



ESTUDO COMPARATIVO DE DIMENSIONAMENTO, EXECUÇÃO E ORÇAMENTO ENTRE VIGA EM CONCRETO ARMADO E VIGA MISTA

Jhonatan Naves Rodrigues¹; Michael Dowglas de Gois Silva²

Resumo

As vigas mistas têm sido bastante empregadas em edifícios de múltiplos pavimentos, o que leva à procura de profissionais qualificados no mercado para efetuar o dimensionamento dessas estruturas. O sistema misto aço-concreto se classifica como aquele em que um perfil de aço trabalha em conjunto com o concreto, formando uma laje mista, viga mista e pilar misto. A interação entre os elementos da seção da viga mista é permitida pelo uso de conectores de cisalhamento, responsáveis por impedir que a laje de concreto e o perfil metálico trabalhem separados, evitando parcial ou totalmente o deslizamento entre os elementos. Esta associação representa vantagens se comparadas às de concreto armado, desde a redução do peso total, ao aumento da rigidez da estrutura. De acordo com as considerações feitas, este trabalho tem como objetivo a disponibilização de uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados e apresentar o dimensionamento de uma viga bi apoiada de um pavimento tipo, estruturada em viga mista de aço e concreto, permitindo ver a comparação das vantagens e desvantagens em relação ao concreto armado.

Palavras-chave: Estruturas mistas. Vigas mistas. Conectores de cisalhamento.

Introdução

O interesse pelo estudo de estruturas mistas com perfis de aço e concreto veio como consequência natural da busca por profissionais capacitados para a elaboração e execução desse tipo de estrutura, que tende a crescer com o objetivo de investigar o comportamento estrutural de vigas mistas compostas por perfis de aço e conectores de cisalhamento. Com base nestes quesitos, torna-se de valia o conhecimento da teoria das estruturas mistas com foco em vigas mistas, conectores de cisalhamento, bem como seu dimensionamento.

Classificam-se as lajes, vigas e pilares, como elementos estruturais, e a junção entre os elementos estruturais, um sistema estrutural. Os sistemas estruturais mistos podem ser divididos em: lajes mistas, vigas mistas e pilares mistos.

Segundo Pfeil (2009), viga mista pode ser classificada como a viga formada pela associação de perfil metálico com uma laje de concreto, sendo os dois ligados por conectores mecânicos.

¹ eng.jhonatannaves@gmail.com - Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil.

² eng.michaeldowglas@gmail.com - Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil.

O desenvolvimento histórico das construções mistas está diretamente ligado à busca pela evolução de estruturas de concreto armado e estruturas de aço.

Em construções mistas, primeiramente o concreto foi utilizado como material de revestimento, no intuito de proteger os perfis de aço contra o fogo e corrosão. Entre os anos de 1940 e 1950, as lajes maciças com vigas de aço revestidas foram bastante utilizadas (QUEIROZ; PIMENTA; MARTINS, 2010).

Segundo Silva e Pannoni (2010), as vigas mistas quase sempre são mais econômicas comparadas às de concreto armado, se aplicadas a edifícios de médio e grande porte. A estrutura se compõe de uma laje de concreto, podendo ser armado ou com sistema de fôrma corrugada, sendo que a mesma se apoia sobre um perfil de aço, e o que garante a homogeneidade entre a laje e o perfil são os conectores de cisalhamento.

Atualmente, as vigas mistas com conectores de cisalhamento e lajes com fôrma de aço integrada são utilizadas em edifícios de múltiplos pavimentos (ALVA, 2000). Como as lajes se apoiam sobre as vigas em perfil de aço, gerando esforços de flexão, conectores de cisalhamento são utilizados para resistir aos esforços de cisalhamento, gerados durante a flexão, permitindo o trabalho entre o concreto e o aço, formando um sistema misto (BELLEI, 2008).

Segundo Pfeil (2009), são dois tipos de interação entre os elementos laje e viga: interação completa e interação parcial.

Interação completa: Iniciando-se o carregamento, o fluxo cisalhante H transferido pelos conectores tem-se distribuição linear. Os conectores das extremidades (e) da Figura 1a são os mais solicitados, porém o esforço é pequeno e os conectores apresentam pequena deformação. Pode-se concluir que não há deslizamento na interface aço-concreto.

Interação parcial: Conforme ilustrado na Figura 1b, com o aumento do carregamento e também do fluxo cisalhante horizontal, os conectores das extremidades apresentam deformações superiores chegando à plastificação, enquanto os conectores intermediários (i) e centrais (c) ainda se encontram com pouca deformação. O deslizamento é causado pela deformação plástica dos conectores da interface aço-concreto e, como consequência, diminui-se a eficiência da viga mista à flexão.

Se o deslizamento for pequeno em vigas mistas, pode ser desprezado. Já, para os deslizamentos causados em estruturas que estão trabalhando com cargas de serviço, deve-se garantir a segurança em relação ao estado limite de deslocamentos sucessivos.

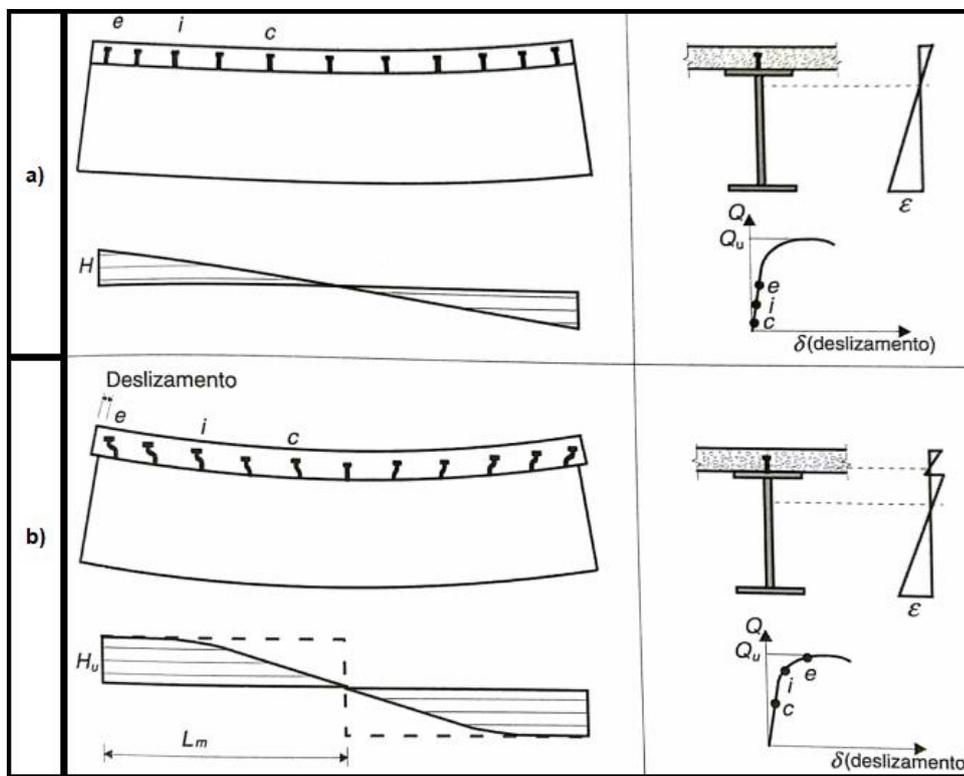


Figura 1 - Funcionamento da seção mista: (a) viga mista sob interação completa; (b) viga mista sob interação parcial
 Fonte: Pfeil (2009).

As vigas mistas podem ser executadas de duas formas diferentes, sendo com a construção escorada ou não escorada durante a concretagem da laje (BELLEI, 2008). Nas construções não escoradas, deve-se considerar que o concreto tenha apenas 75% de sua resistência nos cálculos (PFEIL, 2009).

A laje maciça tem a necessidade de ter fôrmas e escoras para sua concretagem, já as lajes tipo *steel deck* são utilizadas com fôrmas de aço com nervuras, que garantam a estabilidade entre os elementos concreto e aço. A laje tipo *steel deck* possui esse diferencial, pois as chapas servem como escoras devido sua resistência à flexão, trazendo economia no que se refere ao uso de fôrmas, escoras e mão de obra para manuseio quando da execução (BELLEI, 2008).

Os conectores de cisalhamento são dispositivos mecânicos que garantem a homogeneização entre o perfil metálico e a laje de concreto, sendo a interação entre os elementos total ou parcial. Para a absorção dos esforços de cisalhamento horizontal que partem da direção longitudinal na conexão entre a parte inferior da laje e a parte superior do perfil metálico, são utilizados esses dispositivos, evitando a separação física entre os dois elementos (PFEIL, 2009). Devido à complexidade, o comportamento dos conectores é

obtido por meio de ensaios. Para o dimensionamento dos conectores, é importante saber seu comportamento no sistema misto, pois através dos gráficos que envolvem a força de cisalhamento transmitida longitudinalmente e o deslizamento relativo entre as superfícies é que o cálculo é feito (SILVA, 2013).

Os conectores de cisalhamento podem ser classificados como rígidos ou flexíveis, sua classificação é determinada de acordo com a reação do conector à ação do fluxo de cisalhamento longitudinal que surge no trabalho entre a viga de aço e a laje de concreto. A reação do conector pode ser obtida a partir da relação entre a força no conector e o deslizamento relativo entre os elementos (laje e viga), conforme ilustrado na Figura 2 (CHAVES, 2009).

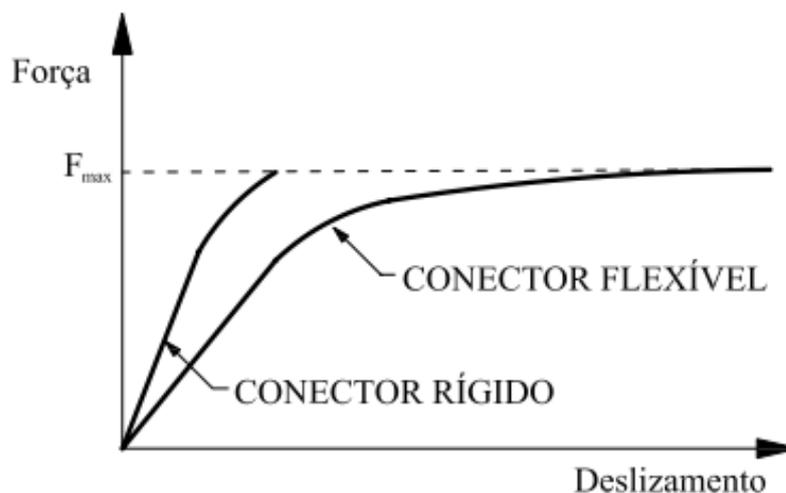


Figura 2 - Relação Força x Deformação
Fonte: Chaves (2009).

Segundo Silva (2013), através do gráfico é possível determinar a resistência de cálculo dos conectores que passaram pelo ensaio, e também seu comportamento quanto à ductilidade. O conceito de ductilidade se define pela capacidade de deformação do conector após ter atingido resistência máxima.

Segundo Sales (2014), o conector flexível continua a se deformar com carregamento crescente, mesmo após atingir a resistência máxima, sem ocorrer o colapso oriundo de sua ductilidade. Isso permite a redistribuição de tensões de cisalhamento aos demais conectores, que surgem na interface das vigas mistas, permitindo que alcancem resistência máxima. Este padrão permite que os conectores sejam espaçados igualmente ao longo do vão da viga.

O conector de cisalhamento tipo pino é um conector flexível, foi desenvolvido na década de 40 pela empresa Nelson *Stud Welding*, e é o mais utilizado atualmente. Na forma

de um pino que foi especialmente projetado para funcionar como um eletrodo de solda por arco elétrico e, ao mesmo tempo, após a soldagem, como um conector de cisalhamento (QUEIROZ, 2001).

A Figura 3 ilustra como o conector de cisalhamento fica no caso de uma laje tipo *steel/deck*.

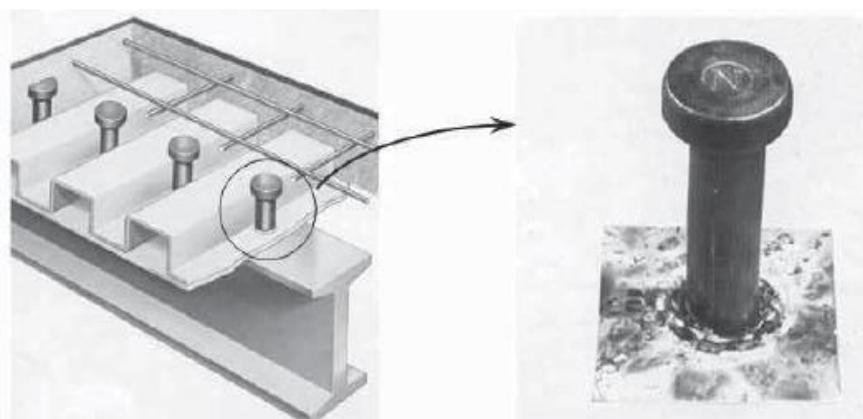


Figura 3 - Conector tipo pino com cabeça
Fonte: Queiroz (2001).

Segundo Sales (2014), os conectores tipo pino com cabeça garantem flexibilidade devido à dimensão da haste. A cabeça tem duas funções importantes: melhorar o desempenho quanto à resistência do conector, fazendo com que ocorra esmagamento em regiões específicas (Figura 4), e impedir o afastamento vertical entre o perfil de aço e a laje de concreto.

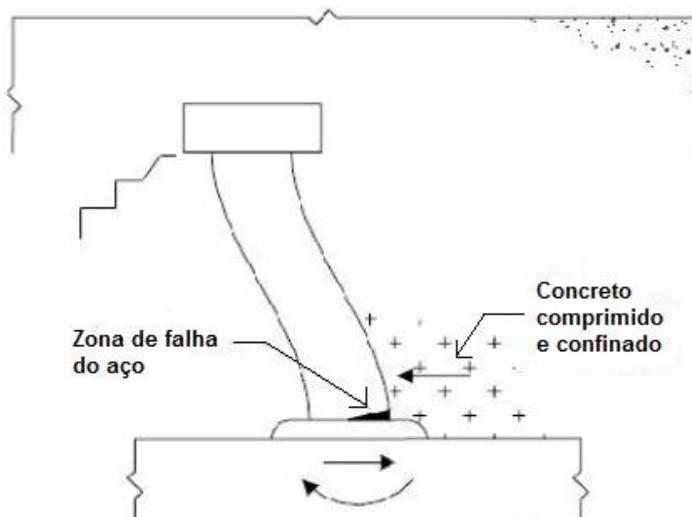


Figura 4 - Interação do conector com o concreto
Fonte: Oehlers; Bradford (1995 apud Sales, 2004, p. 21).

Os conectores de cisalhamento possuem medidas padronizadas no mercado, sendo o conector de 19 mm o mais utilizado na construção de estruturas de edificações.

De acordo com Queiroz, Pimenta e Martins (2010), o aço utilizado na fabricação dos pinos é o ASTM A-108 grau 1020, devendo atingir a resistência mínima de resistência à tração de 415 MPa e limite de escoamento não podendo ser inferior a 345 MPa.

Quanto aos tipos de construção, podem ser executados de duas formas:

- **Construção escorada:** O perfil de aço é escorado durante a construção e permanece sem solicitação até a remoção do escoramento, que ocorrerá logo após a cura do concreto (BELLEI, 2008). Segundo Pfeil (2009), quando a resistência necessária do concreto é atingida, o escoramento pode ser retirado e as solicitações causadas pelo peso próprio (g) e demais cargas (q) aplicadas posteriormente atuam sobre a seção mista, obtendo-se os diagramas de deformações.
- **Construção não escorada:** Segundo Bellei (2008), antes da cura do concreto e antes do concreto atingir uma resistência à compressão de $0,75.f_{ck}$, o perfil de aço deve suportar todas as solicitações, como: peso próprio da viga, da laje e fôrmas; carga de montagem. Após a cura do concreto, os elementos (viga e laje) passam a se interagir e deve suportar todas as solicitações que vierem ao longo do tempo. As cargas q aplicadas após a cura do concreto incidem sobre a seção mista resultando no diagrama composto de deformações (PFEIL, 2009).

Conforme ilustrado na Figura 5, o comportamento da viga varia de acordo com o tipo de construção, posto que o carregamento ($g + q$) atua sobre o elemento escorado, o deslizamento é constante, já para a viga mista não escorada, o deslizamento em que atua o carregamento g é maior. Porém, para os casos em que a construção do elemento misto for escorada ou não escorada, com o crescimento de momento fletor (M), ambos atingem o momento de plastificação (M_p) (PFEIL, 2009).

Este trabalho tem o intuito de dimensionar uma viga mista, com vigas de aço e laje maciça de um pavimento tipo estruturado originalmente em concreto armado, comparando-se assim os resultados. As lajes do pavimento tipo já foram calculadas no exemplo 1 (p. 354) do livro Cálculo e detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado de Carvalho (2014), mostrando as respectivas cargas que foram distribuídas às vigas do pavimento.



Figura 5 - Diagrama de deslocamentos verticais para a ação de cargas crescentes
Fonte: Pfeil (2009).

Material e métodos

Para desenvolver o estudo sobre as vigas mistas, foi necessário o desenvolvimento de uma revisão bibliográfica, por meio de pesquisas em fontes disponíveis, especificamente em normas brasileiras voltadas para a área de interesse, livros de estruturas metálicas, trabalhos acadêmicos focados em estruturas mistas, artigos e *web sites* na área de estruturas.

Após coleta dos dados e embasamentos teóricos sobre o dimensionamento de vigas mistas, deu-se início ao dimensionamento e detalhamento da viga mista. Em seguida, foram obtidas as solicitações de cálculo e, com o auxílio do programa FTOOL, foram obtidos os diagramas dos esforços solicitantes. Utilizando-se o exemplo 1 da página 354 do livro Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado, foi possível a comparação entre estrutura mista e estrutura em concreto armado de Carvalho (2014).

Resultados e discussão

Dimensionou-se a viga 06, sendo uma estruturada em concreto armado e a outra em viga mista (perfil metálico com laje de concreto incorporada) conforme ilustrado na Figura 6. Considerou-se que as salas serão utilizadas para escritórios, que todas as lajes deverão ter a mesma espessura e que o revestimento inferior de gesso para efeito de cálculo de carga pode ser desprezado. Foram admitidos os seguintes dados de projeto:

- Contrapiso com espessura de 2,0 cm e $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$;
- Piso de plástico, cujo peso de $0,20 \text{ kN/m}^2$ já inclui a cola e a camada de regularização;

- Cobrimento nominal da armadura de 25 mm, admitindo classe de agressividade ambiental II;
- Vigas: largura $b_w = 12$ cm;
- Pilares: 12x50; Escala em cm;
- Concreto com resistência característica $f_{ck} = 20$ MPa;
- Aço CA50;
- O escoramento será retirado 14 dias após a execução da concretagem.

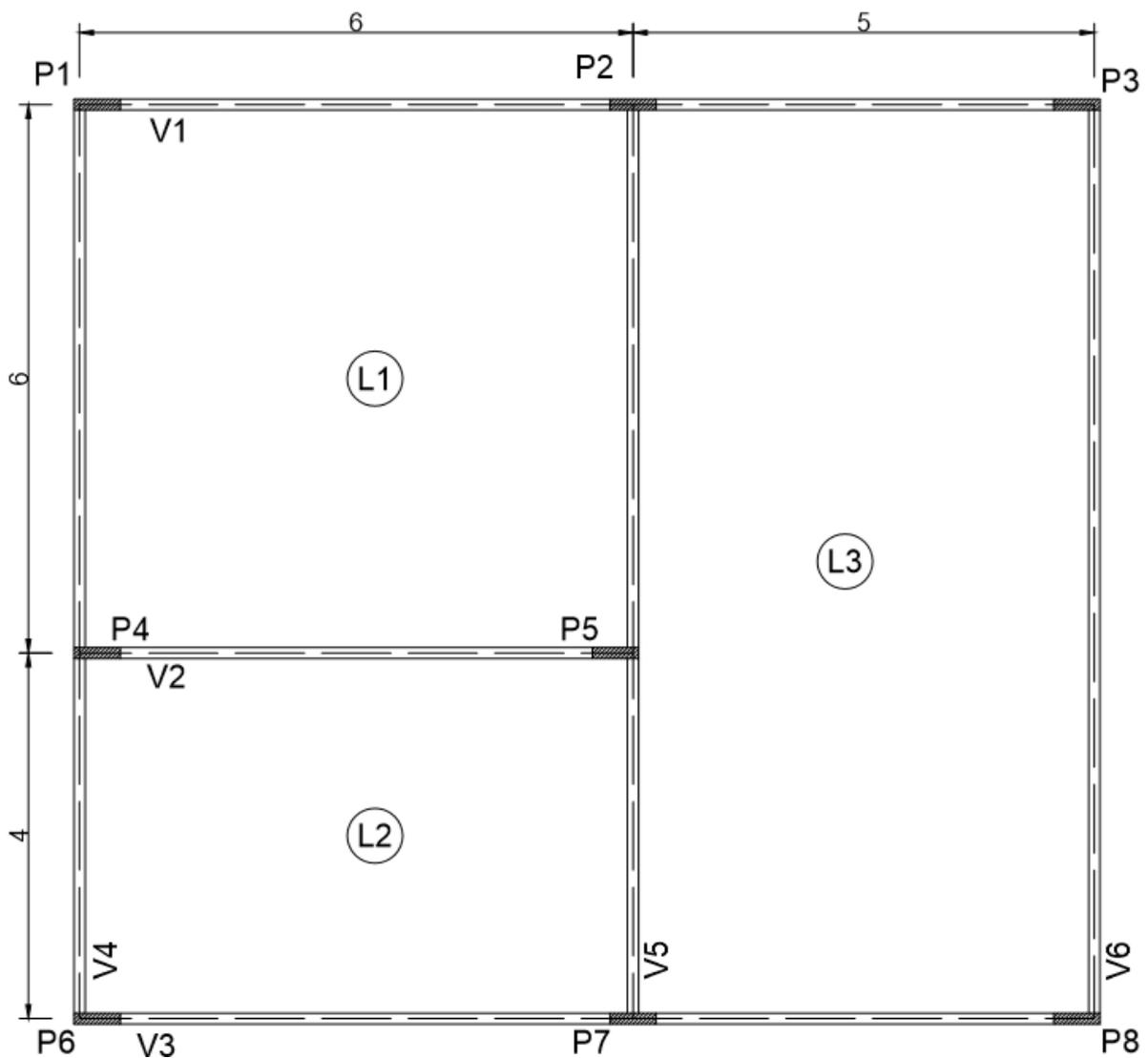


Figura 6 - Exemplo para dimensionamento, cotas em cm
Fonte: Adaptada de Carvalho (2014).

Utilizando a obra de Carvalho (2014), o dimensionamento da viga em concreto armado foi obtido (Figuras 7 e 8), com $f_{ck}= 20$ MPa, e aço CA-50, resultando em uma viga com $b_w = 12$ cm e $h_w = 125$ cm, com peso próprio de 3,75 kN/m, o que equivale a 375 kg/m.

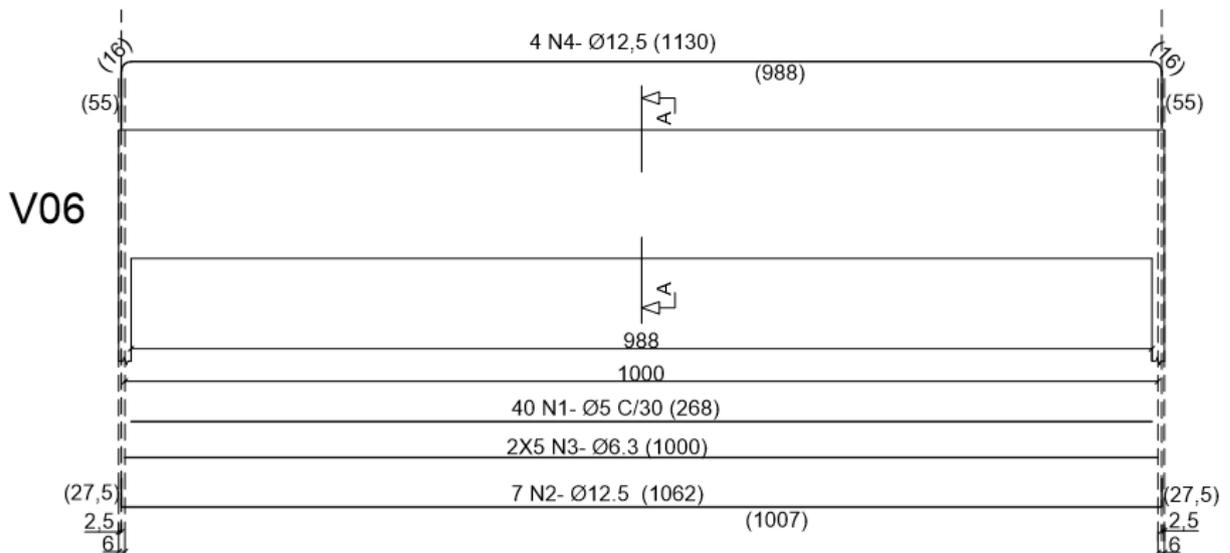


Figura 7 - Detalhamento da viga dimensionada em concreto armado na vista longitudinal; medidas em cm; figura sem escala
Fonte: Próprio autor (2017).

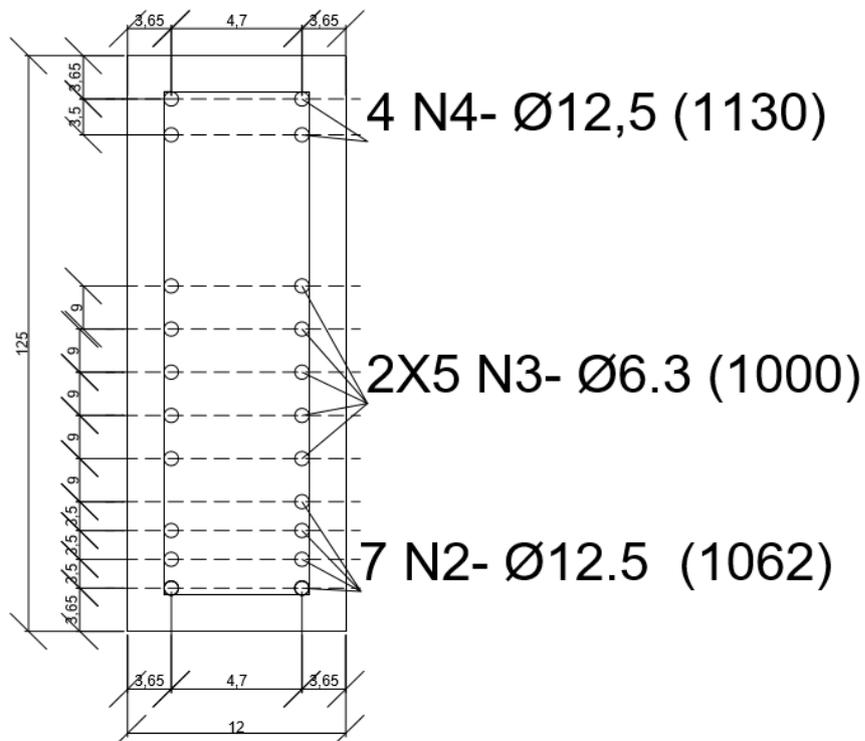


Figura 8 - Seção transversal da viga dimensionada em concreto armado (corte AA'); medidas em cm; figura sem escala
Fonte: Próprio autor (2017).

O dimensionamento da viga mista foi feito utilizando-se a revisão bibliográfica de Pfeil (2009), conforme se segue:

DIMENSIONAMENTO DA VIGA MISTA

Dados:

Vão efetivo (l_{ef}) = 10,00 m

Viga Biapoiada

Para o perfil metálico:

Aço ASTM 572 GR50

$f_y = 345$ MPa; $f_u = 450$ MPa; $E = 205$ Mpa

Interação completa; Ligação total (sem deslizamento)

Seção compacta;

Conector de cisalhamento tipo pino com cabeça (*Studs*).

Para o concreto:

$f_{ck} = 20$ Mpa; $E_{ci} = 25,04$ Mpa; $E_{cs} = 21$ Mpa.

Cargas:

- Provenientes da laje= 8,31 kN/m
- Parede= 8,64 kN/m

a) Pré-dimensionamento

Carga distribuída de projeto:

$$Q_d = 1,4 \cdot (8,31 + 8,64) = 23,73 \text{ kN/m}$$

Momento solicitante de cálculo:

$$M_d = \frac{p \cdot l^2}{8} = \frac{23,73 \cdot 10^2}{8} = 296,63 \text{ kN.m}$$

Determinação da altura inicial do perfil metálico, segundo Bellei (2008):

$$h_{inicial} = \frac{V\tilde{a}o}{30} = \frac{1000 \text{ cm}}{30} = 33,33 \text{ cm} = 35 \text{ cm}$$

Considerando que os perfis são dimensionados de 5 em 5 cm comercialmente, optou-se pelo perfil W360x39, que mais se aproximou do valor da altura solicitada.

Informações do perfil:

$m = 39 \text{ kg/m}$; $h = 353 \text{ mm}$; $A = 50,2 \text{ cm}^2$; $h_w/t_0 = 47,3$

Alma: $t_0 = 6,5 \text{ mm}$, $h_0 = 332 \text{ mm}$; Mesa: $t_f = 10,70 \text{ mm}$; $b_f = 128 \text{ mm}$; $I_x = 10331 \text{ cm}^4$;

b) Largura efetiva da laje para viga de extremidade

$$e = \frac{1000}{8} = 125\text{cm}; 10\text{cm} \text{ (Centro do Perfil à extremidade da laje)}$$

$$a = \frac{l_0}{8} = \frac{1000\text{cm}}{8} = 125\text{cm};$$

A largura efetiva (b_e) é a soma de a e e (Figura 9).

$$b_e = a + e = 125 + 10 = 135 \text{ cm.}$$

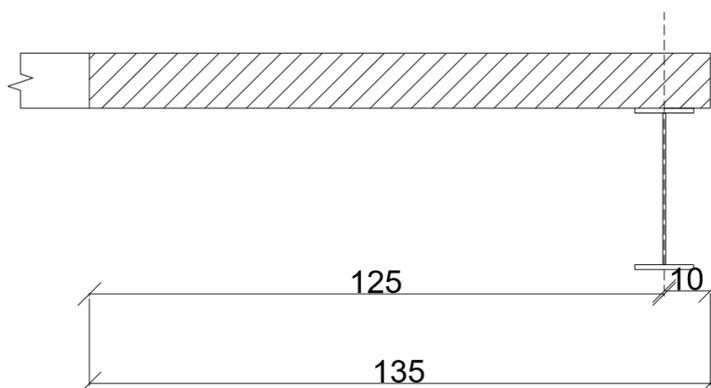


Figura 9 - Ilustração para a largura efetiva, escala em cm
Fonte: Próprio autor (2017).

c) Classificação quanto à flambagem local

$$\frac{h_w}{t_0} \leq 3,76 \cdot \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 47,3 \leq 91,65 \therefore \text{a seção é compacta.}$$

d) Momento resistente da viga mista

$$R_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_e \cdot h_c = 0,85 \cdot \frac{2,0}{1,4} \cdot 135 \cdot 12 = 1967\text{kN}$$

$$R_{td} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{al}} = \frac{50,2 \cdot 34,5}{1,1} = 1574,45 \text{ kN}$$

Como $R_{cd} > R_{td}$, a linha neutra plástica está na laje de concreto (Figura 10).

Cálculo da profundidade X :

$$x = \frac{f_y A / \gamma_{al}}{0,85 f_{ck} b_e / \gamma_c} < h_c = \frac{34,5 \cdot 50,2 / 1,1}{0,85 \cdot 20 \cdot 135 / 1,4} = 9,60 \text{ cm} \leq 12 \text{ cm (OK!)}$$

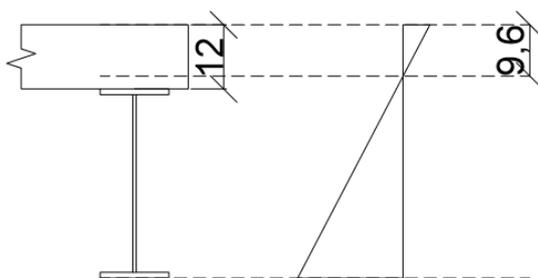


Figura 10 - Posição da Linha Neutra Plástica, medidas em cm
Fonte: Próprio autor (2017).

Momento resistente com a linha neutra plástica na seção da laje de concreto:

$$M_{d \text{ res}} = R_{td} z = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{al}} \left(y_s + h_p + h_c \cdot \frac{x}{2} \right) = 1574,45 \cdot \left(17,65 + 12 \cdot \frac{9,6}{2} \right) =$$

$$39.125,08 \text{ kN.cm ou } 391,25 \text{ kN.m} > 296,63 \text{ kN.m (OK!)}$$

e) Resistência ao cisalhamento

$$V_{sd} = \frac{Qd \cdot l_{vão}}{2} = \frac{(1,4 \cdot [8,31 + 8,64]) \cdot 10}{2} = 118,65 \text{ kN}$$

Esforço cortante resistente:

$$2,46 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} > \frac{h_w}{t_0} = 2,46 \cdot \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 59,97 > 47,3 \text{ (OK!)}$$

$$V_{d \text{ res}} = A_w \cdot (0,6 \cdot f_y) / \gamma_{al} = \frac{35,3 \cdot 0,65 \cdot (0,6 \cdot 34,5)}{1,1} = 431,78 \text{ kN} \geq 118,65 \text{ kN (OK!)}$$

f) Cálculo do número de conectores para ligação total

Resistência do conjunto de conectores dispostos entre o meio do vão e o apoio.

Como $R_{cd} > R_{td}$, tem-se:

$$nQ_n \geq A f_y$$

Resistência de um conector $\phi 15,9$

$$Q_n \leq \begin{cases} Q_n = 0,5 A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c} = 0,5 \cdot 1,98 \cdot \sqrt{20,2129} = 64,60 \text{ kN} \\ Q_n = R_g R_p A_{cs} f_u = 1,1 \cdot 1,98 \cdot 41,5 = 82,20 \text{ kN} \end{cases}$$

Portanto $Q_n = 64,60 \text{ kN}$.

Resistência de um conector $\phi 15,9$ de cálculo:

$$Q_{rd} = \frac{Q_n}{\gamma_{cs}} = \frac{64,6}{1,25} = 51,7 \text{ kN}$$

Número de conectores necessários:

$$nQ_n \geq A \cdot f_y \rightarrow n \geq \frac{R_{td}}{Q_{rd}} \rightarrow n \geq \frac{1574,45}{51,7} \cong 31 \text{ conectores}$$

Espaçamento real entre conectores:

$$a = \left(\frac{l_{vão}/2}{n} \right) = \left(\frac{1000/2}{31} \right) = 16 \text{ cm ou } 160 \text{ mm}$$

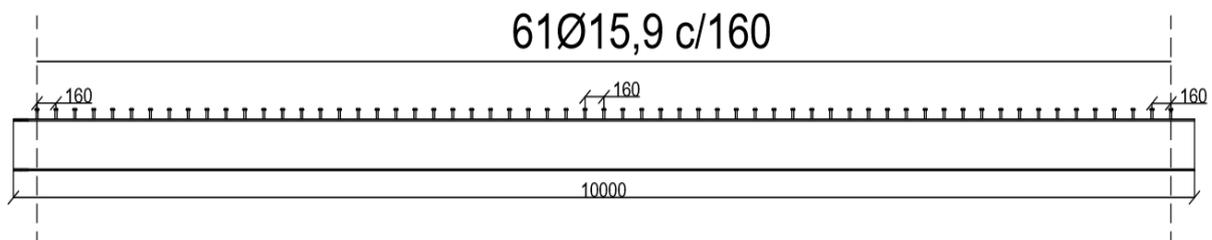


Figura 11 - Detalhamento da viga mista longitudinalmente com conectores de cisalhamento incorporados, medidas em mm; Figura sem escala

Fonte: Próprio autor (2017).

Verificação ao cisalhamento da laje na seção AA

Fluxo cisalhante solicitante de projeto:

$$V_{sd} = \frac{\sum Q_{rd} \frac{b_{e1}}{b_{e1} + b_{e2}} - 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} A_{b/c}}{L_m} =$$

$$V_{sd} = \frac{31.517, \frac{125}{125+10} - 0,85 \cdot \frac{2,0}{1,4} \cdot 12 \cdot \frac{128}{2}}{\frac{1000}{2}} = 1,10 \text{ kN/cm}$$

Fluxo cisalhante resistente de projeto:

Para o dimensionamento da laje 3, o exemplo do livro resultou numa área de aço de 3,966 cm²/m, que será utilizada para determinar quanto a resistência do aço utilizada na laje colabora na resistência ao fluxo cisalhante de projeto solicitada pelo perfil metálico.

$$V_{rd} = V_{cd} + V_{wd} = 0,6 A_{cv} \frac{f_{ctk.inf}}{\gamma_c} + \frac{f_y}{\gamma_s} < 0,2 A_{cv} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,6 \cdot 12 \cdot \frac{(0,212 \cdot 0^{2/3})}{1,4} + 0,03966 \frac{50}{1,15} =$$

$$V_{rd} = 3,41 \text{ kN/cm} < 0,2 \cdot 12 \cdot \frac{2,0}{1,4} = 3,41 \text{ kN/cm} < 3,43 \text{ kN/cm (OK!) =}$$

$$\therefore 3,43 \text{ kN/cm} > 1,10 \text{ kN/cm (OK!)}$$

Verificou-se que as condições de V_{rd} foram atendidas, e também como $V_{rd} > V_{sd}$ o dimensionamento está correto.

g) Propriedades geométricas para cálculos em regime elástico

$$E_{c0} = 0,85 \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} = 0,85 \cdot 5600 \sqrt{20} = 21.287 \text{ MPa}$$

$$\alpha_0 = \frac{E_{aço}}{E_{concreto}} = \frac{E_s}{E_c} = \frac{20500}{21287} = 9,63$$

$$\alpha_\infty = 3 \cdot \alpha_0 = 3 \cdot 9,63 = 28,89$$

O Quadro 1 mostra o desenvolvimento do cálculo quando se considera a fluência do concreto ao longo do tempo, enquanto o Quadro 2 mostra o desenvolvimento do cálculo quando não se considera a fluência do concreto ao longo do tempo.

Quadro 1 - Cálculo levando em consideração a fluência do concreto ao longo do tempo ($\alpha_\infty = 28,89$)

	A (cm ²)	Y' (cm)	A.Y'	A.Y' ²	I _x (cm ⁴)
Laje	$\frac{135,12}{28,89} = 56,07$	6	336,42	2.018,52	$\frac{135,12^3}{12} = 19.440$
Seção de aço	50,2	$\frac{35,3}{2} + 12 = 29,65$	1.488,43	44.131,95	10.331
Total	106,27		1.824,85	46.150,47	29.771

Fonte: Próprio autor (2017).

$$Y_{\text{sup}} = \frac{\sum A.Y'}{\sum A} = \frac{1.824,85}{106,27} = 17,17\text{cm} > hc = 17,17\text{cm} > 12\text{cm} (\text{OK!})$$

$$Y_{\text{inf}} = (353 + 12) - 17,17 = 347,83\text{cm}$$

$$I = \sum I_x + \sum A.Y'^2 - \sum A.Y_{\text{sup}}^2 = 29.771 + 46.150,47 - 106,27 \cdot 17,17^2 = 44.592,13\text{cm}^4$$

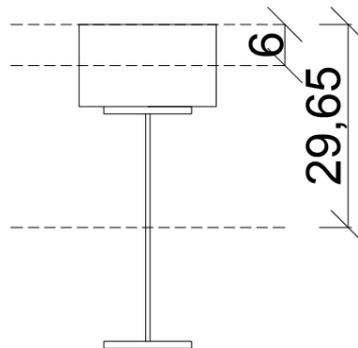


Figura 12 - Propriedades da seção homogeneizada; Medidas em cm

Fonte: Próprio autor (2017).

Quadro 2 - Cálculo não levando em consideração a fluência do concreto ($\alpha_0 = 9,63$)

	A (cm ²)	Y' (cm)	A.Y'	A.Y' ²	I _x (cm ⁴)
Laje	$\frac{135,12}{9,63} = 168,22$	6	1.009,32	6.055,92	$\frac{135,12^3}{12} = 19.440$
Seção de aço	50,2	$\frac{35,3}{2} + 12 = 29,65$	1.488,43	44.131,95	10.331
Total	218,42		2.497,75	50.187,87	29.771

Fonte: Próprio autor (2017).

$$Y_{\text{sup}} = \frac{\sum A.Y'}{\sum A} = \frac{2.497,75}{218,42} = 11,44\text{cm} > hc = 11,44\text{cm} > 12\text{cm} (\tilde{N} \text{ OK!})$$

$$Y_{\text{inf}} = (353 + 12) - 11,44 = 353,56\text{cm}$$

$$I = \sum I_x + \sum A.Y^2 - \sum A.Y_{sup}^2 = 29.771 + 50.187,87 - 218,42.11,44^2 = 51.373,46cm^4$$

Verificação no estado limite de utilização (ou de serviço)

Deslocamento no meio do vão da viga mista devido à combinação frequente, considerando o efeito de fluência do concreto:

$$\gamma_{g2+q2} = \frac{5}{384} \cdot \left(\frac{g_2 + \Psi_1 \cdot q_2}{E.I} \right) \cdot l_{vão}^4 \rightarrow \frac{5}{384} \cdot \left(\frac{0,0831 + 0,6 \cdot 0,0864}{205004459213} \right) \cdot 1000^4 \rightarrow$$

$$1,68cm \leq \frac{l_{vão}}{350} \rightarrow 1,68cm \leq \frac{1000}{350} \rightarrow 1,68cm \leq 2,86cm (OK!)$$

Deslocamento no meio do vão da viga mista devido à combinação frequente, desconsiderando o efeito de fluência do concreto:

$$\gamma_{g2+q2} = \frac{5}{384} \cdot \left(\frac{g_2 + \Psi_1 \cdot q_2}{E.I} \right) \cdot l_{vão}^4 \rightarrow \frac{5}{384} \cdot \left(\frac{0,0831 + 0,6 \cdot 0,0864}{205005137346} \right) \cdot 1000^4 \rightarrow$$

$$1,67cm \leq \frac{l_{vão}}{350} \rightarrow 1,67cm \leq \frac{1000}{350} \rightarrow 1,67cm \leq 2,86cm (OK!)$$

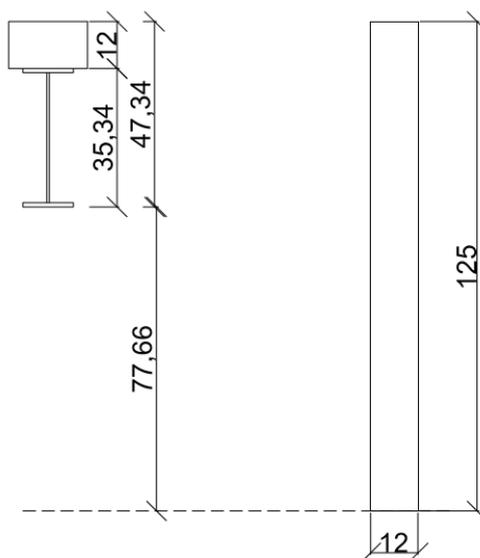


Figura 13 - Diferença de altura entre a viga mista (a) e a viga de concreto (b); figura sem escala; medidas em cm

Fonte: Próprio autor (2017).

Com base nas dimensões da viga em concreto armado, e também do perfil metálico e seus respectivos elementos para montagem da viga mista, foram feitos dois orçamentos constando mão de obra e material para a execução de cada viga. Os orçamentos dos materiais foram feitos no município de Rio Verde-GO, e a mão de obra para a execução dos

serviços foi obtida de acordo com a tabela da AGETOP, sendo que o valor final representa apenas o custo real para a execução dos elementos estruturais, sem o BDI incluído.

Na Figura 14, com apresentação do orçamento, está incluso o consumo de aço e concreto para a viga em concreto armado.

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA - 17 DE OUTUBRO DE 2017									
Item	Descrição dos serviços	Unid	Qtde.	Valores Unitários (R\$)			Valor total (R\$)		
				Material	MO/Serviços	Total Material			
1 Viga em concreto armado									
1.1	Concreto usinado fck= 20 MPa	M³	1,482	R\$ 286,00		R\$ 423,85	R\$ 423,85		
1.2	Aço 5.0mm CA-50	Br	9	R\$ 7,85		R\$ 70,65	R\$ 70,65		
1.3	Aço 6.3 mm CA-50	Br	9	R\$ 11,30		R\$ 101,70	R\$ 101,70		
1.4	Aço 12.5 mm CA-50	Br	11	R\$ 40,90		R\$ 449,90	R\$ 449,90		
1.5	Fôrmas	M²	26,2	R\$ 37,82		R\$ 990,88	R\$ 990,88		
1.6	Lançamento do concreto	M²	1,482		R\$ 44,18	R\$ -	R\$ 65,47		
1.7	Corte/ Dobra aço 5.0mm	Kg	21,9312		R\$ 2,14	R\$ -	R\$ 46,94		
1.8	Corte/ Dobra aço 6.3mm	Kg	27,28		R\$ 2,45	R\$ -	R\$ 66,84		
1.9	Corte/ Dobra aço 12.5mm	Kg	129,916072		R\$ 3,06	R\$ -	R\$ 397,54		
1.10	Montagem das fôrmas	M²	26,2		R\$ 22,50	R\$ -	R\$ 589,50		
							Total Item 1	R\$ 3.203,28	
2 Viga mista, Vão= 10m									
2.1	Perfil: m= 39kg/m; h= 35,4cm; vão= 10m	Unid	1	R\$ 2.293,20		R\$ 2.293,20	R\$ 2.293,20		
2.2	CONNECTOR DE CISCALHAMENTO TIPO PINO COM CABEÇA (Studs) Ø15,9; h= 100mm	Unid	61	R\$ 3,58		R\$ 218,38	R\$ 218,38		
2.3	MAQUINA P/ATEAMENTO (CNP)	Unid	1	R\$ 109,37		R\$ 109,37	R\$ 109,37		
2.4	Primer base Epóxi	Unid	1	R\$ 419,40		R\$ 419,40	R\$ 419,40		
2.5	Mão de obra (Ajudante, montador e jateista)	Unid	1		R\$ 228,00	R\$ -	R\$ 228,00		
2.6	Escoras de madeira para o perfil metálico d= 5cm; h= 3m (durante a execução da laje)	Unid	6	R\$ 6,60		R\$ 39,60	R\$ 39,60		
2.7	Caminhão munck para içamento do perfil metálico, hora mínima= 2 horas	h	2	R\$ 150,00		R\$ 300,00	R\$ 300,00		
							Total Item 2	R\$ 3.607,95	

Figura 14 - Orçamento para a execução dos elementos estruturais; (1) Viga em concreto armado; (2) Viga mista de aço e concreto
 Fonte: Próprio autor (2017).

Conclusões

Como se pode analisar na Figura 13, a diferença de altura entre a viga estruturada em concreto armado e a viga mista foi de 77,66 cm em sua totalidade, tornando a viga mista mais vantajosa em relação à altura e peso próprio do elemento estrutural, além das vantagens na execução. Após o dimensionamento da viga mista, o peso próprio da viga permaneceu 0,39 kN/m, e a de concreto armado 3,75 kN/m, portanto o peso próprio da viga mista equivale a 10,4% do peso do elemento estruturado em concreto armado.

Como se observa na Figura 14, o custo da execução da viga mista de aço e concreto é superior ao da viga de concreto armado, tendo diferença de custo em porcentagem de 11,22%, porém se levar em conta o tempo de execução, a viga mista se torna mais interessante do que a de concreto, devido ao curto prazo para término da obra, e também, as estruturas mistas se comparadas às de concreto armado, possuem peso próprio inferior, devido aos perfis metálicos serem esbeltos, podendo aliviar o peso a que as fundações estarão submetidas e, conseqüentemente, gerar economia de gastos com a fundação.

A utilização da viga mista traz agilidade na execução da estrutura, devido ao peso inferior se comparado ao de concreto armado, mão de obra apropriada, dispensa do uso de fôrmas, peças sob medida, com alto controle de execução e precisão milimétrica, visto que as estruturas metálicas não aceitam erros na execução e locação in loco.

Portanto, pode-se concluir que as estruturas mistas possuem vantagens relacionadas às estruturas metálicas e de concreto, sendo elas:

Relacionadas às estruturas de concreto:

- Possibilidade de dispensa de fôrmas e escoramentos;
- Redução do prazo de execução da obra;
- Redução do peso próprio e do volume da estrutura;
- Melhor precisão de dimensionamento da estrutura;
- Aumento do pé direito dos pavimentos.

Relacionadas às estruturas metálicas:

- Redução de consumo de aço estrutural;
- Redução das proteções contra incêndio e corrosão;
- Aumento da rigidez da estrutura.

Referências

ALVA, G. M. S. Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto. 2000. 296p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

BELLEI, I. H., PINHO, F. O., & PINHO, M. O. Edifício de múltiplos andares em aço. 2ª edição, PINI. São Paulo, 2008.

CARVALHO, R. C; FILHO, J. R. F. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014. 4ª edição, Ed. UFSCAR, 409p. São Carlos, 2014.

CHAVES, I. A. Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido. 2009, 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PFEIL, W. e PFEIL, M. Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J; MATA, L. A. C. Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto. Belo Horizonte: O Lutador, 2001.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J; MARTINS, A. G. Estruturas Mistas. Volume 1. IABr/CBCA. Rio de Janeiro, 2010a, 68p.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J; MARTINS, A. G. Estruturas Mistas. Volume 2. IABr/CBCA. Rio de Janeiro, 2010b, 76p.

SALES, M. W. R. Conector de cisalhamento tipo pino com cabeça para viga mista aço-concreto com laje alveolar. 2014, 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SILVA, M. D. G. Mezanino Estruturado em Viga Mista de Aço e Concreto. Projeto Final (Bacharel em Engenharia Civil), Publicação ENC. PF – 12/2013, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás. Anápolis, GO, 107 p. 2013.

SILVA, V. e PANNONI, F. Estruturas de aço para edifícios: Aspectos tecnológicos e de concepção. Ed. Blucher, 295p. São Paulo, 2010.