

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO E AÇO

ESTUDO COMPARATIVO DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO
COMPOSTAS POR PERFIS I

HENRIQUE CAMARGOS MARQUES FLORENTINO

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

**ESTUDO COMPARATIVO DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO
COMPOSTAS POR PERFIS I**

HENRIQUE CAMARGOS MARQUES FLORENTINO

Trabalho Final apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Comissão Examinadora:

Prof. Hermes Carvalho
DEES – UFMG (Orientador)

Prof. Ricardo Hallal Fakury
DEES – UFMG

Belo Horizonte, 06 de março de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo incentivo e suporte fornecido para a conclusão do curso de especialização em análise e dimensionamento de estruturas de concreto armado e aço. Agradeço também aos professores da Escola de Engenharia da UFMG que tiveram uma participação decisiva no meu desenvolvimento técnico e acadêmico.

Resumo

A viga mista de aço e concreto é composta por uma viga de aço e por uma faixa da laje de concreto de modo que ambos trabalham em conjunto para suportar o esforço solicitante de flexão. O peso da viga metálica em sistemas de piso com vigas biapoiadas e semicontínuas é apresentado e discutido nesse trabalho. As vigas serão verificadas conforme procedimento de dimensionamento proposto pela norma brasileira ABNT NBR8800:2008. O resultado do quantitativo é apresentado em um gráfico de peso versus vão, permitindo que os dois métodos de dimensionamento de vigas mistas compostas por perfis I sejam avaliados.

Palavras Chave: Viga Mista Biapoiada; Viga Mista Semicontínua; Ligações Mistas; Peso de Vigas Mistas em Piso.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO	9
3	METODOLOGIA	9
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1	Etapas de Verificação	12
4.2	Largura Efetiva	13
4.3	Conectores	14
4.4	Deformações	15
4.5	Cisalhamento Resistente de Cálculo.....	17
4.6	Momento Fletor Resistente de Cálculo em Região de Momento Positivo.....	17
4.7	Momento Fletor Resistente de Cálculo em Região de Momento Negativo	19
4.8	Flambagem Lateral com Distorção da Seção Transversal.....	19
4.9	Ligação Mista	20
5	RESULTADOS	23
5.1	Problema Proposto.....	23
5.2	Exemplo Viga Mista Biapoiada.....	24
5.3	Exemplo Viga Mista Semicontínua.....	30
5.4	Análise Paramétrica dos Sistemas Estruturais.....	41
6	CONCLUSÃO	42

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a é a área do perfil de aço;

A_{ac} é a área tracionada da seção do perfil de aço;

A_{af} é a área da mesa superior do perfil de aço;

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

A_{aw} é a área da alma do perfil de aço, igual ao produto $h_w t_w$;

A_{sl} é a área da armadura negativa;

C_{cd} é a força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto;

T_{ad} é a força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço;

C_{ad} é a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;

Q_{Rd} é a força resistente de cálculo do conector de cisalhamento;

a é a espessura da região comprimida da laje ou, para interação parcial, a espessura considerada efetiva

b é a largura efetiva da laje de concreto;

d é a altura total do perfil de aço;

d_1 é a distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;

d_3 é a distância do centro geométrico da armadura longitudinal à LNP;

d_4 é a distância da força de tração, situada no centro geométrico da área tracionada da seção do perfil de aço, à LNP;

d_5 é a distância da força de compressão, situada no centro geométrico da área comprimida da seção do perfil de aço, à LNP

k_s é a rigidez das barras da armadura

k_{cs} é a rigidez dos conectores

k_i é a rigidez da ligação inferior

h_F é a altura das nervuras da laje com fôrma de aço incorporada;

h_w é a altura da alma, tomada como a distância entre as faces internas das mesas;

h_{wc} é a altura da parte comprimida da alma;

t_c é a altura da laje de concreto (se houver fôrma de aço incorporada, é a espessura acima das nervuras);

t_f é a espessura da mesa superior;

t_w é a espessura da alma;

y distância do topo do perfil ao centro da armadura;

y_c é a distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil;

y_p é a distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior do perfil de aço;

y_t é a distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil;

1 INTRODUÇÃO

As vigas de aço suportam, normalmente, a laje pelo flange superior. Quando não temos uma ligação entre a viga de aço e a laje de concreto, os dois elementos trabalham separadamente. Denominamos viga mista o elemento estrutural composto por uma faixa da laje de concreto e a viga de aço quando estes dois estão unidos por elementos de ligação.

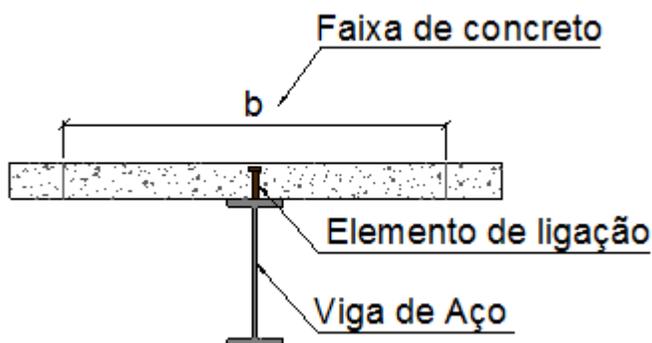


FIGURA 1: Seção transversal de viga mista

A viga mista de aço e concreto combina a resistência do aço a tensões de tração e a capacidade da laje de suportar tensões de compressão. Não conectar a laje com a viga metálica reduz a eficiência estrutural da edificação e muitas vezes inviabiliza financeiramente o projeto. A combinação de materiais para formação de um elemento estrutural único está alinhada com uma notória demanda de mercado para sistemas construtivos mais racionalizados e eficientes.

A racionalização no consumo dos materiais requer diversas verificações adicionais durante a etapa de cálculo para que a estrutura mista desempenhe de forma adequada sua função. A avaliação da resistência da viga de aço isolada durante a etapa de construção, a determinação da largura da faixa da laje que trabalha em conjunto com a viga metálica, a determinação da quantidade de conectores e a determinação das propriedades da seção transversal final são exemplos de itens que devem ser verificados pelo projetista.

A ligação entre os elementos estruturais é, também, um item relevante que deve ser avaliado durante a etapa de projeto. Ligações flexíveis permitem a rotação no apoio e o momento fletor nesse ponto é considerado nulo. Já nas ligações rígidas o ângulo entre os componentes

estruturais que se interceptam é praticamente o mesmo após a estrutura ser carregada e há a transferência integral de momento fletor.



FIGURA 2: Detalhes de ligação (Rígida, Semirrígida, Flexível)

A alteração no detalhe de ligação pode alterar o comportamento da estrutura e permitir uma economia adicional no sistema de piso. A utilização de ligações rígidas e semirrígidas resulta em elementos de grande eficiência estrutural e com menores dimensões de seções transversais.

2 OBJETIVO

Esse trabalho tem como objetivo avaliar e comparar o peso do perfil de aço para vãos e carregamentos usuais em pisos de edifícios utilizando vigas mistas de aço e concreto biapoiadas e semicontínuas. Através de valores obtidos, será possível determinar um gráfico correlacionando o peso e o vão que permitirá avaliar o sistema estrutural mais econômico para o projeto de uma edificação. Há, também, a elaboração de um exemplo numérico com o objetivo de ilustrar os dois métodos de análise, vigas biapoiadas e vigas semicontínuas.

3 METODOLOGIA

O peso de aço do perfil metálico que compõe a viga mista será determinado a partir do dimensionamento de vigas de piso com diferentes vãos. Serão avaliadas vigas biapoiadas e vigas semicontínuas, solicitadas com carregamento uniforme. Os resultados do dimensionamento serão tabelados e poderão ser utilizados na tomada de decisão de um projeto estrutural.

Sistemas biapoiados são estaticamente determinados e os esforços solicitantes não dependem da geometria e da rigidez.

Os esforços solicitantes e as deformações dos sistemas semicontínuos serão obtidos por meio de modelos computacionais elaborados no software de análise SAP2000. Antes da cura do concreto não temos a ligação mista desconsidera-se, portanto, a rigidez da ligação nessa etapa de carregamento. Após a cura a rigidez na região de momento positivo é afetada pela fluência e retração do concreto e por esse motivo são necessários mais dois modelos para determinação dos esforços e das deformações.

A figura abaixo expõe a geometria e a rigidez adotada nos modelos.

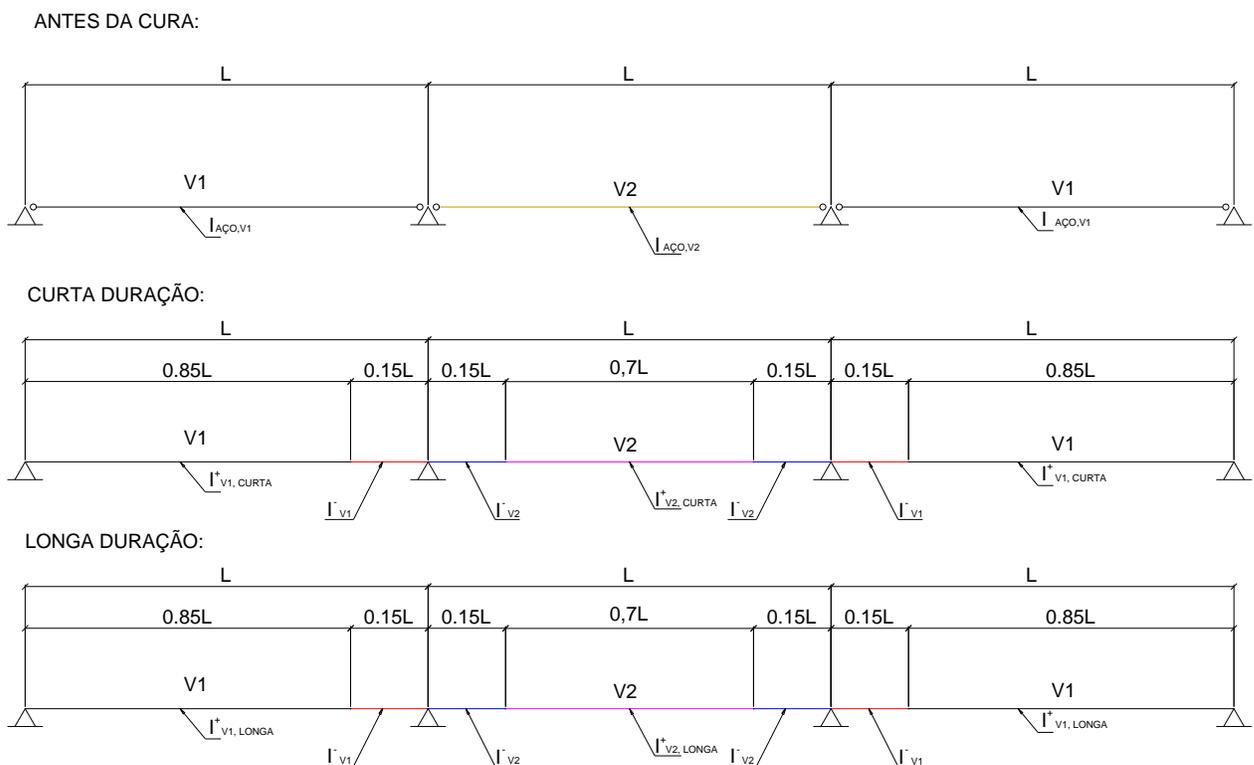


FIGURA 3: Modelo estrutural viga semicontínua

De acordo com QUEIROZ, G (2001) 15% do vão para cada lado do apoio representa de maneira satisfatória a influência da fissuração do concreto e por isto essa regra é usada ao invés da determinação exata do ponto de inflexão.

Planilhas eletrônicas complementarão o trabalho, auxiliando na obtenção das propriedades elásticas e resistência última da viga mista. A análise elástica das vigas semicontínuas que é feita neste trabalho depende da rigidez inicial das ligações e essa, também, será obtida por meio de planilha eletrônica.

A mola de rotação é inserida no modelo computacional conforme FIGURA 4.

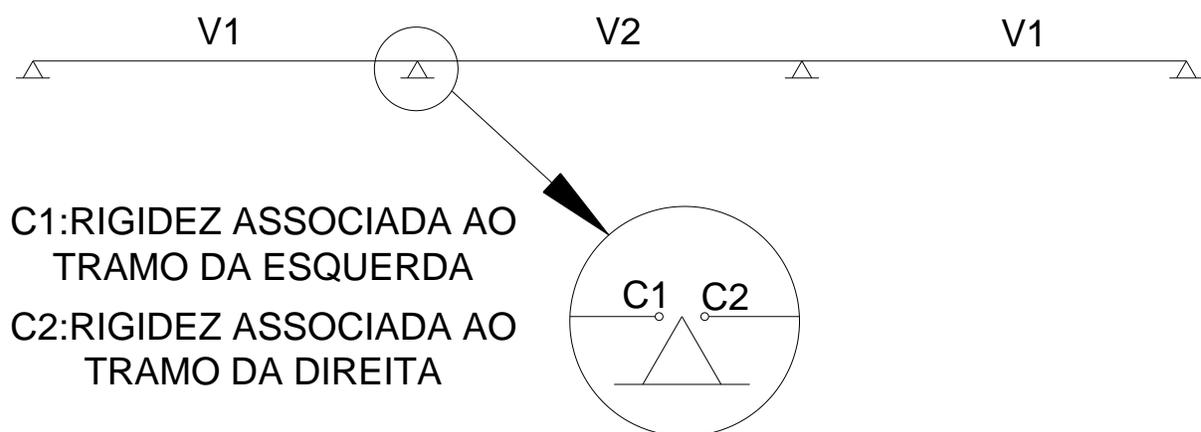


FIGURA 4: Mola rotacional

Os resultados dos esforços solicitantes são então comparados com a resistência da seção. A determinação da resistência dos elementos mistos será feita segundo critérios normativos da ABNT NBR8800:2008.

O dimensionamento de onze vãos (4m, 5m, 6m,..., 11m, 12m, 14m) são registrados para elaboração do gráfico peso versus vão.

As características principais das vigas mistas de aço e concreto que são escopo desse estudo são:

- Laje de concreto moldada no local e com o fundo apoiado sobre o flange superior da viga metálica;

- Perfil I duplamente simétrico e fletido em relação ao eixo perpendicular ao plano médio alma.
- Vigas mistas biapoiadas (vínculo externo flexível) e semicontínuas (vínculo externo semirrígido). As vigas mistas semicontínuas serão dimensionadas com ligação mista, ou seja, a laje de concreto é parte integrante da ligação;
- Vigas mistas não escoradas;
- Região de momento positivo da viga mista com interação parcial ou completa
- Região de momento negativo da viga mista semicontínua à interação é completa;

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Etapas de Verificação

A verificação dos elementos mistos é necessária durante a fase de construção e final de utilização. Não há necessidade de fazer a verificação da etapa de construção quando a construção é escorada. Sistemas escorados apresentam flechas desprezíveis durante a fase de construção e trabalham, somente, com a resistência final da viga mista e inercia efetiva.

Métodos construtivos não escorados demandam uma avaliação da etapa de construção. Nessa fase da obra temos unicamente o perfil de aço para contribuir com a resistência aos esforços solicitantes (concreto antes da cura e sobrecarga de construção). O concreto irá curar com a flecha prevista para os esforços de construção. Em um segundo momento ocorre a cura do concreto que resulta em um aumento da resistência final permitindo assim a aplicação de sobrecargas de utilização e revestimentos. A contra flecha é importante nesse tipo de sistema uma vez que anula a deformação durante a construção.

4.2 Largura Efetiva

A largura da laje de concreto que contribui para a resistência da viga mista na região de momento positivo é igual a soma das larguras à esquerda e a direita do eixo da viga de aço, cada uma delas sendo tomada como o menor dos valores a seguir:

- 1/8 do comprimento de referência L_c ($L_c = L$ para vigas biapoiadas, $L_c=0.7L$ para vãos intermediários de vigas semicontínuas e $L_c = 0.8L$ para vãos externos);
- Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- Distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço;

A largura efetiva da laje para região de momento negativo é igual a soma das larguras à esquerda e a direita da linha de centro da viga de aço, cada uma delas sendo tomada como o menor dos três valores abaixo:

- 1/8 do comprimento de referência L_c [$L_c = (L_1+L_2)/4$];
- Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- Distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço;

As figuras a seguir expõem a metodologia para o cálculo da largura que irá contribuir na resistência da viga mista.

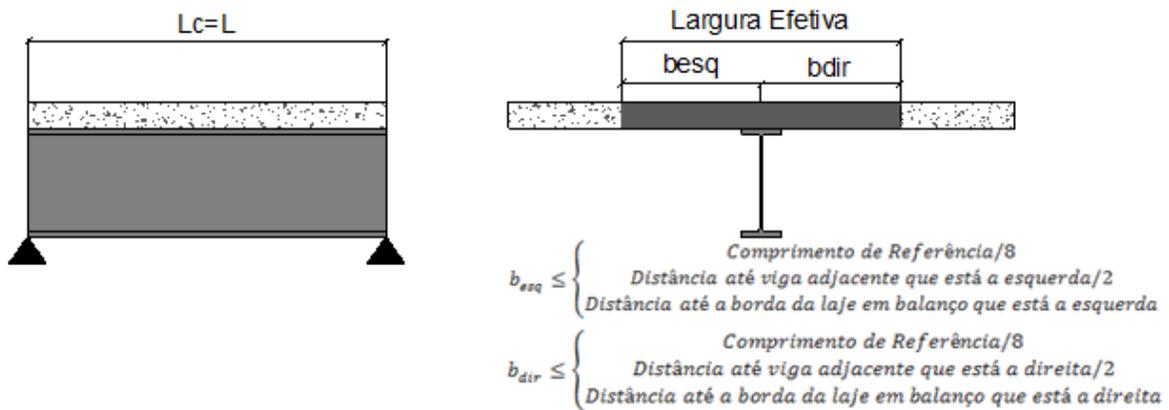


FIGURA 5: Largura Efetiva Viga Biapoiada

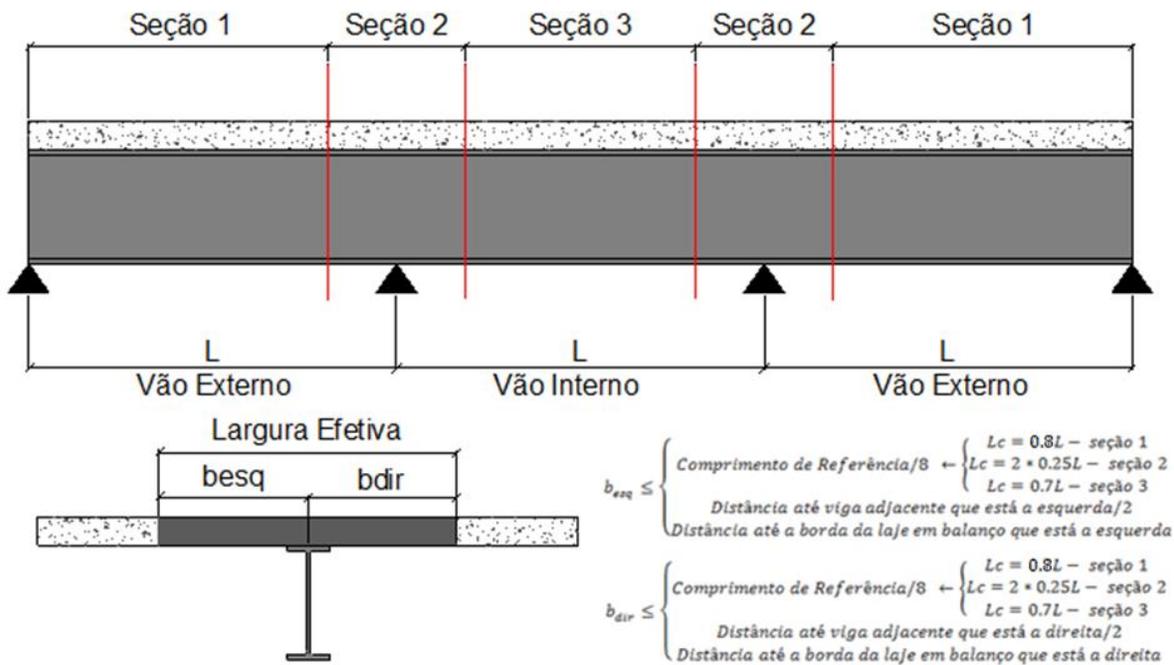


FIGURA 6: Largura Efetiva Viga Semicontínua

4.3 Conectores

A união da faixa da laje de concreto e viga ocorre por meio de conectores de cisalhamento instalados na face superior do perfil metálico. Barra de aço espiral, cantoneiras enrijecidas, chapa de aço e Hilti-HVB são exemplos de conectores utilizados, no entanto, os que elementos de ligação mais usuais e previstos pela ABNT NBR8800:2008 são os perfis U e Stud Bolts.

A resistência dos conectores de cisalhamento do tipo stud bolt pode ser obtida pela equação abaixo.

$$Q_{rd} < \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \\ R_g R_p A_{cs} f_{ucs} \\ \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \end{cases} \quad 4.1$$

4.4 Deformações

As propriedades elásticas são importantes para a verificação das tensões na viga mista e das deformações. As formulações para determinação dessas propriedades foram obtidas na ABNT NBR8800:2008.

As propriedades para região de momento fletor positivo e para interação completa da viga de aço com a laje de concreto.

$$y_0 = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} \quad 4.2$$

$$I_{tr} = \sum A_i y_i^2 + \sum I_0 - \left(\sum A_i \right) y_0^2 \quad 4.3$$

$$W_{tr} = \frac{I_{tr}}{y_0 + d/2} \quad 4.4$$

Caso não exista uma quantidade de conectores suficientes para transferir o esforço cortante longitudinal que existe entre a laje de concreto e o perfil de aço, as equações abaixo devem ser utilizadas para corrigir a inércia da seção transversal. A inércia da viga mista será ajustada de acordo com o grau de interação, η_i , que existe entre a viga de aço e a laje de concreto.

$$I_{ef} = I_a + (I_{tr} - I_a) \sqrt{\eta_i} \quad 4.5$$

$$W_{ef} = W_a + (W_{tr} - W_a) \sqrt{\eta_i} \quad 4.6$$

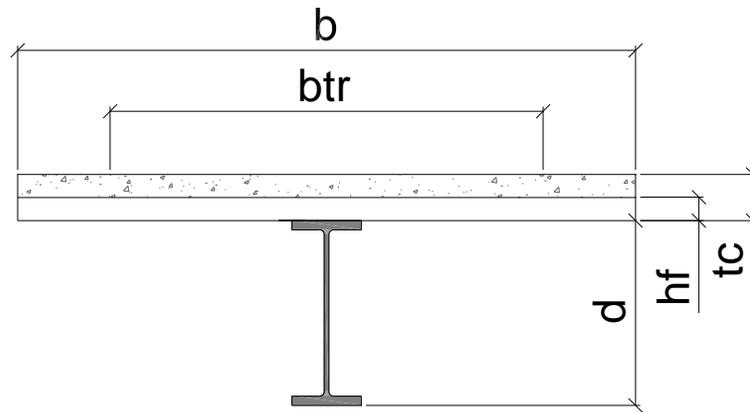


FIGURA 7: Seção transversal na região do momento positivo

As propriedades elásticas da região de momento negativo são expostas abaixo. Não é permitida a interação parcial para a região de momento negativo.

$$y_0 = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} = \frac{A_{sl} y}{A_{sl} + A_a} \quad 4.7$$

$$I_{neg} = \sum A_i y_i^2 + \sum I_a - \left(\sum A_i \right) y_0^2 = I_a + A_{sl} y^2 - (A_a + A_{sl}) y_0^2 \quad 4.8$$

$$W_{neg} = \frac{I_{neg}}{y_0 + d/2} \quad 4.9$$

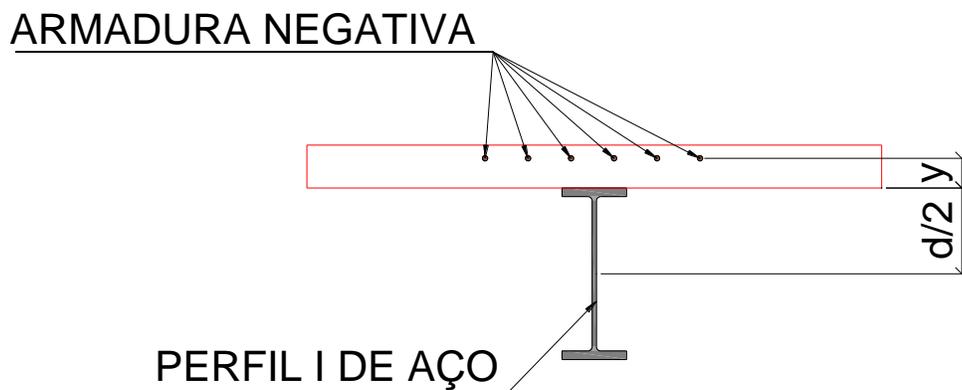


FIGURA 8: Seção transversal na região do momento negativo

4.5 Cisalhamento Resistente de Cálculo

A força resistente de cálculo das vigas mistas de alma cheia é determinada considerando apenas a resistência do perfil de aço.

4.6 Momento Fletor Resistente de Cálculo em Região de Momento Positivo

As vigas mistas biapoiadas e semicontínuas são verificadas na região de momento positivo para um estado limite associado à flambagem local da alma. A flambagem lateral com torção e a flambagem local da mesa não são considerados estados limites últimos.

É exposto neste item o equacionamento da ABNT NBR8800:2008. O cálculo das vigas de piso devem contemplar as seguintes prescrições.

Vigas mistas de alma cheia com $h/t_w \leq 3.76\sqrt{E/f_y}$

Viga mista de alma cheia com interação completa e linha neutra da seção plastificada na laje de concreto:

$$\sum Q_{Rd} \geq A_a f_{yd} \quad 4.10$$

$$0.85 f_{cd} b t_c \geq A_a f_{yd} \quad 4.11$$

$$C_{cd} = 0.85 f_{cd} b a \quad 4.12$$

$$T_{ad} = A_a f_{yd} \quad 4.13$$

$$a = \frac{T_{ad}}{0.85 f_{cd} b} \leq t_c \quad 4.14$$

$$M_{Rd} = \beta_{vm} T_{ad} (d_1 + h_F + t_c - a/2) \quad 4.15$$

Viga mista de alma cheia com interação completa e linha neutra da seção plastificada no perfil de aço:

$$\sum Q_{Rd} \geq 0.85f_{cd}bt_c \quad 4.16$$

$$A_a f_{yd} \geq 0.85f_{cd}bt_c \quad 4.17$$

$$C_{cd} = 0.85f_{cd}bt_c \quad 4.18$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2}(A_a f_{yd} - C_{cd}) \quad 4.19$$

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad 4.20$$

Para $C_{ad} \leq A_a f_{yd}$ linha neutra na mesa superior

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_a f_{yd}} t_f \quad 4.21$$

Para $C_{ad} > A_a f_{yd}$ linha neutra na alma

$$y_p = t_f + h_w \frac{C_{ad} - A_a f_{yd}}{A_{aw} f_{yd}} \quad 4.22$$

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t \right) \right] \quad 4.23$$

Viga mista de alma cheia com interação parcial

$$\sum Q_{Rd} < A_a f_{yd} \quad 4.24$$

e

$$\sum Q_{Rd} < 0.85f_{cd}bt_c \quad 4.25$$

Ocorrendo essas condições temos:

$$C_{cd} = \sum Q_{Rd} \quad 4.26$$

C_{ad} , T_{ad} e y_p são obtidos com a formulação da linha neutra no perfil de aço.

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{a}{2} + h_F + d - y_t \right) \right] \quad 4.27$$

$$a = \frac{C_{cd}}{0.85f_{cd}b} \quad 4.28$$

4.7 Momento Fletor Resistente de Cálculo em Região de Momento Negativo

O momento fletor negativo das vigas mistas semicontínuas deverá ser verificado. De acordo com a ABNT NBR8800:2008 obtemos a resistência para esse estado limite ultimo.

Vigas mistas de alma cheia com $2h_{wc}/t_w \leq 3.76\sqrt{E/f_y}$ e $b_f/2t_f \leq 0.38\sqrt{E/f_y}$

$$T_{ds} = A_{sl}f_{yd} \quad 4.29$$

$$M_{Rd}^- = T_{ds}d_3 + A_{at}f_{yd}d_4 + A_{ac}f_{yd}d_5 \quad 4.30$$

O número de conectores n entre a seção de momento máximo negativo e a seção de momento nulo, obtido na análise estrutural, deve ser tal que.

$$\sum Q_{Rd} \geq T_{ds} \quad 4.31$$

4.8 Flambagem Lateral com Distorção da Seção Transversal

O flange inferior da viga semicontínua está comprimido na região do apoio e há uma ausência de travamento lateral que normalmente é conferido pela laje de concreto. A mesa comprimida

pode apresentar uma instabilidade lateral tendo em vista que há, somente, uma restrição pela alma que é flexível. A figura abaixo exemplifica esse fenômeno típico da viga semicontínua.

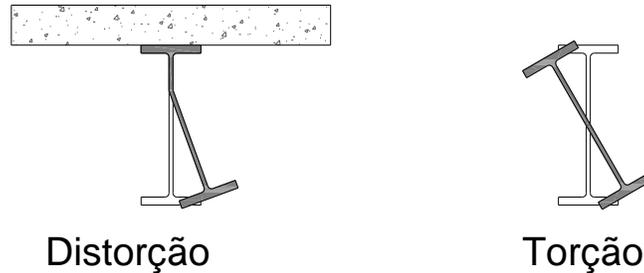


FIGURA 9: Flambagem Lateral

A verificação da flambagem lateral com distorção da seção transversal da viga mista em decorrência dos momentos negativos pode ser feita segundo ABNT NBR8800:2008:

$$M_{dist,Rd}^- = \chi_{dist} M_{Rd}^- \quad 4.32$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{M_{Rk}^-}{M_{cr}}} \quad 4.33$$

$$\lambda_{dist} = 5 \left(1 + \frac{t_w h_0}{4 b_f t_f} \right) \left[\left(\frac{f_y}{E C_{bdist}} \right)^2 \left(\frac{h_0}{t_w} \right)^3 \left(\frac{t_f}{b_f} \right) \right]^{0.25} \quad 4.34$$

$$M_{cr} = \alpha_g \frac{C_{dist}}{L} \sqrt{\left(GJ + \frac{k_r L^2}{\pi^2} \right) E I_{af,y}} \quad 4.35$$

4.9 Ligação Mista

O tipo de vinculação das vigas mistas com as peças adjacentes pode alterar os esforços solicitantes conforme indicado na figura abaixo. A capacidade de rotação e a resistência a momento são os dois critérios que classificam a vinculação da peça. Rotações relativas pequenas são típicas de ligações rígidas e ligações rotuladas são aquelas projetadas de forma

tal que não sejam capazes de transmitir momentos. Quando a rigidez da ligação descreve um comportamento intermediário entre flexível e rígida a conexão é denominada como semirrígida. A relação momento-rotação deverá ser conhecida para permitir que se controle o grau de interação entre as barras ligadas.

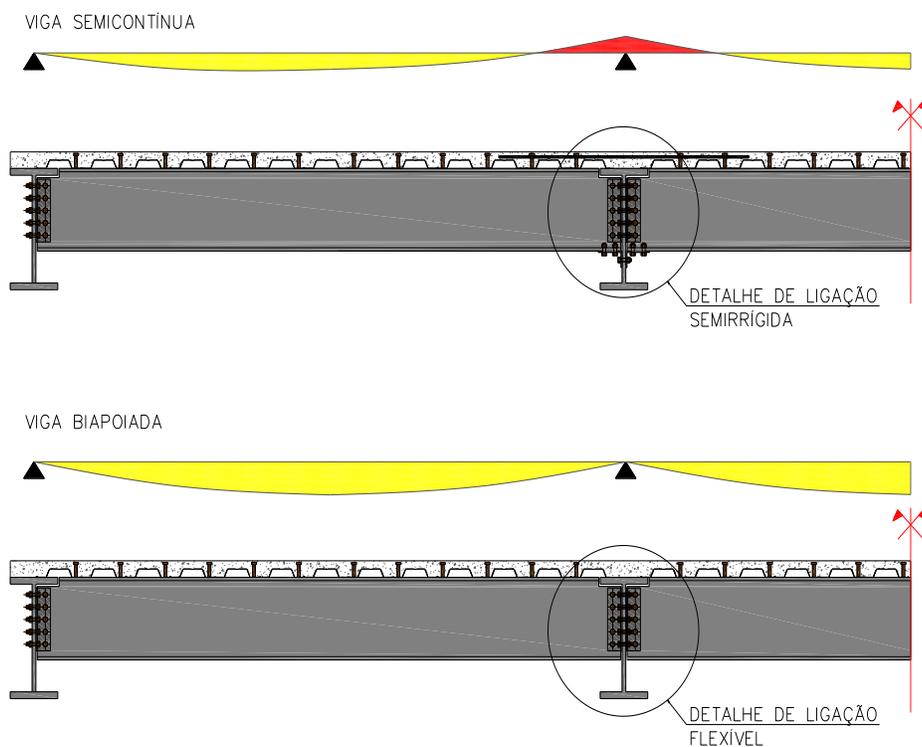


FIGURA 10: Comportamento da viga mista

As vigas biapoiadas possuem as seguintes vantagens de acordo com, QUEIROZ, G (2001):

- Normalmente apenas uma pequena parte da alma fica sujeita à compressão e a mesa comprimida é travada pela laje, assim, a resistência da viga não é limitada pela flambagem do perfil de aço, global ou local;
- A alma fica sujeita a estados de tensão menos severos; torna-se maior a possibilidade de se executar furos para a passagem de dutos;

- Os momentos fletores e as forças cortantes são estaticamente determinados e não são influenciados pela fissuração, retração ou deformação lenta do concreto;
- Não há interação entre os comportamentos de vãos adjacentes;
- Os momentos transmitidos aos pilares são baixos ou quase nulos;
- A fissuração do concreto é menor, já que está sujeito à tração apenas nos apoios;
- A análise estrutural e o dimensionamento são rápidos e simples;

O sistema semicontínuo possui duas grandes vantagens em relação ao simplesmente apoiado. O primeiro benefício é o melhor aproveitamento das seções mistas, tanto na região de momentos positivos quanto na região de momentos negativos, levando a uma economia significativa de material. Já a segunda vantagem está relacionada com o desempenho da estrutura uma vez que há um aumento da rigidez e das características relativas à vibração em relação ao sistema simplesmente apoiado.

Ligações semirrígidas aumentam de forma expressiva o custo das ligações em relação ao sistema biapoiado. Normalmente para simplificar o detalhe e execução dessas ligações há a consideração de uma ligação mista. Nesse tipo de conexão a laje de concreto participa da transmissão de momento fletor da viga mista para o elemento suporte. Quando o momento na viga for negativo a armadura é tracionada e a ligação no flange inferior da viga será comprimida.

A resistência e a rigidez são as principais características a serem determinadas. A rigidez da ligação pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$C = \frac{(d + y)^2}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_{cs}} + \frac{1}{k_i}} \quad 4.36$$

5 RESULTADOS

5.1 Problema Proposto

Avaliamos para construção do gráfico peso versus vão o problema exposto na FIGURA 11.

Variamos o vão L de 4m até 14m.

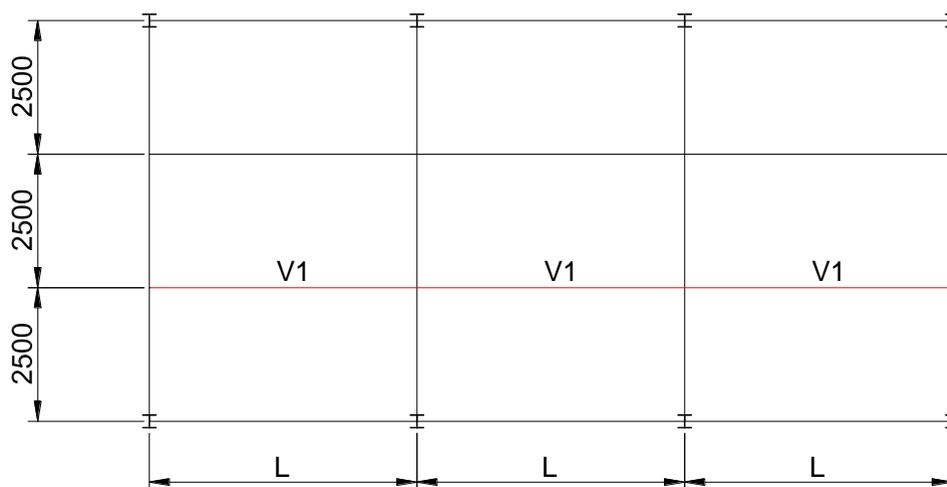


FIGURA 11: Geometria do Problema

Descrição dos carregamentos:

Carga permanente aplicada antes da cura = 6.25 kN/m

Sobrecarga de construção = 2.5kN/m

Carga permanente aplicada após a cura do concreto = 7.5 kN/m

Sobrecarga de utilização = 12.5 kN/m

Concreto de peso normal com $f_{ck} = 20\text{MPa}$

Aço de vigas laminadas: $f_y=345\text{MPa}$, $f_u = 450\text{MPa}$

Aço de vigas soldadas: $f_y=350\text{MPa}$, $f_u=500\text{MPa}$

Laje MF75 com altura total de 140mm

5.2 Exemplo de Viga Mista Biapoiada

Para exemplificar o método de dimensionamento de vigas biapoiadas é exposta abaixo a verificação da viga 1 apresentada na FIGURA 12. Para os demais vãos dimensionados neste trabalho as verificações são similares e acompanham a formulação exposta no item 4.

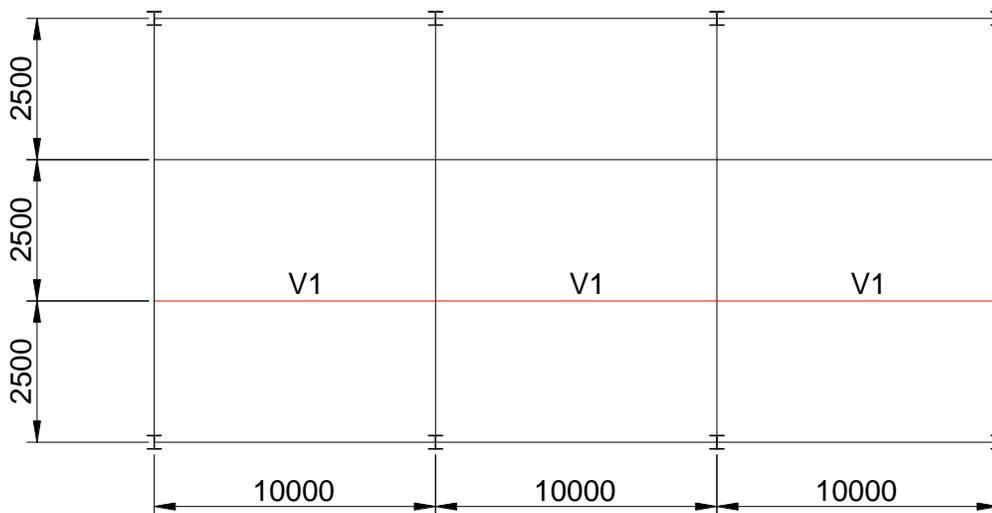


FIGURA 12: Vigas Biapoiadas 10m de Vão

- Propriedades Laje de Concreto:

$$f_{ck} = 20\text{MPa} = 2\text{kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = 2/1.4 = 1.43\text{kN/cm}^2$$

$$E_c = 4760 * \sqrt{f_{ck}} = 4760 * \sqrt{20} = 21287\text{MPa} = 2129\text{kN/cm}^2$$

- Combinações:

$$\text{ELU Final} = 1.5 \text{ CP} + 1.5 \text{ SC}$$

$$\text{ELU Construção} = 1.3 \text{ CP} + 1.3 \text{ SC}$$

$$\text{ELS Final} = 1 \text{ CP} + 1\text{SC}$$

- Esforços Solicitantes:

ELU Final:

$$M_{sd} = 1.5 * (13.75 * 10^2 / 8) + 1.5 * (12.5 * 10^2 / 8) = 492.2 \text{ kN.m} = 49220 \text{ kN.cm}$$

$$V_{sd} = 1.5 * (13.75 * 10 / 2) + 1.5 * (12.5 * 10 / 2) = 196.9 \text{ kN}$$

ELU Construção:

$$M_{sd} = 1.3 * (6.25 * 10^2 / 8) + 1.3 * (2.5 * 10^2 / 8) = 142.2 \text{ kN.m} = 14220 \text{ kN.cm}$$

ELS Final:

$$M_{sd} = 1 * (13.75 * 10^2 / 8) + 1 * (12.5 * 10^2 / 8) = 328.2 \text{ kN.m} = 32820 \text{ kN.cm}$$

- Propriedades Geométricas da Seção transversal

PS450X200X6.3X9.5

$$A_a = 65.2 \text{ cm}^2$$

$$d = 450 \text{ mm}$$

$$h = 431 \text{ mm}$$

$$b_f = 200 \text{ mm}$$

$$t_f = 9.5 \text{ mm}$$

$$t_w = 6.3 \text{ mm}$$

$$I_x = 22640.0 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 1006.2 \text{ cm}^3$$

$$Z_x = 1129.5 \text{ cm}^4$$

- Conectores

$$\alpha = 0.6 \text{ (Grau de interação)}$$

$$\phi = 19 \text{ mm}$$

$$f_{ucs} = 415 \text{ MPa}$$

- Verificação antes da cura

FLA

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{431}{6.3} = 68.4 < \lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 89.9 \rightarrow M_{Rk} = M_{pl}$$

FLM

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{200}{2 * 9.5} = 10.5 > \lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 9.1$$

$$k_c = 4/\sqrt{h/t_w} = 0.483$$

$$\lambda = 10.5 < \lambda_r = 0.95 \sqrt{\frac{E}{(0.7f_y)/k_c}} = 18.9$$

$$M_{Rk} = \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] = 37374 kNcm$$

FLT

Fôrma steel deck contém lateralmente a viga. $\rightarrow M_{Rk} = M_{pl}$

$$M_{pl} = Z f_y = 1129.5 * 35 = 39533 kN.cm$$

$$M_r = W 0.7 f_y = 1006.2 * 0.7 * 35 = 24652 kN.cm$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{1.1} \left[39533 - (39533 - 24652) \frac{10.5 - 9.1}{18.9 - 9.1} \right] = 33946 kNcm$$

$$M_{Sd} = 14220 kN.cm < M_{Rd} = 33946 kN.cm \rightarrow \text{Atende}$$

- Verificação ao momento após a cura:

Largura Efetiva:

$$b = \left(< \left\{ \begin{array}{l} \frac{L}{8} = \frac{1000}{8} = 125cm \\ \frac{\text{Distância entre vigas}}{2} = \frac{250}{2} = 125cm \end{array} \right. \right) * 2 = 250cm$$

Interação Parcial

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{431}{6.3} = 68.4 < \lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 89.9 \rightarrow \text{plastificação}$$

$$0.85 f_{cd} b t_c = 0.85 * 1.43 * 250 * 6.5 = 1973.2 kN$$

$$A_a f_{yd} = 65.2 * 35/1.1 = 2073.1kN$$

LNP no perfil

$$F_{hd} = 1973.2kN$$

$$C_{cd} = \alpha F_{hd} = 0.6 * 1973.2 = 1183.9kN$$

$$C_{ad} = 1/2(A_a f_{yd} - C_{cd}) = 1/2(2073.1 - 1183.9) = 444.6kN$$

$$T_{ad} = C_{ad} + C_{cd} = 1628.5kN$$

$$a = \frac{C_{cd}}{0.85 f_{cd} b} = \frac{1183.9}{0.85 * 1.43 * 250} = 3.90cm$$

$$A_{fs} f_{yd} = (20 * 0.95) * 35/1.1 = 604.5kN$$

$C_{ad} < A_{fs} f_{yd}$: Linha neutra plástica na mesa superior

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{fs} f_{yd}} t_{fs} = \frac{444.6}{604.5} * 0.95 = 0.70cm$$

$$M_{Rd} = C_{ad} * (d - y_t - y_c) + C_{cd} * (t_c - a/2 + h_F + d - y_t)$$

$y_t = 16.6cm$: Distância do cg da parte tracionada até face inferior

$y_c = 0.35cm$: Distância do cg da parte comprimida até face superior

$$M_{Rd} = 445 * (45 - 16.6 - 0.35) + 1184 * \left(6.5 - \frac{3.9}{2} + 7.5 + 45 - 16.6\right)$$

$$M_{Rd} = 60375kN.cm$$

$$M_{Sd} = 49220kN.cm < M_{Rd} = 60375kN.cm \rightarrow \text{Atende}$$

- Verificação a Cortante:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{431}{6.3} = 68.4 > \lambda_p = 2.46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 58.8$$

$$\lambda < \lambda_r = 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1.37 \sqrt{\frac{5 * 20000}{35}} = 73.2$$

$$V_{pl} = 0.6 * A_w * f_y = 0.6 * (45 * 0.63) * 35 = 595kN$$

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p V_{pl}}{\lambda \gamma_{a1}} = 465kN$$

$$V_{Sd} = 197kN < V_{Rd} = 465kN \rightarrow \text{Atende}$$

- Verificação Deformação:

Ações de Curta Duração

Flecha antes da cura

$$\delta_{cp1} = \frac{5qL^4}{384EI_a} = \frac{5 * 0.0625 * 1000^4}{384 * 20000 * 22640} = 1.8cm = 18mm$$

Considerando 1.5cm de contra flecha

Flecha após a cura (Carga Permanente)

$$\delta_{cp2} = \frac{5qL^4}{384EI_{ef}} = \frac{5 * 0.075 * 1000^4}{384 * 20000 * 63657} = 0.76cm = 8mm$$

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\alpha}(I_{tr} - I_a)$$

$$\alpha_E = \frac{E}{E_c} = \frac{20000}{2129} = 9.4$$

$$b_{tr} = \frac{b}{\alpha_E} = \frac{250}{9.4} = 26.6cm$$

$$y_{tri} = \frac{A_a * y_a + A'_c(d + h_F + t_c/2)}{A_A + A'_c}$$

$$y_{tri} = \frac{65.2 * 22.5 + (26.6 * 6.5)(45 + 7.5 + 6.5/2)}{65.2 + (26.6 * 6.5)} = 46.6cm$$

$$y_{tri} < d + h_F \rightarrow \text{LNE no perfil}$$

$$y_{tr} = y_{tri} = 46.6cm$$

$$I_{tr} = I_a + A_a(y_{tr} - y_a)^2 + \frac{b_{tr} t_c^3}{12} + A'_c(d + h_F + \frac{t_c}{2} - y_{tr})^2$$

$$I_{tr} = 22640 + 65.2(46.6 - 22.5)^2 + \frac{26.6 * 6.5^3}{12} + (26.6 * 6.5)(45 + 7.5 + 3.25 - 46.6)^2$$

$$I_{tr} = 75593cm^4$$

$$I_{ef} = 22640 + \sqrt{0.6}(75593 - 22640) = 63657cm^4$$

Flecha após a cura (Sobrecarga)

$$\delta_{sc} = \frac{5qL^4}{384EI_{ef}} = \frac{5 * 0.125 * 1000^4}{384 * 20000 * 63657} = 1.27cm = 13mm$$

Flecha Total

$$\delta = 18 - 15 + 8 + 13 = 24mm$$

$$\delta_{lim} = 10000/350 = 28.6mm$$

$$\delta = 24mm < \delta_{lim} = 28mm \rightarrow \text{Atende}$$

Ações de Longa Duração

Flecha após a cura (Carga Permanente)

$$\delta_{cp} = \frac{5qL^4}{384EI_{ef}} = \frac{5 * 0.075 * 1000^4}{384 * 20000 * 48986} = 1.0cm = 10mm$$

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\alpha}(I_{tr} - I_a)$$

$$\alpha_E = \frac{3E}{E_c} = \frac{20000}{2129} = 28.2$$

$$b_{tr} = \frac{b}{\alpha_E} = \frac{250}{28.2} = 8.86cm$$

$$y_{tri} = \frac{A_a * y_a + A'_c(d + h_F + t_c/2)}{A_a + A'_c}$$

$$y_{tri} = \frac{65.2 * 22.5 + (8.86 * 6.5)(45 + 7.5 + 6.5/2)}{65.2 + (8.86 * 6.5)} = 38.2cm$$

$$y_{tri} < d + h_F \rightarrow \text{LNE no perfil}$$

$$y_{tr} = y_{tri} = 38.2cm$$

$$I_{tr} = I_a + A_a(y_{tr} - y_a)^2 + \frac{b_{tr} t_c^3}{12} + A'_c(d + h_F + \frac{t_c}{2} - y_{tr})^2$$

$$I_{tr} = 22640 + 65.2(38.2 - 22.5)^2 + \frac{8.86 * 6.5^3}{12} + (8.86 * 6.5)(45 + 7.5 + 3.25 - 38.2)^2$$

$$I_{tr} = 56652cm^4$$

$$I_{ef} = 22640 + \sqrt{0.6}(56652 - 22640) = 48986cm^4$$

Flecha Total

$$\delta = 18 - 15 + 9 + 13 = 25mm$$

$$\delta_{lim} = 28mm$$

$$\delta = 25mm < \delta_{lim} = 28mm \rightarrow \text{Atende}$$

Verificação da Tensão de Serviço

$$\frac{M_{GA,SK}}{W_a} + \frac{M_{L,SK}}{W_{ef}} < fy$$

$$\frac{7812}{1006.2} + \frac{25000}{1483.3} < 34.5$$

$$W_{tr} = \frac{I_{tr}}{y_{tr}} = \frac{75593}{46.6} = 1622.2 \text{ cm}^3$$

$$W_{ef} = W_a + \sqrt{\alpha}(W_{tr} - W_a) = 1483.3 \text{ cm}^3$$

$$7.76 + 16.8 = 24.5 < 31.8 \rightarrow \text{Atende}$$

- Quantidade de conectores

$$F_{hd} < \begin{cases} 0.85 f_{cd} b t_c = 1973 \text{ kN} \\ A_a f_{yd} = 2073 \text{ kN} \end{cases}$$

$$F_{hd} = 1973 \text{ kN}$$

$$Q_{rd} < \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{1}{2} \frac{2.84 \sqrt{2} * 2129}{1.25} = 74.1 \\ \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = \frac{0.75 * 2.84 * 41.5}{1.25} = 70.7 \text{ kN} \end{cases}$$

$$n = 0.6 \frac{1973}{70.7} \rightarrow 17 \text{ conectores para trecho entre apoio e momento máximo (34 total)}$$

5.3 Exemplo de Viga Mista Semicontínua

Para exemplificar o método de dimensionamento de vigas semicontínuas é exposta a seguir a verificação da viga 3 indicada na FIGURA 13. Para os demais vãos dimensionados neste trabalho as verificações são similares e acompanham as formulações expostas no item 4.

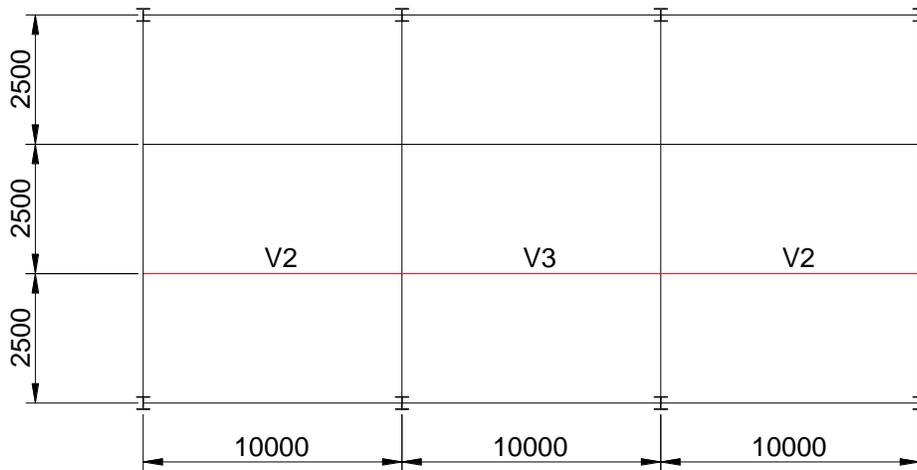


FIGURA 13: Vigas Semicontínuas 10m de Vão

- Ligação mista:

5 Barras com diâmetro igual a 12.5mm, CA-50 e $\epsilon_{su}=8\%$

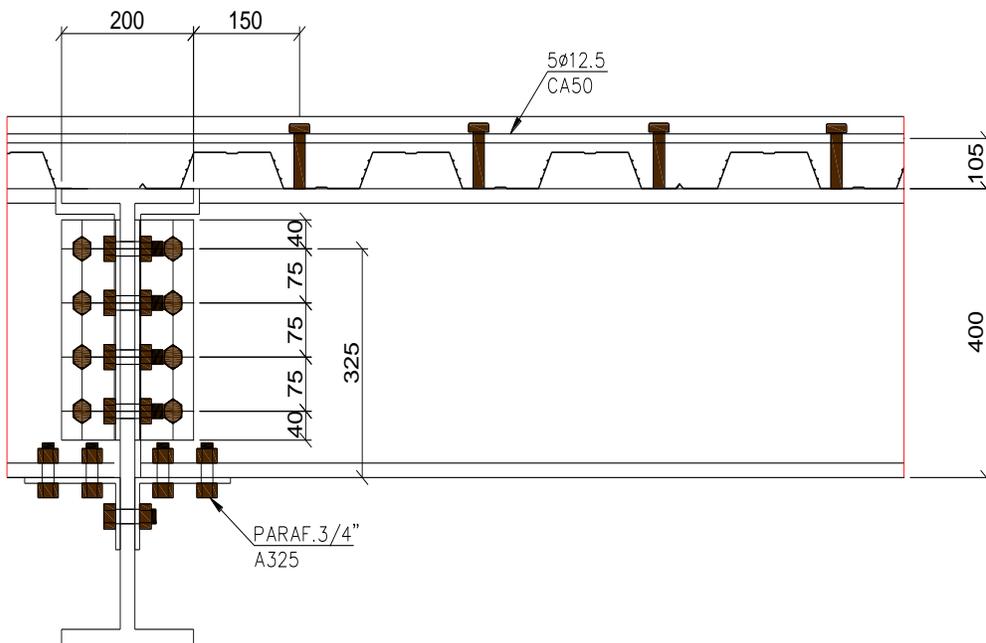


FIGURA 14: Ligação para Viga de 10m

$M/\Theta =$ 2189099 kNm/rad Rigidez Inicial

- Propriedades Geométricas da Seção transversal (Viga Interna)

PS400X160X6.3X9.5

$$A_a = 54.4 \text{ cm}^2$$

$$d = 400 \text{ mm}$$

$$h = 381 \text{ mm}$$

$$b_f = 160 \text{ mm}$$

$$t_f = 9.5 \text{ mm}$$

$$t_w = 6.3 \text{ mm}$$

$$I_x = 14495.1 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 724.8 \text{ cm}^3$$

$$Z_x = 822.2 \text{ cm}^4$$

- Conectores

$$\alpha = 0.6 \text{ (Grau de interação)}$$

$$\phi = 19 \text{ mm}$$

$$f_{ucs} = 415 \text{ MPa}$$

- Verificação antes da cura

FLA

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{381}{6.3} = 60.5 < \lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 89.9 \rightarrow M_{Rk} = M_{pl}$$

FLM

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{160}{2 * 9.5} = 8.4 < \lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 9.1 \rightarrow M_{Rk} = M_{pl}$$

FLT

Fôrma steel deck contém lateralmente a viga. $\rightarrow M_{Rk} = M_{pl}$

$$M_{Rd} = \frac{Z f_y}{1.1} = \frac{822.2 * 35}{1.1} = 26161 \text{ kNcm}$$

$$M_{Rd} < \frac{1.5 W f_y}{1.1} = \frac{1.5 * 724.8 * 35}{1.1} = 34592 \text{ kNcm} \rightarrow \text{Atende}$$

$$M_{Sd} = 14220 \text{ kN.cm (conforme item 5.2)} < M_{Rd} = 26161 \text{ kN.cm} \rightarrow \text{Atende}$$

- Verificação ao momento positivo após a cura:

Largura Efetiva:

$$b = \left(< \left\{ \begin{array}{l} \frac{L}{8} = \frac{0.7 * 1000}{8} = 87.5 \text{ cm} \\ \frac{\text{Distância entre vigas}}{2} = \frac{250}{2} = 125 \text{ cm} \end{array} \right. \right) * 2 = 175 \text{ cm}$$

Interação Parcial

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{431}{6.3} = 68.4 < \lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 89.9 \rightarrow \text{plastificação}$$

$$0.85 f_{cd} b t_c = 0.85 * 1.43 * 175 * 6.5 = 1382.6 \text{ kN}$$

$$A_a f_{yd} = 54.4 * 35/1.1 = 1731.0 \text{ kN}$$

LNP no perfil

$$F_{hd} = 1382.6 \text{ kN}$$

$$C_{cd} = \alpha F_{hd} = 0.6 * 1382.6 = 829.5 \text{ kN}$$

$$C_{ad} = 1/2(A_a f_{yd} - C_{cd}) = 1/2(1731 - 829.5) = 450.7 \text{ kN}$$

$$T_{ad} = C_{ad} + C_{cd} = 1280.3 \text{ kN}$$

$$a = \frac{C_{cd}}{0.85 f_{cd} b} = \frac{829.5}{0.85 * 1.43 * 175} = 3.90 \text{ cm}$$

$$A_{fs} f_{yd} = (16 * 0.95) * 35/1.1 = 483.6 \text{ kN}$$

$C_{ad} < A_{fs} f_{yd}$: Linha neutra plástica na mesa superior

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{fs} f_{yd}} t_{fs} = \frac{450.7}{483.6} * 0.95 = 0.88 \text{ cm}$$

$$M_{Rd} = C_{ad} * (d - y_t - y_c) + C_{cd} * (t_c - a/2 + h_F + d - y_t)$$

$$y_t = 13.3 \text{ cm}$$

$$y_c = 0.44 \text{ cm}$$

$$M_{Rd} = 450.7 * (40 - 13.3 - 0.44) + 830 * \left(6.5 - \frac{3.9}{2} + 7.5 + 40 - 13.3 \right)$$

$$M_{Rd} = 43998 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd} = 43998 \text{ kN.cm} \rightarrow \text{Atende}$$

- Verificação ao momento negativo após a cura

Largura Efetiva:

$$b = \left(< \left\{ \begin{array}{l} \frac{L}{8} = \frac{0.5 * 1000}{8} = 62.5cm \\ \frac{\text{Distância entre vigas}}{2} = \frac{250}{2} = 125cm \end{array} \right. \right) * 2 = 125cm$$

Interação Completa

$$(A_a - A_f) * f_{yd} = (54.4 - 16 * 0.95) * 35/1.1 = 1247.4kN$$

$$T_{ds} = A_{sl}f_{yd} = (5 * 1.22) * 50/1.1 = 266.8kN$$

$$A_f f_{yd} = (16 * 0.95) * 35/1.1 = 483.6kN$$

$$A_f f_{yd} + T_{ds} = 750.4kN < 1247.4kN \rightarrow LNP \text{ está na alma}$$

$$h_{wc} = h - \left[\left(h - \frac{T_{ds} \gamma_{a1}}{t_w f_y} \right) / 2 \right] = 38.1 - \left[\left(38.1 - \frac{266.8 * 1.1}{0.63 * 35} \right) / 2 \right] = 25.70$$

$$2h_{wc}/t_w = 2 * 25.7/0.635 = 80.9 \leq 3.76\sqrt{E/f_y} = 89.9 \rightarrow \text{Atende}$$

$$b_f/2t_f = \frac{160}{2 * 9.5} = 8.4 \leq 0.38\sqrt{E/f_y} = 9.1 \rightarrow \text{Atende}$$

$$M_{Rd}^- = T_{ds}d_3 + A_{at}f_{yd}d_4 + A_{ac}f_{yd}d_5$$

$$A_{at} = A_{fs} + (h - h_{wc})t_w = (16 * 0.95) + (38.1 - 25.7) * 0.63 = 23.0cm^2$$

$$A_{ac} = A_{fi} + h_{wc}t_w = (16 * 0.95) + (25.7 * 0.63) = 31.4cm^2$$

$$d_3 = y + d - tf - h_{wc} = 10.5 + 40 - 0.95 - 25.7 = 23.85cm$$

$$d_4 = 10.6cm$$

$$d_5 = 19.3cm$$

$$M_{Rd}^- = 266.8 * 23.85 + 23.0 * 31.8 * 10.6 + 31.4 * 31.8 * 19.3 = 33387kN.cm$$

$$M_{Rd} = 33387 kN.cm \rightarrow \text{Atende}$$

- Propriedades elásticas na região de momento positivo

Ações de Curta Duração

$$\alpha_E = \frac{E}{E_c} = \frac{20000}{2129} = 9.4$$

$$b_{tr} = \frac{b}{\alpha_E} = \frac{175}{9.4} = 18.6 \text{ cm}$$

$$y_{tri} = \frac{A_a * y_a + A'_c(d + h_F + t_c/2)}{A_a + A'_c}$$

$$y_{tri} = \frac{54.4 * 20 + (18.6 * 6.5)(40 + 7.5 + 6.5/2)}{54.4 + (18.6 * 6.5)} = 41.2 \text{ cm}$$

$$y_{tri} < d + h_F \rightarrow \text{LNE no perfil}$$

$$y_{tr} = y_{tri} = 41.2 \text{ cm}$$

$$I_{tr} = I_a + A_a(y_{tr} - y_a)^2 + \frac{b_{tr} t_c^3}{12} + A'_c(d + h_F + \frac{t_c}{2} - y_{tr})^2$$

$$I_{tr} = 14495 + 54.4(41.2 - 20)^2 + \frac{18.6 * 6.5^3}{12} + (18.6 * 6.5)(40 + 7.5 + 3.25 - 41.2)^2$$

$$I_{tr} = 50397 \text{ cm}^4$$

$$I_{ef} = 14495 + \sqrt{0.6}(50397 - 14495) = 42305 \text{ cm}^4$$

Ações de Longa Duração

$$\alpha_E = \frac{3E}{E_c} = \frac{20000}{2129} = 28.2$$

$$b_{tr} = \frac{b}{\alpha_E} = \frac{175}{28.2} = 6.21 \text{ cm}$$

$$y_{tri} = \frac{A_a * y_a + A'_c(d + h_F + t_c/2)}{A_a + A'_c}$$

$$y_{tri} = \frac{54.4 * 20 + (6.21 * 6.5)(40 + 7.5 + 6.5/2)}{54.4 + (6.21 * 6.5)} = 33.1 \text{ cm}$$

$$y_{tri} < d + h_F \rightarrow \text{LNE no perfil}$$

$$y_{tr} = y_{tri} = 33.1 \text{ cm}$$

$$I_{tr} = I_a + A_a(y_{tr} - y_a)^2 + \frac{b_{tr} t_c^3}{12} + A'_c(d + h_F + \frac{t_c}{2} - y_{tr})^2$$

$$I_{tr} = 14495 + 54.4(33.1 - 20)^2 + \frac{6.21 * 6.5^3}{12} + (6.21 * 6.5)(40 + 7.5 + 3.25 - 33.1)^2$$

$$I_{tr} = 36547 \text{ cm}^4$$

$$I_{ef} = 14495 + \sqrt{0.6}(36547 - 14495) = 31764 \text{ cm}^4$$

- Propriedades elásticas na região de momento negativo

$$y_g = \frac{A_{sl}(y + y_a)}{(A_a + A_{sl})} = \frac{6.1(10.5 + 20)}{(54.4 + 6.1)} = 3.1 \text{ cm}$$

$$I_{tr} = I_a + A_{sl}(y + y_a)^2 - (A_a + A_{sl})y_g^2$$

$$I_{tr} = 14495 + 6.1(10.5 + 20)^2 - (54.4 + 6.1)3.1^2 = 19588 \text{ cm}^4$$

- Descrição do modelo numérico

Três modelos foram elaborados para obter o resultado do dimensionamento da viga mista semicontínua. Os comprimentos dos trechos de momento negativo são considerados iguais a 15% do tramo.

O primeiro modelo simula a fase de construção, com a viga de aço submetido somente aos esforços solicitantes dessa etapa. A vinculação entre as barras é flexível.

O segundo modelo foi utilizado para obter os esforços e deformações de curta duração, sendo considerado o carregamento oriundo da sobrecarga de piso. Apenas 50% da sobrecarga é aplicada no vão 1 & 3 (V2) para se obter a maior fecha da viga V3. A vinculação entre as barras nessa etapa é semirrígida.

Por último avalia-se o terceiro modelo carregado com a carga permanente aplicada após a cura do concreto no intuito de obter nessa simulação os esforços e deformações de longa duração. A vinculação entre as barras nesse modelo, também, é semirrígida.

As figuras abaixo expõem a geometria e as vinculações do modelo computacional.

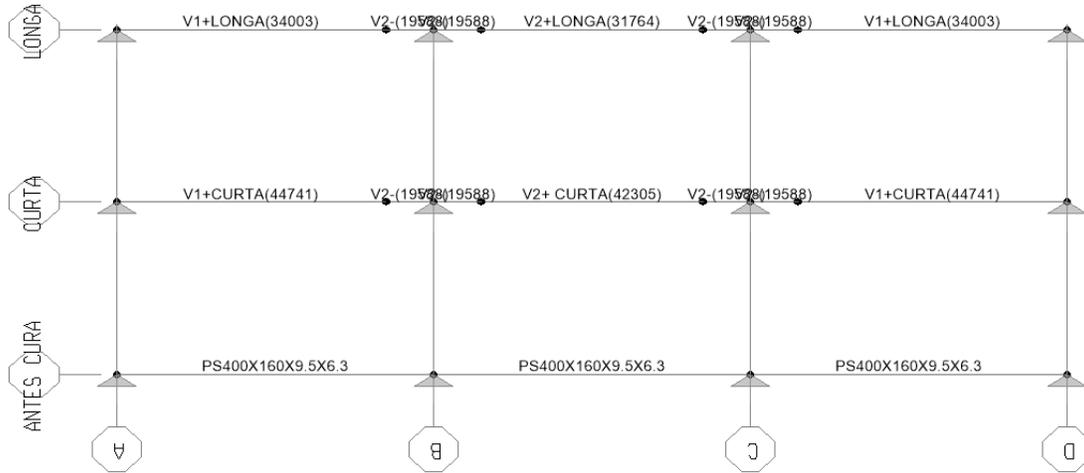


FIGURA 15: Modelo Estrutural

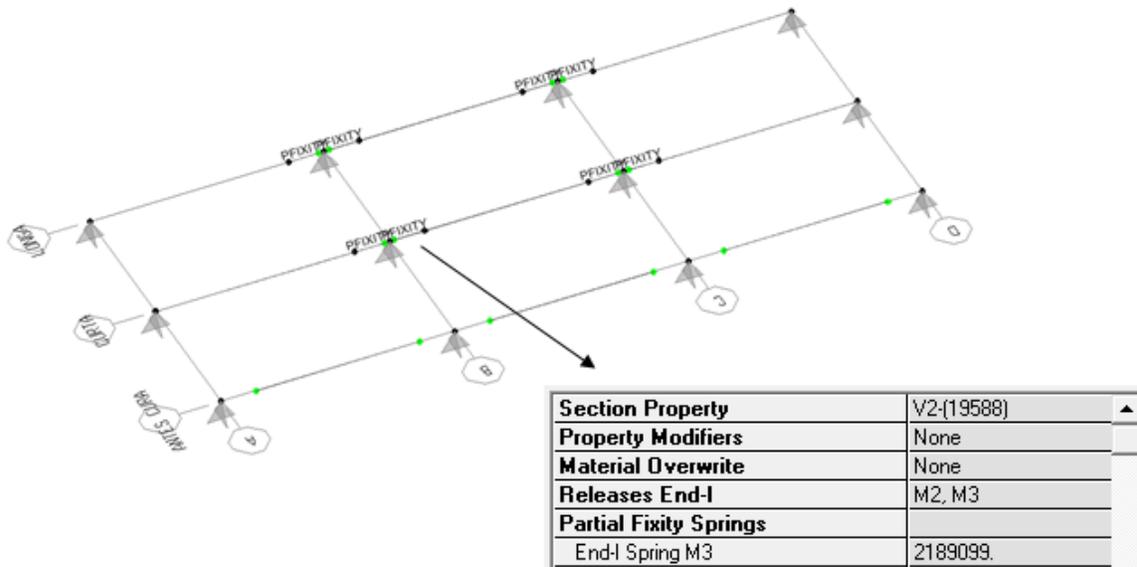


FIGURA 16: Condições de Contorno

- Resultados obtidos do modelo numérico

O momento fletor solicitante é exposto a seguir.

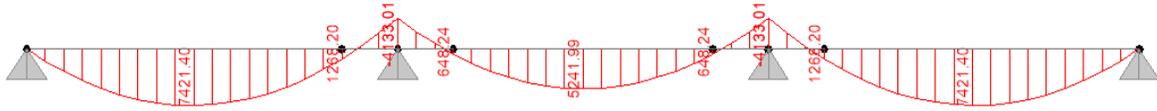


FIGURA 17: Momento para ações de longa (kNcm)

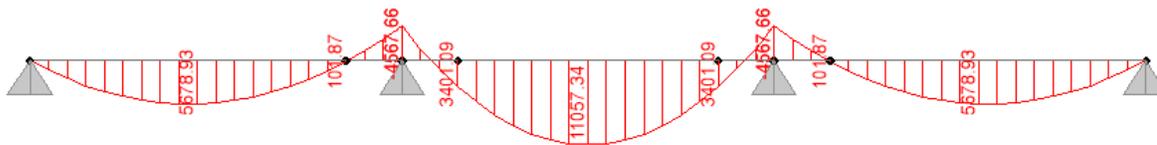


FIGURA 18: Momento para ações de curta (kNcm)



FIGURA 19: Momento para peso próprio antes da cura (kNcm)

$$M_{sd}^+ = 1.5 * (7812 + 11057 + 5242) = 36166 \text{ kNcm}$$

$$M_{sd}^- = 1.5 * (4568 + 4133) = 13051 \text{ kNcm}$$

$$V_{sd,q} = 197 \text{ kN}$$

- Verificação Deformação

$$\delta = \delta_{\text{antes da cura}} + \delta_{\text{curta}} + \delta_{\text{longa}} - \delta_{\text{contraflecha}} = 2.8 + 1.3 + 0.3 - 2 = 2.4 \text{ cm}$$

$$\delta = 24 \text{ mm} < \delta_{\text{lim}} = 28 \text{ mm} \rightarrow \text{Atende}$$

- Verificação do Momento Fletor

Flambagem com distorção:

$$M_{Rd,dist} = \chi_{dist} M_{Rd}$$

$$\lambda_{dist} = 5 \left(1 + \frac{t_w h_0}{4 b_f t_f} \right) \left[\left(\frac{f_y}{E C_{bdist}} \right)^2 \left(\frac{h_0}{t_w} \right)^3 \left(\frac{t_f}{b_f} \right) \right]^{0.25}$$

$$\lambda_{dist} = 5 \left(1 + \frac{(0.63)(39.05)}{4(16)(0.95)} \right) \left[\left(\frac{35}{20000(22.95)} \right)^2 \left(\frac{39.05}{0.63} \right)^3 \left(\frac{0.95}{16} \right) \right]^{0.25}$$

$$\lambda_{dist} = 0.67$$

$$\psi_1 = \frac{33387}{0.85 * 43998} = 0.9$$

$$\psi_2 = \frac{M_{Rd,d}^-}{M_{Rd,e}^-} = 1.0$$

$$C_{bdist} = 22.95 \text{ (Valor obtido na tabela O.3 da ABNT NBR8800)}$$

Como λ_{dist} superou 0.4, não atendendo o item R.2.5.1 da ABNT NBR8800:2008. Deveremos considerar a contribuição das cantoneiras da alma da viga para a resistência a momento da ligação mista.

$$M_{Sd} = 13051 < M_{Rd,dist} = \chi_{dist} M_{Rd} = 0.571 * 33387 kNcm = 19063 kNcm \rightarrow \text{Atende}$$

Plastificação da seção pelo momento fletor positivo:

$$M_{Sd} = 36166 kNcm < \beta_{vm} M_{Rd} = 0.85 * 43998 = 37398 kNcm \rightarrow \text{Atende}$$

- Verificação do Esforço Cortante

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{381}{6.3} = 60.4 > \lambda_p = 2.46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 58.8$$

$$\lambda < \lambda_r = 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1.37 \sqrt{\frac{5 * 20000}{35}} = 73.2$$

$$V_{pl} = 0.6 * A_w * f_y = 0.6 * (40 * 0.63) * 35 = 529kN$$

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p V_{pl}}{\lambda \gamma_{a1}} = 468kN$$

$$V_{Sd} = V_{Sd,q} + \frac{M_{Rd,e}^- - M_{Rd,d}^-}{L}$$

$$\frac{M_{Rd,e}^- - M_{Rd,d}^-}{L} = 0$$

$$V_{Sd} = 197kN < V_{Rd} = 468kN \rightarrow \text{Atende}$$

- Quantidade de conectores

$$Q_{rd} < \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{1}{2} \frac{2.84 \sqrt{2 * 2129}}{1.25} = 74.1 \\ \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = \frac{0.75 * 2.84 * 41.5}{1.25} = 70.7kN \end{cases}$$

Momento Positivo

$$F_{hd} < \begin{cases} 0.85 f_{cd} b t_c = 1382.6kN \\ A_a f_{yd} = 1731kN \end{cases}$$

$$F_{hd} = 1382.6kN$$

$$n = 0.6 \frac{1383.6}{70.7} \rightarrow 12 \text{ conect. (24 conectores para região de momento positivo)}$$

$$n_{m\acute{a}x} = 10000 * \frac{1 - 2 * 0.15}{274} = 25.5 < 24 \rightarrow \text{Atende}$$

Momento Negativo

$$A_{sl} f_{yd} = 266.8kN$$

$$n = \frac{266.8}{70.7} \rightarrow 4 \text{ conect. (8 conectores para região de momento negativo)}$$

$$n_{m\acute{a}x} = 10000 * \frac{0.15}{274} = 5.5 < 4 \rightarrow \text{Atende}$$

5.4 Análise Paramétrica dos Sistemas Estruturais

A TABELA 1 apresenta os resultados obtidos para as vigas de piso com vinculação flexível.

TABELA 1: Resultados para Viga Biapoiada

VM (PERFIL SOLDADO COM CF)		
VÃO (m)	BITOLA	PESO (kg/m)
4	VS200	19
5	VS250	21
6	VS300	23
7	VS350	26
8	VS400	30
9	VS400	38
10	VS450	51
11	VS450	60
12	VS500	61
13	VS550	75
14	VS550	88

A TABELA 2 apresenta os resultados obtidos para as vigas de piso com vinculação semirrígida.

TABELA 2: Resultados para Viga Semicontínua

VM (PERFIL SOLDADO COM CF)		
VÃO (m)	BITOLA	PESO (kg/m)
4	VS200	19
5	VS250	21
6	VS300	23
7	VS300	26
8	VS300	26
9	VS400	32
10	PS400X160X9.5X6.3	43
11	PS450X160X12.5X6.3	52
12	PS500X160X12.5X6.3	55
13	PS550X180X12.5X6.3	61
14	PS550X220X12.5X6.3	69

O GRÁFICO 1 foi plotado utilizando os valores das TABELAS 1 e 2.

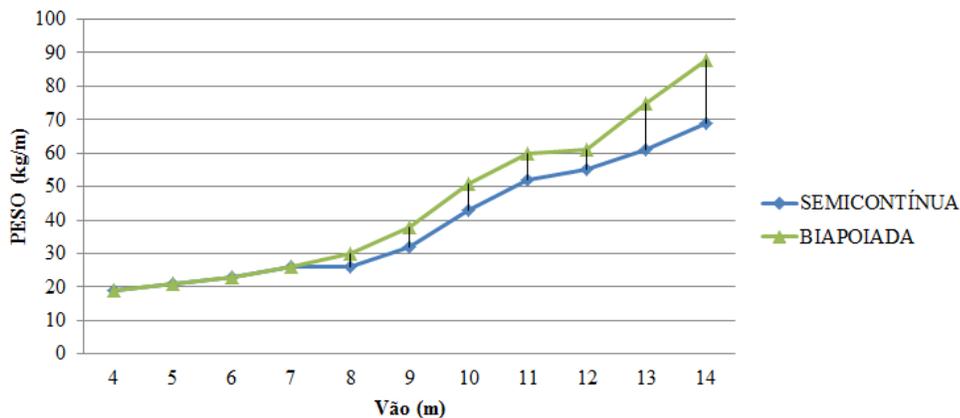


GRÁFICO 1: Peso da estrutura metálica em função do vão livre

Vãos com 8 metros apresentam uma redução de até 15% de aço, sendo que para vãos de 14 metros a redução foi de 25%.

Para vãos menores não há uma redução de peso considerável, principalmente por dois motivos:

- O momento fletor positivo não é significativamente reduzido quando o vão é pequeno.
- A ABNT NBR8800:2008 não permite flambagem local na mesa em regiões de momento negativo. Para exemplificar a questão abaixo é exposta a verificação do perfil VS200x19 que é utilizado no vão de 4 metros.

$$\lambda = \frac{120}{2 * 6.35} = 9.5 > \lambda_p = 0.38 \sqrt{E/f_y} = 0.38 \sqrt{20000/35} = 9.0 - \text{Não Atende}$$

O não atendimento a esse critério inviabiliza a utilização de seções com maior esbeltez.

6 CONCLUSÃO

Foi concluído com o resultado deste trabalho que as vigas semicontínuas podem ser uma solução interessante para vãos acima de 8 metros. Para esses vãos há uma economia de material de, aproximadamente, 15 a 25%. Não foi obtida diferença de peso das vigas metálicas para vãos pequenos.

Por fim, é importante ressaltar que a determinação de um sistema de piso ótimo para uma obra depende de diversas incógnitas como, por exemplo, prazo, materiais, mão de obra,

equipamentos disponíveis para fabricação das peças, limites de vibração. Todos esses fatores impactam no custo total de um sistema construtivo e devem ser levados em conta para determinação de uma solução mais eficiente.

7 REFERÊNCIAS

ABNT NBR8800:2008, Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios ,2ªed.2008.

AISC, Steel Design Guide8 – Partially Restrained Composite Connections,2ed.2003.

CBCA. Manual de Construção em Aço, Ligações em Estruturas Metálicas, Volume 1 & 2. 4ed. Rio de Janeiro, 2011.

CBCA. Manual de Construção em Aço, Estruturas Mistas, Volume 1 & 2. 2ed. Rio de Janeiro, 2012.

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B.. Dimensionamento Básico de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto, Volume 1, 4ª Ed., 2011 Belo Horizonte. Departamento de Engenharia de Estruturas.

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B.. Dimensionamento Básico de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto, Volume 2, 7ªEd. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia de Estruturas.

LINCOLN. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Design of Welded Structures 1966.

QUEIROZ, G.; PIMENTA R; ANTINOSSI, L.. Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto. 2001, Editora O lutador.