

3 Sistema Proposto de Vigas Mistas Pré-fabricadas

Neste capítulo é apresentado o modelo proposto de viga mista. Inicialmente é feita uma descrição do sistema misto, abordando-se suas características e uso em projeto. Então, é mostrado o modo de fabricação das vigas, e discutidas as vantagens proporcionadas pelo sistema. Também, é apresentado um modelo de cálculo para resistência última a flexão baseada na norma canadense CAN/CSA-S16-10. Com os resultados obtidos, é feito um estudo paramétrico para o modelo proposto.

3.1. Descrição do Sistema

O sistema consiste em vigas mistas pré-fabricadas com formato duplo T. Os elementos são formados por duas vigas mistas, unidas pela pré-laje de concreto. As nervuras do duplo T são constituídas pela metade de uma viga celular formada a partir de um perfil I laminado, parcialmente embutido na laje de concreto. O modelo de um elemento é mostrado na Figura 3.1.

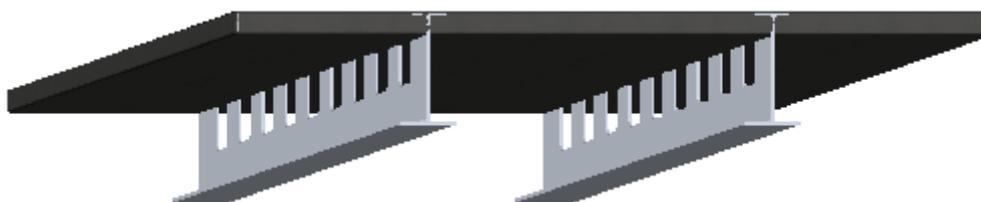


Figura 3.1 - Viga mista no formato duplo T.

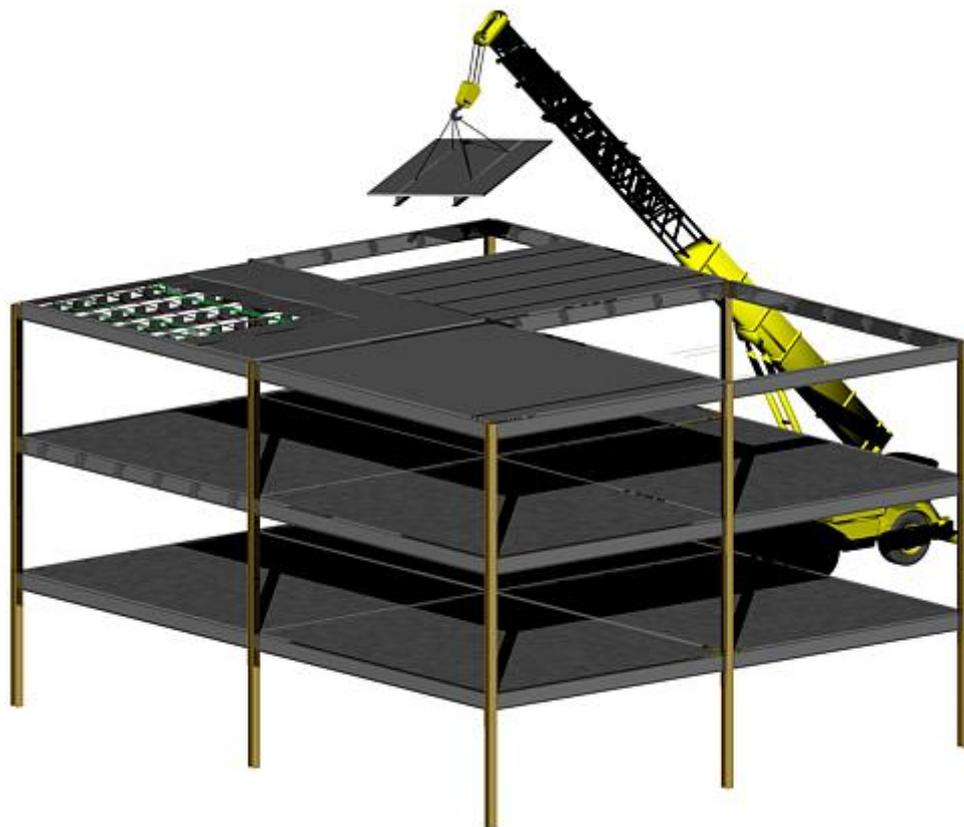


Figura 3.2 - Montagem das vigas mistas em um edifício.

Dentro do esquema estrutural de um projeto, essas vigas são utilizadas biapoiadas em vigas principais. Os elementos são aplicados sucessivos e paralelamente para suporte do piso, ver Figura 3.2. Após a montagem das vigas na obra, é feito um capeamento de concreto armado para solidarizar e dar rigidez ao conjunto.

Estes elementos mistos são produzidos na fábrica e transportados até o local onde são ligados por meio de parafusos à viga principal, Figura 3.3.

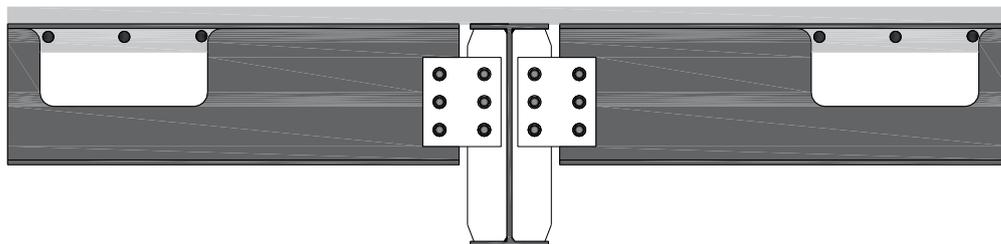


Figura 3.3 - Possibilidade de ligação entre a viga mista e a viga principal.

3.2. Fabricação da Viga Mista

Na criação de uma nova viga mista, primeiramente devem ser produzidos os perfis metálicos. Para isso, é utilizada a metade de uma viga laminada, cortadas por máquina corte a laser, Figura 3.4. Após isso, uma chapa metálica é soldada à viga no topo da alma, criando um novo perfil, menor e assimétrico, como mostrado na Figura 3.5. Com esta etapa pronta, pode ser dada uma contra flecha ao novo perfil para compensação dos deslocamentos devido os esforços permanentes.

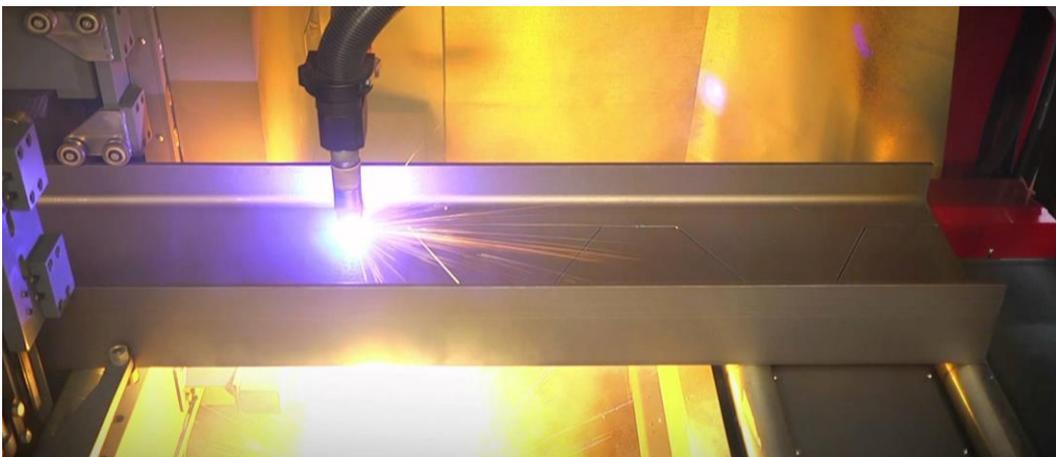


Figura 3.4 - Máquina corta laser (Fonte: Voortman).

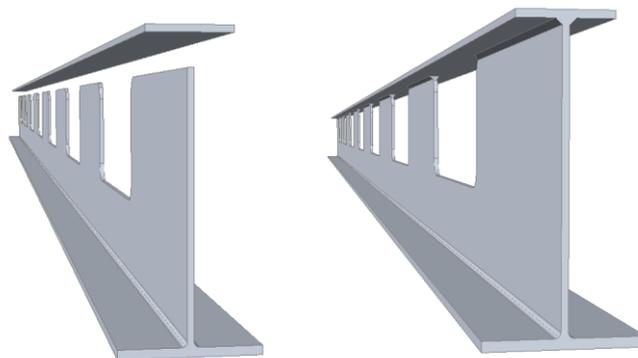


Figura 3.5 - Perfil celular com chapa soldada no topo.

O sistema misto pré-fabricado é feito em série dentro de uma fábrica. A concretagem é realizada de cabeça para baixo. Para isso, formas metálicas, com as dimensões da laje, são preparadas, e os perfis metálicos são posicionados no meio da forma, com a menor mesa voltada para baixo. Feito isso, armaduras transversais são dispostas nas aberturas e a malha de aço é colocada na região

superior. O perfil metálico é embutido em toda a laje, com espessura de 50 mm, faceando com o concreto.

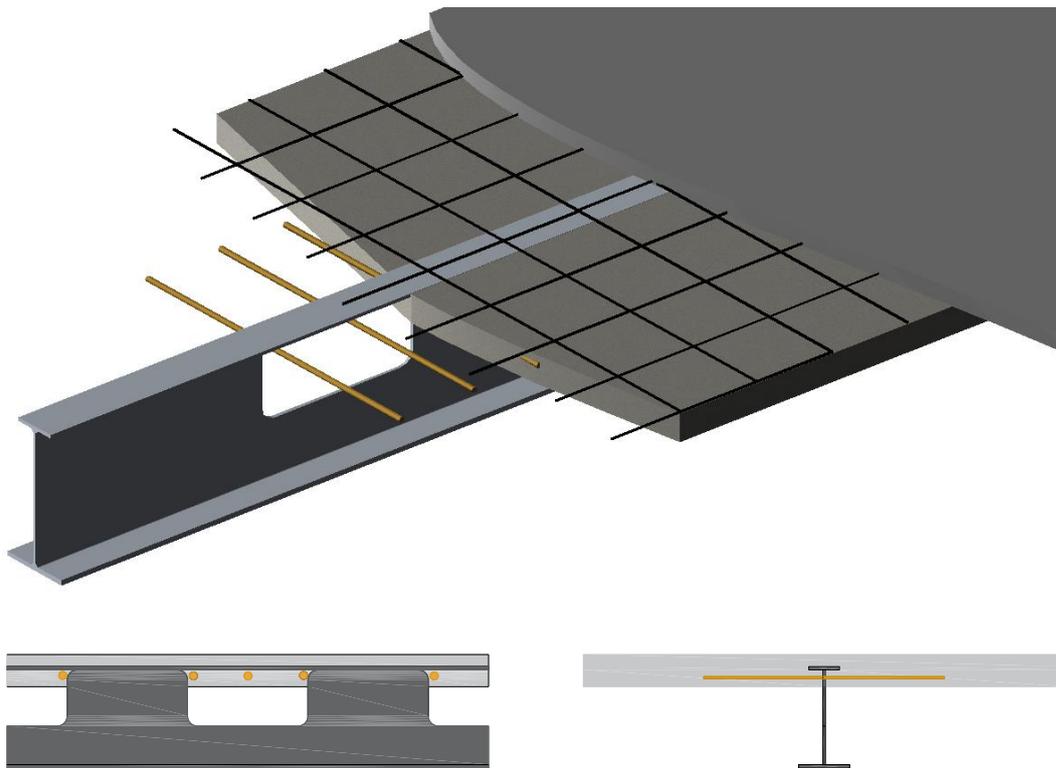


Figura 3.6 - Sistema de piso utilizando perfis celulares embutidos no concreto.

A viga metálica parcialmente embutida no concreto é mostrada na Figura 3.6. A ação mista, entre a viga metálica e a laje de concreto, é obtida por meio da resistência na interface entre o aço e o concreto e pelas aberturas que são parcialmente preenchidas com armaduras transversais e pelo concreto. Desta forma, não é necessário o uso de conectores de cisalhamento como stud bolt.

3.3. Vantagens e Desvantagens do Sistema

As vantagens deste sistema são inúmeras, mas são destacadas as principais:

- Rapidez: o tempo para que o piso esteja pronto depende somente da montagem dos painéis e execução da capa de concreto.
- Qualidade: as vigas mistas são produzidas em condições que permitem maior controle, acabamento e controles específicos dos materiais. As dimensões também são previstas com o mínimo de erro. A qualidade não é apenas uma vantagem, mas uma regra.

- Economia: sob a produção industrial as perdas de material se tornam muito menores, além da diminuição da mão de obra empregada. Também existe a eliminação da necessidade de escoras durante a construção.
- Conforto acústico e térmico: A capacidade de isolamento de ruídos propagados no ar depende da massa dos painéis por m^2 . Assim, os pisos de concreto podem facilmente atender aos requisitos mínimos de desempenho para isolamento de ruídos com propagação atmosférica. Além do mais, existe a possibilidade do uso de materiais isolantes entre os perfis metálicos.
- Resistência: A viga de aço está embutida na laje de concreto, fornecendo resistência extra ao fogo e permitindo estabilizar a região em compressão, da viga metálica.
- Integração com outros sistemas: As aberturas nas vigas mistas permitem a passagem das instalações prediais em todas as direções. Este fato proporciona uma boa flexibilidade aos projetistas no uso dos espaços. Além, de facilitar a realização da manutenção.
- Padronização: a padronização é um processo amplamente difundido na pré-fabricação. Ele proporciona a adoção de uma variação nas seções transversais e comprimentos apropriados para cada tipo de projeto.
- Modulação: Utilizando painéis já padronizados, os projetos podem ser pensados por meio de módulos. Assim, o projetista pode selecionar o comprimento, as dimensões e a capacidade de carga dentro de certos limites.

Entre as desvantagens está a limitação do tamanho e a forma desses elementos pré-fabricados pelas condições de produção, transporte e içamento. Também se podem destacar possíveis problemas apresentados pelo sistema estrutural com conforto humano e vibrações excessivas.

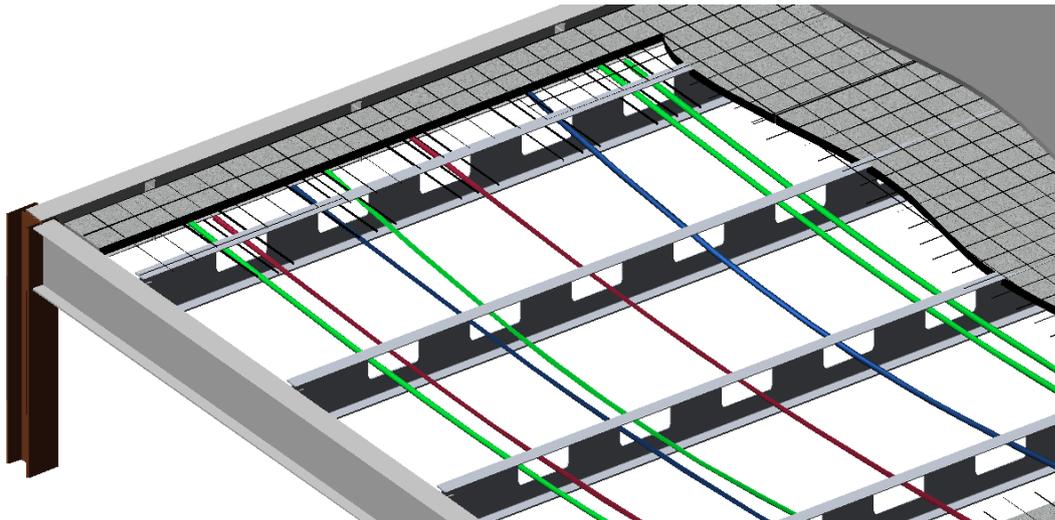


Figura 3.7 - Detalhe da passagem de dutos pelas aberturas na alma do perfil.

3.4. Modelo de Cálculo

O cálculo da resistência nominal da viga mista foi feito na seção com abertura na alma do perfil. Segundo Lawson et al. (2011), para vigas celulares, a resistência à flexão em uma abertura é o caso de projeto mais crítico, em vez da seção não perfurada.

Este modelo de cálculo apresenta uma abordagem simplificada para o modelo de viga mista proposta, não avaliando todos os parâmetros que influenciam na resistência de vigas mistas com aberturas de alma. Na literatura, podem ser encontradas recomendações de projeto para vigas mistas com aberturas retangulares de alma (Darwin, 1990; Redwood & Cho, 1993; Chung & Lawson, 2001).

3.4.1. Resistência ao Cisalhamento Vertical

Para o cálculo da resistência ao esforço cortante, é considerado que a alma do perfil de aço suporta todo o cisalhamento vertical, na seção mista com abertura. O procedimento para determinação da força cortante resistente de cálculo é feito segundo a NBR 8800: 2008.

3.4.2. Mecanismo de Transferência de Forças Horizontais

Conectores de cisalhamento não são utilizados para o modelo proposto. Por outro lado, a resistência horizontal é obtida através do preenchimento das aberturas do perfil pelo concreto, combinado com a adição de armaduras transversais nas aberturas. Segundo Chen et al. (2015), a força de aderência produzida na interface entre o aço e o concreto é muito pequena e está propensa à ruptura sob carregamentos baixos. Por isso, é essencial assegurar uma interação efetiva entre os dois materiais. Para o caso do uso de perfis celulares, Lawson (2006) recomenda que o grau de interação seja no mínimo de 50% e deverá ser atingida em cada posição do perfil com abertura.

O modelo de conexão entre o aço e o concreto utilizado neste trabalho possui o mesmo princípio que um conector perfobond. O mecanismo de transferência de forças é demonstrado na Figura 3.8.

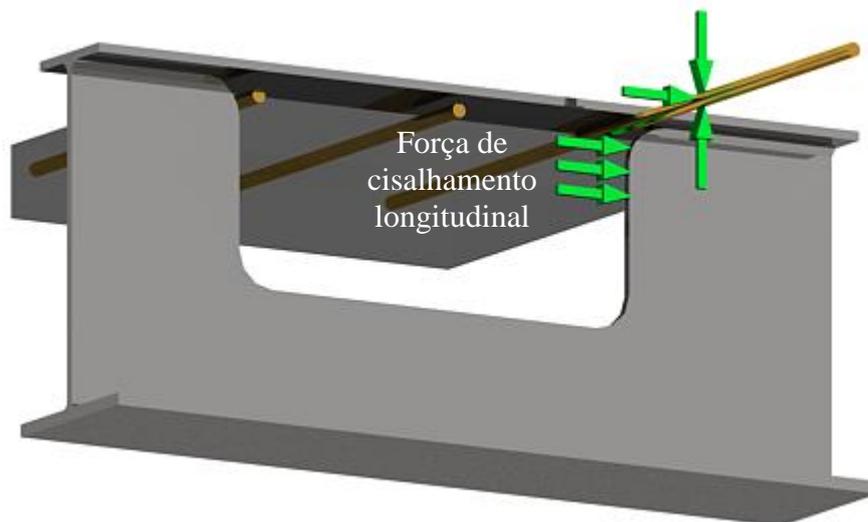


Figura 3.8 - Mecanismo de transferência de forças entre o aço e o concreto.

A resistência ao cisalhamento longitudinal ocorre principalmente na interface entre o concreto e a alma do perfil. A pequena espessura da alma produz uma força concentrada no concreto. Entretanto, a rigidez da armadura transversal próximo à alma auxilia significativamente, contribuindo no confinamento do concreto na região.

3.4.3. Resistência Última à Flexão

A resistência à flexão deste sistema misto foi determinada segundo o cálculo padrão para vigas mistas baseando-se na norma canadense CAN/CSA-S16-10, e considerando modificações para atender ao modelo proposto.

A capacidade última à flexão das vigas mistas foi calculada em regime plástico e depende do nível de conexão na interface aço-concreto, da resistência à compressão da laje de concreto (caso a linha neutra caia no perfil de aço, a resistência à compressão do aço deverá ser levada em consideração), e da resistência ao escoamento do perfil de aço. Existem três modos de ruptura por flexão:

- ruptura por cisalhamento na interface aço-concreto;
- esmagamento do concreto;
- escoamento da seção de aço.

Os estados limites de projeto de vigas mistas exigem um projeto que satisfaça o critério de resistência e estabilidade, de tal modo que, a resistência fatorada sob a condição de estado limite último seja maior, ou igual, às forças externas fatoradas.

Por equilíbrio de forças, utilizando-se o diagrama de tensões uniforme, e desprezando-se a resistência do concreto a tração, o momento resistente de projeto, M_{Rd} , para o modelo proposto na seção transversal com abertura, é dado pelo seguinte procedimento de cálculo:

- Divisão da seção em blocos;
- Localização da Linha Neutra Plástica (LNP) por equilíbrio de forças;
- Determinação do momento resistente (M_{Rd}) através do produto Força x Braço em relação a LNP.

A linha neutra plástica da seção mista pode ser encontrada comparando-se a resistência à compressão da laje de concreto acima do perfil, $0,85 \cdot \phi_c \cdot b_c \cdot t_c \cdot f_{ck}$, e a resistência à tração do tê inferior na região com abertura do perfil de aço, $\phi \cdot A_{sb} \cdot f_y$, onde.

ϕ_c - coeficiente de resistência do concreto; 0,65;

ϕ - coeficiente de resistência do aço; 0,90;

b_c - largura efetiva da laje de concreto;

t_c - altura da laje de concreto acima do perfil;

f_{ck} - resistência característica à compressão do concreto;

A_{sb} - área da seção transversal do tê inferior do perfil de aço com abertura;

f_y - resistência ao escoamento do perfil de aço;

1) Linha Neutra no Concreto (interação total)

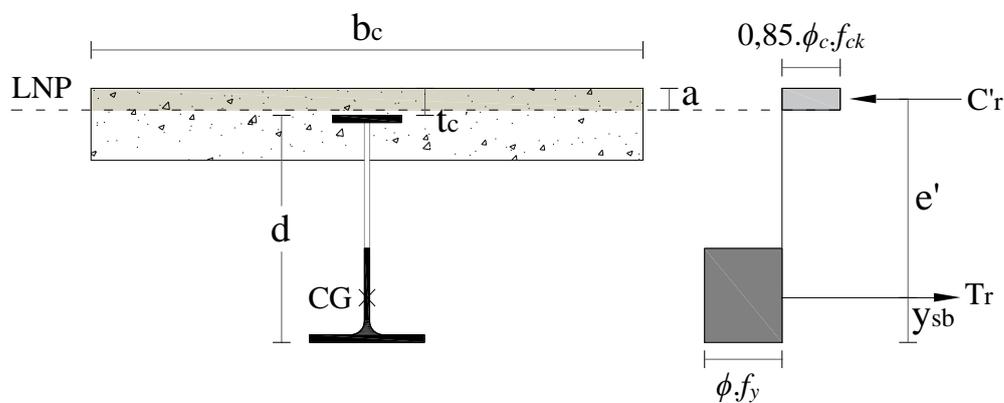


Figura 3.9 - Modelo de cálculo da viga mista quando a linha neutra plástica cai sobre a espessura da laje acima do perfil.

Se $\phi \cdot A_{sb} \cdot f_y$ é menor que $0,85 \cdot \phi_c \cdot b_c \cdot t_c \cdot f_{ck}$, a linha neutra plástica encontra-se no concreto como mostrado na Figura 3.9. A capacidade última à flexão é encontrada quando o perfil de aço estiver em escoamento total.

A altura de concreto em compressão, “a”, pode ser encontrada igualando-se o componente em compressão com o componente em tração.

$$0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot b_c \cdot a = \phi \cdot A_{sb} \cdot f_y$$

Isolando “a”,

$$a = \frac{\phi \cdot A_{sb} \cdot f_y}{0,85 \cdot \phi_c \cdot b_c \cdot f_{ck}} \quad (3.1)$$

Para este caso o valor de “a” deverá ser menor ou igual a “ t_c ”.

O momento resistente último pode ser calculado encontrando o braço de alavanca interno, e' , como:

$$M_{Rd} = e' \cdot \phi \cdot A_{sb} \cdot f_y \quad (3.2)$$

Em que,

$$e' = d + t_c - y_{sb} - \frac{a}{2} \quad (3.3)$$

Onde:

d é altura do perfil celular;

y_{sb} é a distância do centro de gravidade da região tracionada até a face inferior do perfil.

2) Linha Neutra no Perfil de Aço (interação total)

Quando a linha neutra cai sobre o perfil de aço podem surgir duas situações: LNP na mesa de aço e LNP na alma do perfil. Nestes casos, embora a linha neutra atinja o perfil, a área de concreto comprimida também aumenta fazendo com que a resistência da seção continue sendo governada pelo escoamento do aço em tração.

$$0,85 \cdot \phi_c \cdot b_c \cdot t_c \cdot f_{ck} < \phi \cdot A_{sb} \cdot f_y$$

A força fatorada de compressão no concreto acima do perfil é calculada como,

$$C'_r = 0,85 \cdot \phi_c \cdot b_c \cdot t_c \cdot f_{ck} \quad (3.4)$$

A força resistente à compressão no perfil metálico e na região de concreto adjacente ao perfil é dada por,

$$C_r = \frac{\phi \cdot A_{sb} \cdot f_y - C'_r}{2} \quad (3.5)$$

a) Linha Neutra na Mesa de Aço quando,

$$C_r \leq \phi \cdot b_s \cdot t_s \cdot f_y + 0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot (b_c - b_s) \cdot t_s$$

Onde:

b_s é a largura da mesa superior do perfil;

t_s é a espessura da mesa superior do perfil.

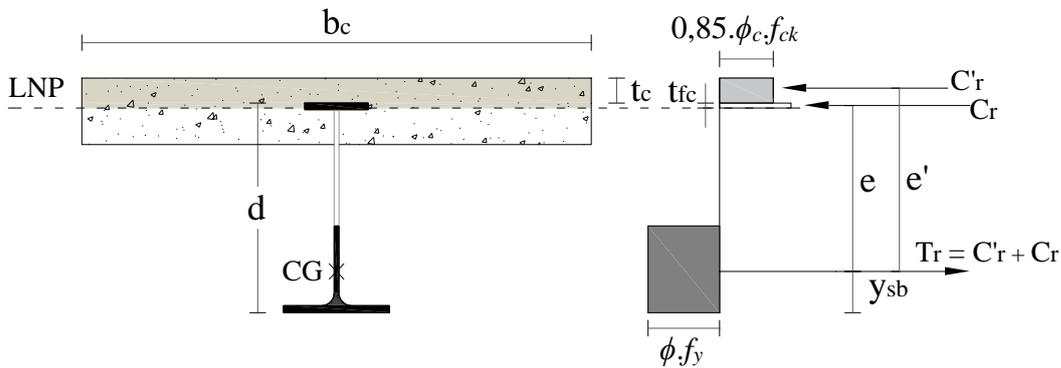


Figura 3.10 - Modelo de cálculo com linha neutra plástica atingindo a mesa do perfil metálico.

Como o perfil encontra-se embutido no concreto, além da contribuição do aço na compressão, existe também um acréscimo da área de concreto, como visto na Figura 3.10. O momento fletor resistente pode ser calculado encontrando as forças de compressão na região de concreto acima do perfil, C_r' , e adicional resistência à compressão devida o acréscimo na área de concreto e inclusão da chapa de aço, C_r , e seus respectivos braços, e' e e .

$$e = d - y_{sb} - \frac{t_{fc}}{2} \quad (3.6)$$

$$e' = d + \frac{t_c}{2} - y_{sb} \quad (3.7)$$

Onde:

$$t_{fc} = \frac{C_r}{\phi \cdot b_s \cdot f_y + 0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot (b_c - b_s)} \quad (3.8)$$

$$M_{Rd} = C_r' \cdot e' + C_r \cdot e \quad (3.9)$$

b) Linha Neutra na Alma do Perfil com abertura quando,

$$C_r > \phi \cdot b_s \cdot t_s \cdot f_y + 0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot (b_c - b_s) \cdot t_s$$

Neste caso, como a seção transversal possui uma abertura na região da alma, a região comprimida será composta somente pela laje de concreto e a chapa de aço como mostrado na Figura 3.11.

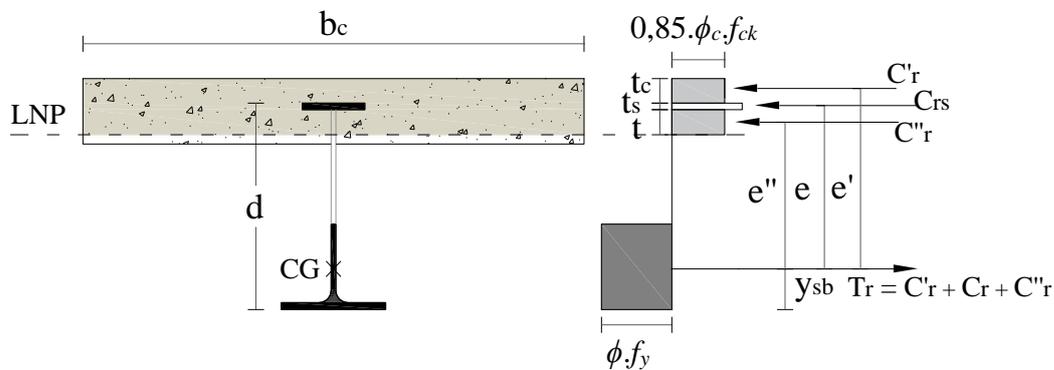


Figura 3.11 - Modelo de cálculo com linha neutra plástica sobre o concreto abaixo da mesa do perfil metálico.

A força de compressão na chapa de aço e na região de concreto ao lado é dada por,

$$C_{rs} = \phi \cdot f_y \cdot b_s \cdot t_s + 0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot (b_c - b_s) \cdot t_s \quad (3.10)$$

A força de compressão na região de concreto abaixo da chapa de aço é dada por,

$$C''_r = C_r - C_{rs} \quad (3.11)$$

As distâncias entre a força de tração no perfil e cada força de compressão na laje de concreto e na mesa superior é calculada como:

$$e = d - y_{sb} - \frac{t_s}{2} \quad (3.12)$$

$$e' = d + \frac{t_c}{2} - y_{sb} \quad (3.13)$$

$$e'' = d - y_{sb} - t_s - \frac{t}{2} \quad (3.14)$$

Onde:

$$t = \frac{C''_r}{0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot b_c} \quad (3.15)$$

Encontrando as forças de compressão e os braços, tem-se,

$$M_{Rd} = C'_r \cdot e' + C_{rs} \cdot e + C''_r \cdot e'' \quad (3.16)$$

3.5. Estudo Paramétrico dos Resultados Teóricos

Por meio do procedimento de cálculo, foi desenvolvido um estudo paramétrico variando o perfil W original utilizado, a largura efetiva da laje e o vão. A chapa de aço soldada a alma do perfil foi a mesma em todos os modelos, já que não possui uma influência relevante na resistência última. Também não variou a espessura da laje, permanecendo com 80 mm.

As dimensões das aberturas no perfil metálico foram baseadas nas propriedades de uma viga metálica castelada Litzka, com dimensões proporcionalmente determinadas, como mostrado na Figura 3.12.

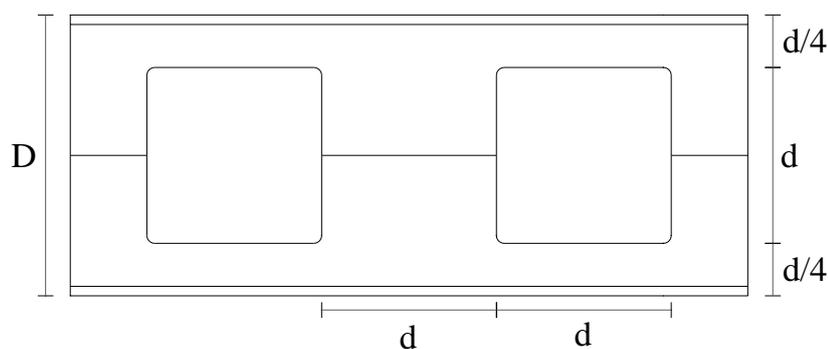


Figura 3.12 - Dimensões proporcionalmente determinadas para uma viga castelada, adaptado de Grünbauer.

Segundo Grünbauer a taxa da altura, $\frac{D}{d}$, é ajustada para 1,5, ou seja, a altura D da viga castelada é uma vez e meia a altura do perfil original antes do corte, d. A profundidade da abertura é d, e a maior largura da abertura da alma também é d. A altura do tampo inferior é igual a $\frac{d}{4}$.

Para o estudo foram escolhidos os perfis laminados W de primeira alma para cada série. Exemplo, na série W 200 o perfil escolhido foi o W 200 X 15. Esse é o perfil original que após o processo de corte e solda, produzirá um novo perfil denominado de $\frac{1}{2}$ W. Na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, mostra as dimensões e propriedades, respectivamente, para cada perfil segundo a Figura 3.13.

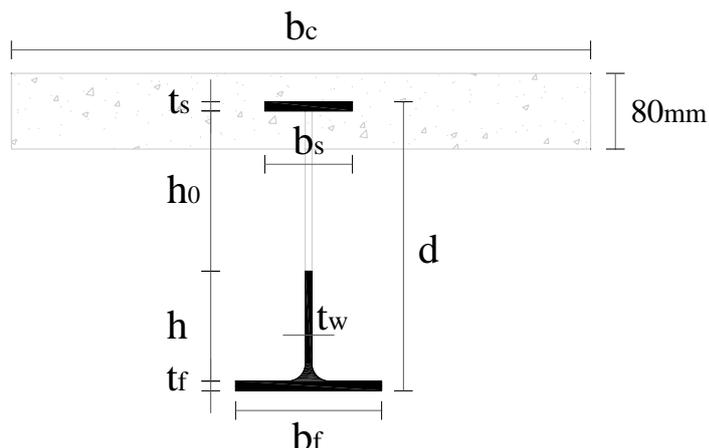


Figura 3.13 - Dimensões de uma viga mista com 1/2 Perfil W.

Tabela 3.1 - Dimensões do Perfil

Perfil	Massa kg/m	d mm	b _s mm	t _s mm	b _f mm	t _f mm	t _w mm	h mm	h _o mm
1/2W200x15	11,3	156,3	76,2	6,3	100	5,2	4,3	44,8	100
1/2W250x17,9	12,7	194,6	76,2	6,3	101	5,3	4,8	57,5	125,5
1/2W310x21	14,3	233,6	76,2	6,3	101	5,7	5,1	70,0	151,5
1/2W360x32,9	20,2	268,0	76,2	6,3	127	8,5	5,8	78,8	174,5
1/2W410x38,8	23,2	305,6	76,2	6,3	140	8,8	6,4	91	199,5
1/2W460x52	29,8	343,8	76,2	6,3	152	11	7,6	101,7	225

Tabela 3.2 - Propriedades do Perfil

Perfil	A _s cm ²	y _s cm	I _s cm ⁴	W cm ³
1/2W200x15	11,93	6,72	605,35	90,04
1/2W250x17,9	12,91	7,95	982,15	123,50
1/2W310x21	14,13	8,97	1485,21	165,51
1/2W360x32,9	20,16	7,62	2329,28	305,72
1/2W410x38,8	22,94	7,94	3158,11	397,68
1/2W460x52	28,95	7,60	4264,84	561,01

Utilizando-se o momento resistente último de plastificação da viga mista, e considerando as condições de apoio como biapoiada, calcula-se o carregamento

distribuído que provoca a ruína da viga de acordo com cada modelo de viga mista. Para isso, pode-se empregar a equação (3.17). Para este carregamento é considerado que as ações permanentes e variáveis estão agrupadas.

$$q = \frac{M_{Rd} \cdot 8}{L^2 \cdot b_c \cdot \gamma} \quad (3.17)$$

Onde:

L é o vão da viga mista.

γ é o coeficiente de ponderação para combinações normais obtido segundo a NBR 8800 (2008). As ações permanentes diretas e as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas por tipo de carregamento. Sendo assim, o coeficiente será igual a 1,35 para as ações permanentes e 1,5 para as ações variáveis, quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,4 quando isso não ocorrer. Como a maioria dos valores encontrados para “q” superam 5 kN/m² foi utilizado a média entre os coeficientes, o que equivale a 1,4 para todos os casos.

Os gráficos da Figura 3.14 apresentam o carregamento distribuído último em função do vão da viga, para cada um dos perfis ½W. Cada gráfico foi feito fixando a largura efetiva da laje de concreto em 1000, 1200, 1500 e 2000 mm. Eles descrevem que para uma largura efetiva menor tem-se uma resistência por metro quadrado maior. Entretanto, esta vantagem contrasta com a necessidade do uso de mais vigas para cobrir uma mesma área de piso, onerando os custos. Por meio dos gráficos, também se pode escolher uma opção de configuração de viga mista levando em consideração o carregamento necessário pelo vão a ser vencido.

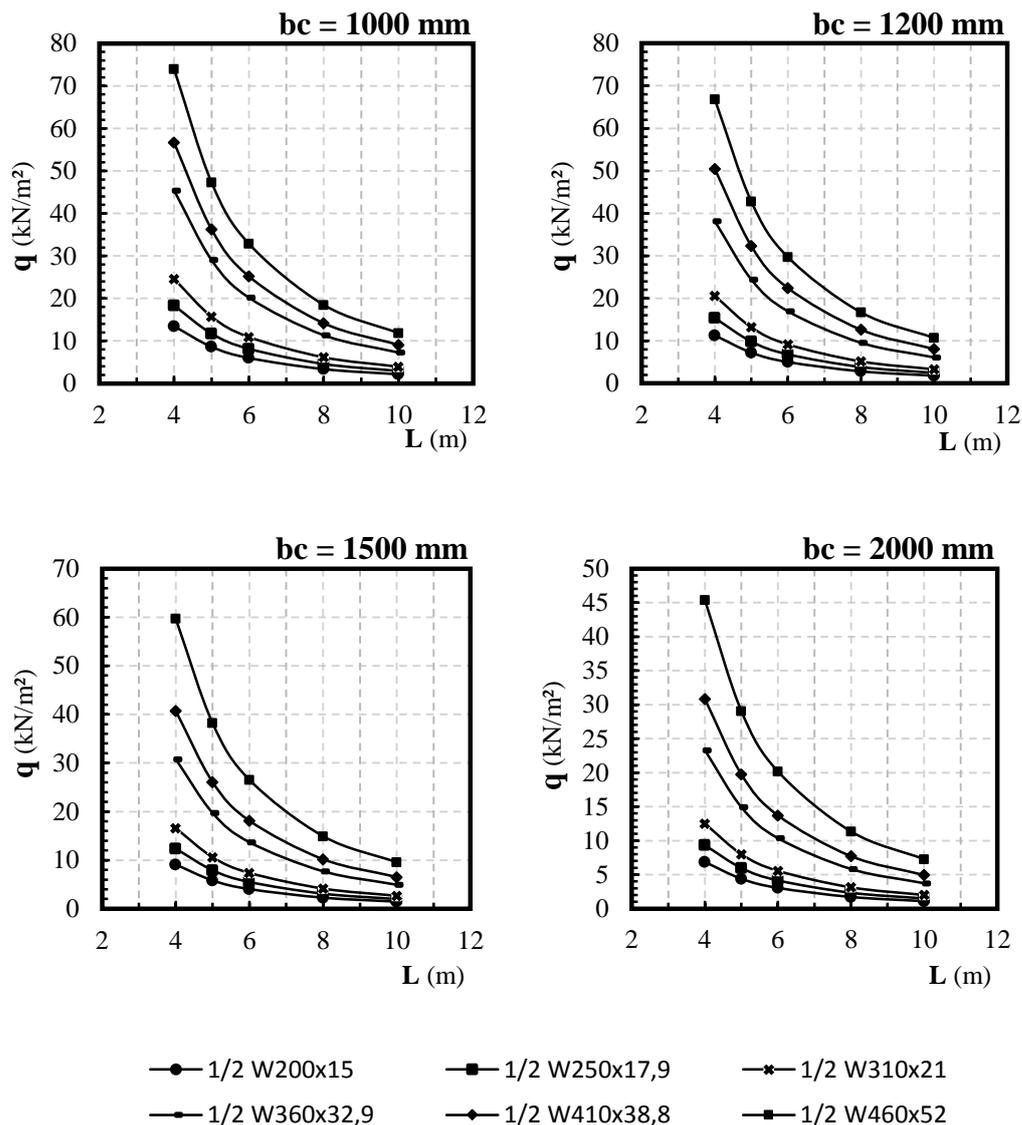


Figura 3.14 - Carregamento distribuído x Vão variando a largura efetiva para cada perfil.

Baseando-se em utilizar este sistema em um edifício comercial com lojas, o valor do carregamento distribuído, carga permanente mais carga acidental, foi fixado em 10 kN/m^2 . Desta forma, foi possível calcular o vão correspondente, isolando-se o vão (L) na equação (3.17). Com estes valores foi feito um estudo relacionando-se a taxa de aço “ c ” com o vão da viga. Nos gráficos da Figura 3.15, a taxa de aço varia de acordo com a largura efetiva em mm. Desta forma, pode-se presumir que para um mesmo nível de carregamento, uma viga mista com perfil $\frac{1}{2}W 410 \times 38,8$ e largura efetiva de 2000 mm possui uma menor taxa de aço que a viga com perfil $\frac{1}{2}W 360 \times 32,9$ e largura efetiva de 1500 mm , impactando na quantidade total de aço da obra e, conseqüentemente, no custo da estrutura.

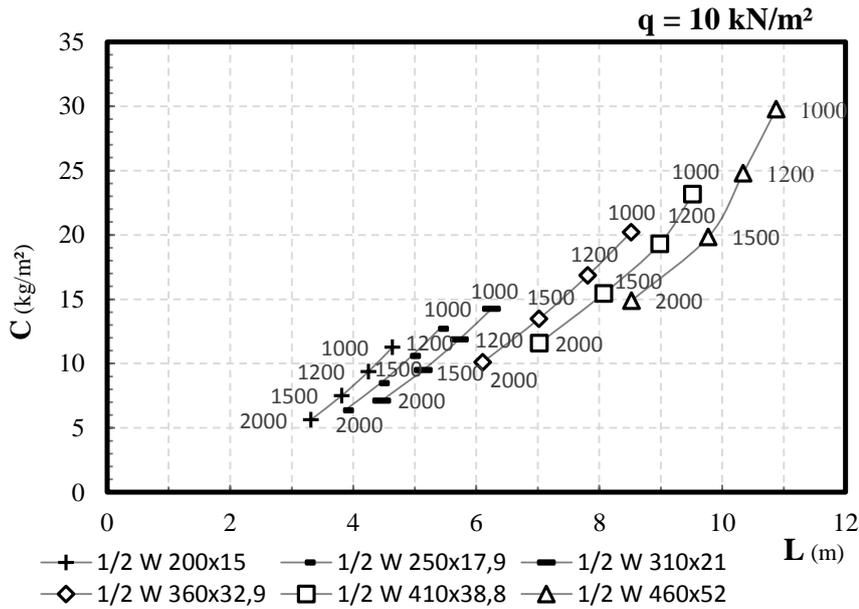


Figura 3.15 - Taxa de aço x Vão livre.

Com o objetivo de aprofundar a análise anterior (consumo de aço x vão da viga), no gráfico da Figura 3.16 foi apresentada a relação da taxa de aço pelo momento fletor resistente da viga. Desta forma, pode-se obter o quanto equivale a massa de aço em termos de resistência.

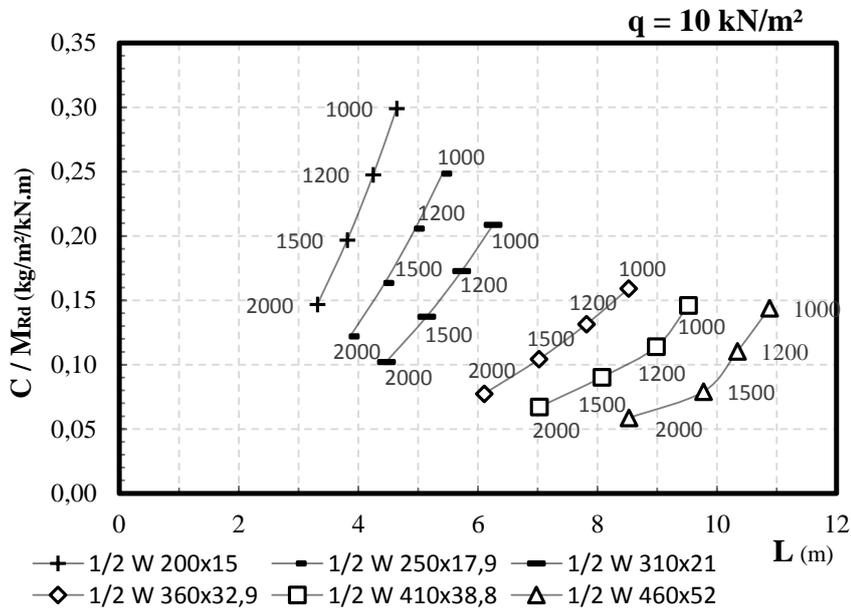


Figura 3.16 - Estudo da relação taxa de aço pelo momento resistente para cada vão da viga mista.

O gráfico da Figura 3.16 demonstra que quanto menor a relação c/M_{Rd} melhor é o aproveitamento do sistema, ou seja, diminui o consumo de aço para uma capacidade resistente igual ou maior.

Na Tabela 3.3 foram selecionadas as soluções mais eficientes obtidas com base nos gráficos da Figura 3.16.

Tabela 3.3 - Soluções mais eficientes para o vão necessário.

Vão m	Perfil	Largura Efetiva mm
4	½W250x17,9	2000
5	½W310x21	1500
6	½W360x32,9	2000
7	½W410x38,8	2000
8	½W410x38,8	1500
9	½W410x38,8	1200
10	½W460x52	1200