo para a resistência a flexão de vigas mistas com o conceito de diagrama de esforços equivalentes mostrado na Figura 2.10.c, pode-se avaliar o momento resistente da viga mista:

$$M_r^{IP} = C_r' e_2 + C_m e_3 - T_m \left( \frac{h}{2} \right) \quad (2.45)$$

onde:

$$C_m = 2 C_r \quad T_m = \phi A_g f_y \quad (2.46)$$

$$e_2 = h + t_c - \left( \frac{a_1}{2} \right) \quad (2.47)$$

$$e_3 = h - \frac{a_2 - t_c}{2} \quad (2.48)$$

### 2.1.2.2

#### Interação parcial - linha neutra no perfil de aço

A Figura 2.11 (a) apresenta uma viga mista em que, na hipótese de interação total, a linha neutra se situa no perfil de aço. Nesse caso, se o processo de interação parcial for utilizado, a força na interface será menor que seu valor original igual à resistência a compressão da laje de concreto. Isso faz com que a componente em compressão da laje de concreto diminua e para garantir o equilíbrio, é necessário que uma parcela maior das tensões do perfil de aço esteja sobre compressão Figura 2.11 (b). Mais uma vez duas linhas neutras  $a_1$  e  $a_2$  estão presentes devido a possibilidade de deslizamento entre os materiais. Deve-se observar que, dependendo da relação entre as propriedades físicas e geométricas dos materiais envolvidos, é possível que a linha neutra, no caso de interação parcial,  $a_2$ , se situe ainda na mesa superior do perfil de aço.

Mais uma vez a partir da escolha do número de conectores a ser utilizado,  $\eta$ , pode-se avaliar a força máxima resistida na interface concreto aço,  $Q_r$ , e o grau de interação  $\alpha$  através das equações (2.49) e (2.50):

$$Q_r = \eta q_n \quad (2.49)$$

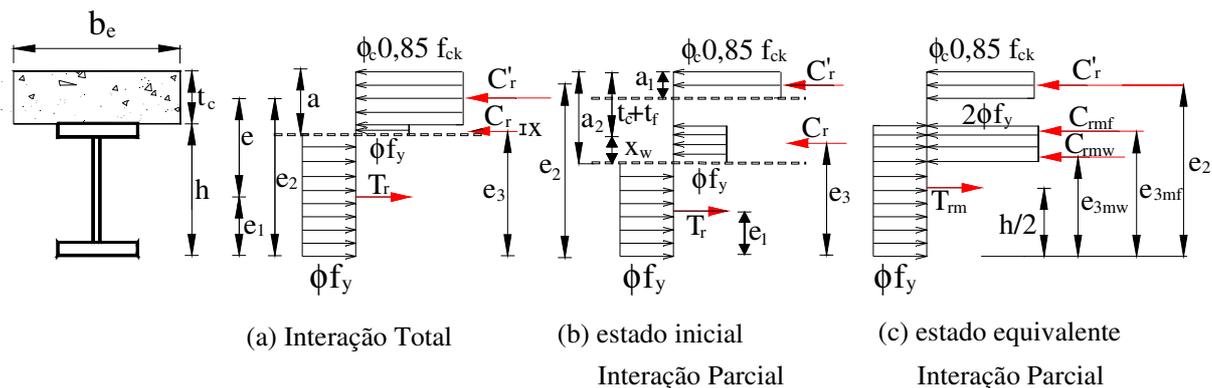


Figura 2.11 – Interação parcial - força na interface concreto/aço igual à resistência à compressão da laje de concreto [120]

$$\alpha = \frac{\eta q_n}{L_{cs}} = \frac{\eta q_n}{\phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c} \leq 0,5 \quad (2.50)$$

A componente em compressão resistida pela laje de concreto é dada por:

$$C_r' = Q_r = \eta q_n \quad (2.51)$$

Usando os mesmos conceitos simples de equilíbrio gera-se as equações (2.52) e (2.53).

$$T_r = C_r + C_r' \quad (2.52)$$

$$T_r = \phi A_g f_y - C_r \quad (2.53)$$

Substituindo as equações (2.51) e (2.52) na equação (2.53) obtêm-se o valor para a parcela de aço sujeita a compressão,  $C_r$ :

$$C_r = \frac{\phi A_g f_y - Q_r}{2} = \frac{\phi A_g f_y - \eta q_n}{2} \quad (2.54)$$

Já a parcela do aço sujeita a tração passa a ser dada por:

$$T_r = C_r + C_r' = \frac{\phi A_g f_y + Q_r}{2} = \frac{\phi A_g f_y + \eta q_n}{2} \quad (2.55)$$

Como neste caso a linha neutra se situa na alma da viga de aço é necessário que:

$$C_r > \phi f_y b_f t_f \quad (2.56)$$

Se esta condição não for atendida a linha neutra estará situada na mesa superior da viga de aço. Se a inequação (2.56) for atendida pode-se avaliar as posições das linhas neutras através de:

$$a_1 = \frac{C_r'}{\phi_c 0,85 b_e f_{ck}} = \frac{\eta q_n}{\phi_c 0,85 b_e f_{ck}} \quad (2.57)$$

$$a_2 = t_c + t_f + x_w$$

$$\text{onde } x = \frac{C_r - \phi b_f t_f f_y}{\phi t_w f_y} \quad (2.58)$$

Mais uma vez faz-se uso do o conceito de diagrama de esforços equivalente mostrado na Figura 2.11. Considera-se a parcela de aço tracionada totalmente plastificada agindo sobre a área total do perfil enquanto a parcela de aço comprimida estará sujeita a uma tensão igual ao dobro da tensão de escoamento. Desta forma o momento resistente da viga mista pode ser avaliado com o auxílio da equação (2.59).

$$M_r^{IP} = C_r' e_2 + C_{rmf} e_{3mf} + C_{rmw} e_{3mw} - T_{rm} \left( \frac{h}{2} \right) \quad (2.59)$$

onde:

$$C_{rmf} = 2 \phi b_f t_f f_y \quad (2.60)$$

$$C_{rmw} = 2 C_r - C_{rmf} \quad (2.61)$$

$$T_{rm} = \phi A_g f_y \quad (2.62)$$

$$e_2 = h + t_c - \left( \frac{a_1}{2} \right) \quad (2.63)$$

$$e_{3mf} = h - \frac{t_f}{2} \quad (2.64)$$

$$e_{3mw} = h - \frac{a_2 - (t_c + t_f)}{2} \quad (2.65)$$

## 2.2 Conectores de cisalhamento

A grande vantagem da construção mista está associada a uma solidarização eficaz existente entre o aço e o concreto. Esta conexão mecânica, que possibilita uma transferência de esforços de cisalhamento entre os dois materiais, é que confere a este tipo de construção um comportamento singular.

O cisalhamento horizontal na interface concreto aço, deve ser adequadamente dimensionado de forma a garantir uma compatibilidade de deformações e gerar a ação mista. Essa transferência de esforços é executada através de conectores de cisalhamento soldados a mesa superior da viga de aço. Esses conectores são imersos no concreto ainda líquido e, após a pega do mesmo, são submetidos a esforços de esmagamento à medida que o carregamento é imposto à estrutura. Um cobrimento adequado deve ser executado de forma a garantir que a face superior dos conectores esteja totalmente imersa no concreto evitando um estado de fissuração indesejada.

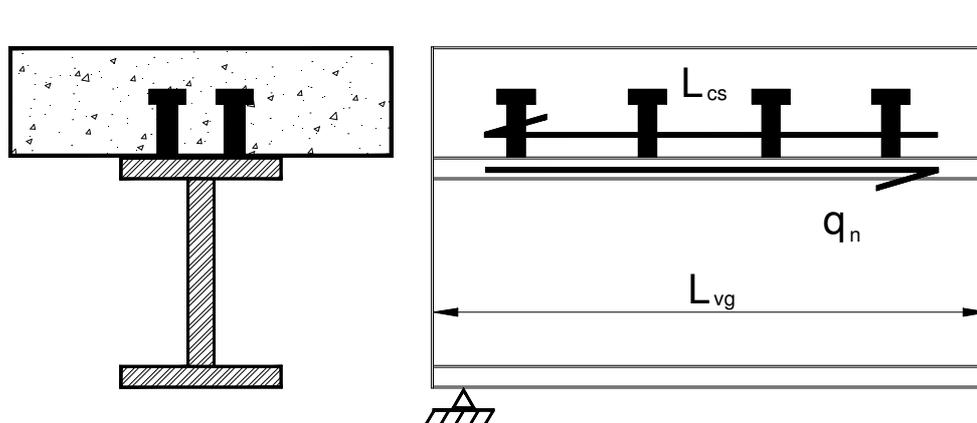


Figura 2.12 – Ação de conectores de cisalhamento em vigas mistas

Diversos tipos de conectores de cisalhamento vêm sendo utilizados para garantir a transmissão dos esforços entre a laje de concreto e a viga de aço, dos quais alguns exemplos são apresentados na Figura 2.13.

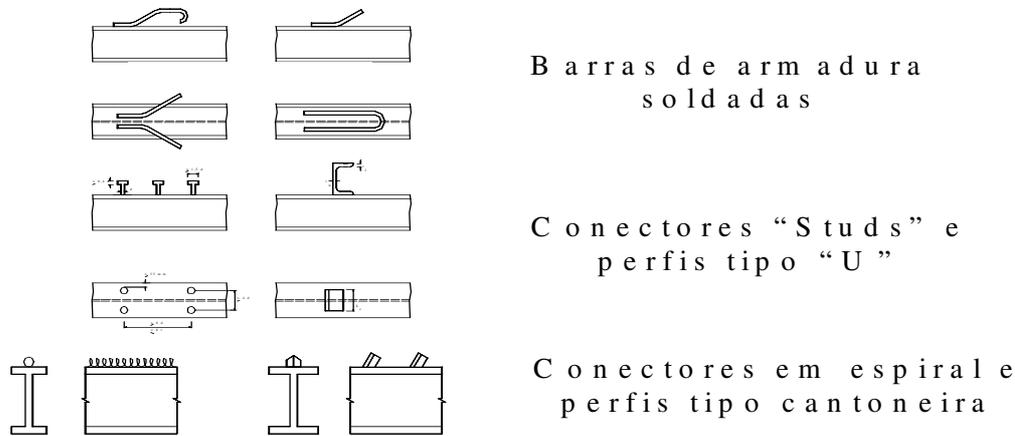


Figura 2.13 – Tipos de conectores de cisalhamento em vigas mistas [4]

Uma das primeiras tentativas utilizou barras de armadura soldadas à mesa superior da viga de aço. Outras tentativas incluíram o uso de barras com espirais, perfis tipo "U" e cantoneiras soldadas. Os EUA e a União Européia e mesmo aqui no Brasil, utilizam como conectores de cisalhamento um tipo especial de parafuso sem rosca denominado "stud". Esse tipo de conector de pino é geralmente soldado através do deck-metálico com o uso de uma máquina de solda especial de grande amperagem. Os "studs" geralmente tem de 14mm a 22mm de diâmetro e 75mm de comprimento.

### 2.2.1 Resistência dos conectores de cisalhamento

Conforme mencionado anteriormente, a resistência dos conectores de cisalhamento está diretamente relacionada com a capacidade de transmissão dos esforços de cisalhamento na interface concreto-aço. No cálculo de vigas mistas, a relação entre força de cisalhamento no conector e deslocamento relativo entre a viga de aço e a laje de concreto consiste um dos aspectos de grande interesse para o dimensionamento. Essa relação é mais representativa quando obtida por meio de ensaios experimentais, porém, diversas normas como o EUROCODE4 [59] e a BRITISH STANDARDS INSTITUTION-BS5400 [60] utilizam ensaios em modelos experimentais isolados, denominado de "Push-

out", para determinação dessa relação. A Figura 2.14 ilustra o modelo para o ensaio *Push-out* proposto pelo EUROCODE4 [59].

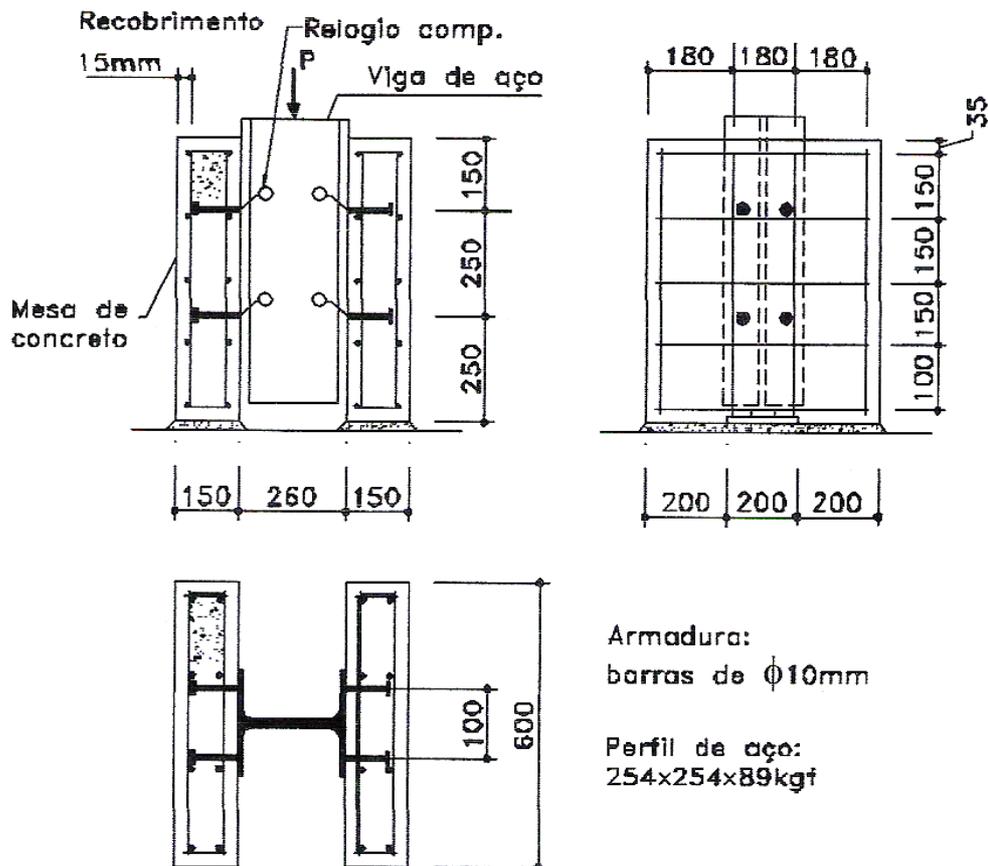


Figura 2.14 – Modelo do ensaio tipo "Push-out" proposto pelo EUROCODE 4 [59]

Vale ressaltar que, segundo o EUROCODE 4 [59], existem modelos para o ensaio de cisalhamento (*Push-out*) dos tipos normalizado e específico. Se os conectores utilizados na viga mista estão imersos em laje de concreto maciça ou em laje com formas de aço incorporadas, ambas com espessuras uniformes, podem ser utilizados os ensaios de cisalhamento normalizados, caso contrário, utilizam-se os ensaios de cisalhamento específicos. O modelo ilustrado na Figura 2.14 corresponde ao ensaio de cisalhamento normalizado. No modelo de ensaio, deve-se eliminar a aderência entre a mesa da viga de aço e a laje de concreto utilizando, por exemplo, a graxa. O deslocamento relativo entre o perfil metálico e as duas lajes de concreto é medido por meio de relógios comparadores, conforme Figura 2.14, o que possibilita obter o deslocamento médio em correspondência com a força no conector.

Segundo o EUROCODE 4 [59], para a realização do ensaio tipo "Push-out" devem ser respeitados os seguintes procedimentos:

- Inicialmente aplica-se a força no modelo com força que variam entre 5% e 40% da força de ruptura esperada. A partir daí, os intervalos até alcançar 40 % da força de ruptura esperada. Posteriormente, aplicam-se 25 ciclos incrementos de força seguintes que devem ser aplicados de modo a não provocar ruptura antes de um período de 15 minutos.
- O deslocamento longitudinal entre laje de concreto e viga de aço é monitorado em todo o processo da aplicação da força, desde o início do carregamento até ser atingida a força máxima. Na seqüência, o deslocamento permanece sendo monitorado até que o carregamento decresça em 20% do valor de força máxima. Deve-se também monitorar próximo de cada grupo de conectores a separação transversal entre mesa e laje.

No capítulo 3, são discutidos os critérios de projeto utilizados para minimizar os efeitos de vibrações e são apresentados os procedimentos adotados pelas principais normas.