



COMPORTAMENTO ESTÁTICO DE VIGAS MISTAS DE AÇO-CONCRETO UTILIZANDO PERFIL CELULAR ASSIMÉTRICO

César A. O. Ferrante

Sebastião A. L. Andrade

Raquel A. C. Silva

rasecf@gmail.com

andrade@puc-rio.br

raquel.cabrals@yahoo.com.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rua Marquês de São Vicente, 225 Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro – RJ – Brasil

Resumo. Neste trabalho é apresentado um estudo teórico-experimental de um sistema pré-fabricado de vigamentos mistos. O modelo estrutural consiste em vigas mistas do tipo duplo T, onde as nervuras são constituídas por uma viga celular formada a partir de um perfil I laminado, parcialmente embutido na laje de concreto. Após a montagem das vigas na obra, é feito um capeamento de concreto armado para solidarizar o conjunto. Uma grande vantagem deste sistema é proporcionar a integração do piso, com o sistema de instalações prediais, por meio da passagem de dutos pelas aberturas do perfil metálico. Neste artigo, é apresentado o sistema com os detalhes gerais de construção e de projeto. Foi executada uma análise paramétrica para avaliação do comportamento estrutural e também selecionar os casos mais competitivos em termos de custo e velocidade de montagem. Com base neste estudo, foi desenvolvido um programa experimental, no laboratório de Estrutura e Materiais da PUC-Rio, para análise do comportamento carga/deformação e da resistência última à flexão do protótipo submetido a um carregamento estático. Com os dados obtidos, foi feita uma comparação com os resultados previstos analiticamente. Os resultados teóricos apresentaram boa correlação com os resultados medidos.

Palavras-chave: Viga mista, Perfil celular assimétrico, Resistência última à flexão, Análise paramétrica.

1 INTRODUÇÃO

Há mais de um século, são utilizadas estruturas de aço e concreto na construção civil por todo o mundo, com o propósito inicial de aumentar a resistência da edificação contra as ações do fogo e da corrosão. Entretanto, somente na década de 60 do século passado, com o desenvolvimento dos sistemas estruturais mistos, passou-se a combinar perfis de aço com concreto, visando aproveitar as vantagens de cada material, tanto em termos estruturais como construtivos.

Para as construções modernas, existe uma grande variedade de sistemas mistos de pisos. Um exemplo são os sistemas de vigamentos celulares mistos de pequena altura, que podem ser construídos com perfis I assimétricos com aberturas de alma espaçadas regularmente, e embutidos na laje de concreto. Alguns estudos, com este tipo de viga mista visando à integração com outros sistemas prediais, foram conduzidos buscando identificar a influência de alguns parâmetros, como: o tipo de conexão aço-concreto, comportamento e resistência última das vigas mistas. Jurkiewicz et al. (2005) analisou o comportamento estático de vigas mistas de aço-concreto com conectores de cisalhamento horizontais. O modelo consiste em um perfil T invertido com a região da alma superior cortada em formato retangular com cantos arredondados. O perfil é parcialmente embutido na laje de concreto. A conexão entre o perfil e o concreto é feita por armaduras transversais que transpassam a alma do perfil.

Frangi et al. (2008) apresenta um novo sistema de pisos mistos, integrado às instalações prediais. O sistema é baseado em vigas celulares, feitas a partir de perfis laminados, parcialmente embutidos na laje de concreto. A conexão entre o aço e o concreto foi realizada por vergalhões soldados ao longo da alma do perfil. Ju et al. (2009) propõem e exploram experimentalmente um novo tipo de viga mista utilizando-se perfis assimétricos com abertura na alma, e revestidos na lateral e em cima por concreto. Conectores de cisalhamento não são utilizados para o modelo proposto. Em vez disso, a resistência ao cisalhamento longitudinal é obtida através da resistência na interface entre o aço e o concreto devida à união destes dois materiais, mais a resistência produzida pelo concreto na região da abertura. Chen et al. (2015) fez um estudo experimental do comportamento a flexão e do mecanismo de transferência do cisalhamento longitudinal, para vigas mistas com perfis celulares de pequena altura. A conexão entre o aço e o concreto ocorre na região da abertura que é preenchida totalmente com concreto com a adição de armaduras transversais.

Assim como o desenvolvimento de novos sistemas estruturais mistos, a industrialização da construção civil passou a ser um processo cada vez mais exigido, e vem sendo estimulada devida à necessidade de aumentar a competitividade e a produtividade das obras. Desta forma, o benefício do uso de elementos mistos pré-fabricados está em prover mais economia, rapidez, durabilidade, redução de prazos, estruturas mais seguras, alta qualidade e uma estética agradável, além da versatilidade arquitetônica.

A proposta deste artigo é desenvolver um estudo sobre sistema de vigamentos mistos pré-fabricados que seja econômico, rápido de montar, eficiente na utilização dos espaços e que proporcione uma diminuição da perda de materiais. Para o sistema proposto foi feito uma avaliação teórica e experimental do comportamento estrutural (Ferrante, 2015).

2 MODELO DE VIGA MISTA PROPOSTO

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 Fig. 1.



Figura 1. Viga mista no formato duplo T

Na laje de concreto, são utilizadas malhas de aço e armaduras transversais posicionadas na região de abertura do perfil, ver Fig. 2. A viga de aço está embutida na laje de concreto, fornecendo resistência extra ao fogo e permitindo estabilizar a região em compressão do perfil. 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.

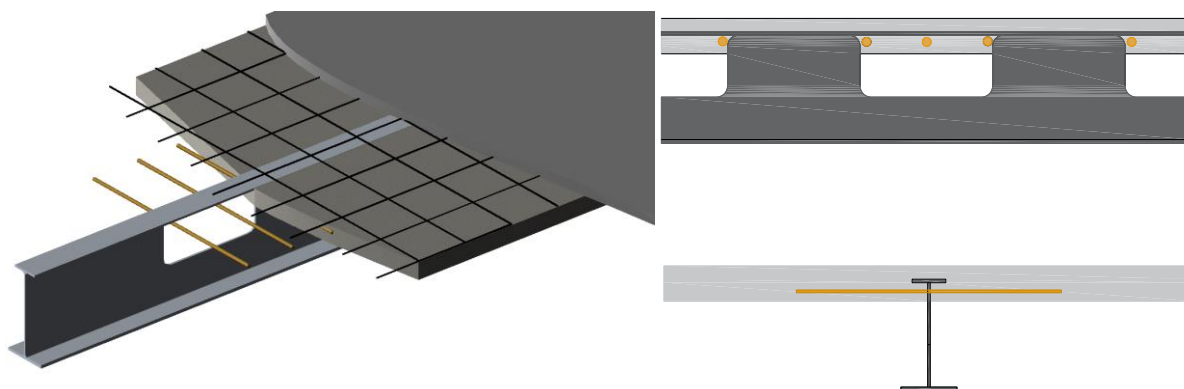


Figura 2. Detalhe da viga mista com as armaduras na laje de concreto

Dentro do esquema estrutural de um projeto, essas vigas são utilizadas biapoiadas em vigas principais. Os elementos são montados paralelos uns aos outros de modo a fechar o espaço entre vigas principais. Após a montagem das vigas na obra, é feito um capeamento de concreto armado para solidarizar o conjunto.

2.1 Modelagem do comportamento

O modelo de cálculo apresenta uma abordagem simplificada para a configuração de viga mista proposta. 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.

As dimensões das aberturas no perfil metálico são baseadas nas propriedades de uma viga metálica castelada Litzka, com dimensões proporcionalmente determinadas, como mostrado na Fig. 3. Segundo Grünbauer (2015) a taxa da altura, 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 superior é igual a $d/4$.

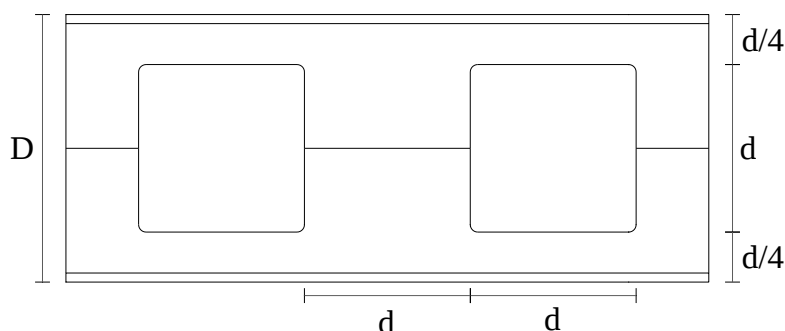


Figura 3. Dimensões proporcionalmente determinadas para uma viga castelada, adaptado de Günbauer (2015)

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.

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.

O modelo de conexão entre o aço e o concreto utilizado neste trabalho possui o mesmo princípio que um conector “perfobond”. 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, ver Fig. 4.

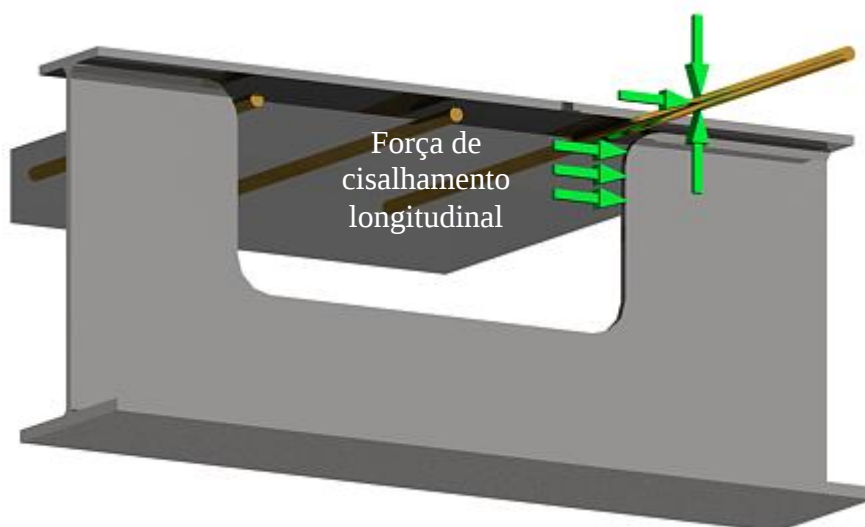


Figura 4. Mecanismo de transferência de forças entre o aço e o concreto

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 da viga mista é calculada em regime plástico, e considera que o nível de conexão na interface aço-concreto seja de interação completa. Também, se leva em conta a 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 na seção com abertura de alma.

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;

• **Linha neutra no concreto (interação total)**

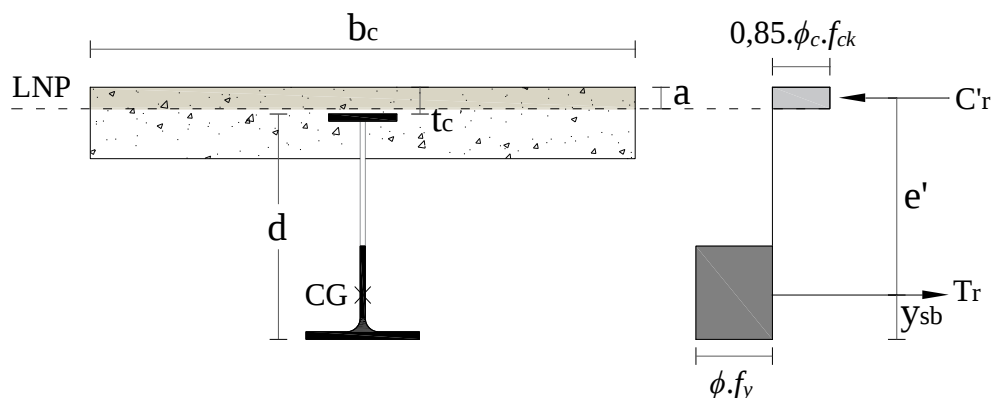


Figura 5. Modelo de cálculo para a linha neutra plástica posicionada na laje de concreto acima do perfil

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 Fig. 5. A capacidade última à flexão é encontrada quando o perfil de aço estiver em plastificação completa. 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”,

$$a = \frac{\phi \cdot A_{sb} \cdot f_y}{0,85 \cdot \phi_c \cdot b_c \cdot f_{ck}} \quad (1)$$

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:

$$M_{Rd} = e' \cdot \phi \cdot A_{sb} \cdot f_y \quad (2)$$

Em que,

$$e' = d + t_c - y_{sb} - \frac{a}{2} \quad (3)$$

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.

• 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:

$$C'_r = 0,85 \cdot \phi_c \cdot b_c \cdot t_c \cdot f_{ck} \quad (4)$$

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

$$C_r = \frac{\phi \cdot A_{sb} \cdot f_y - C'_r}{2} \quad (5)$$

- 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.

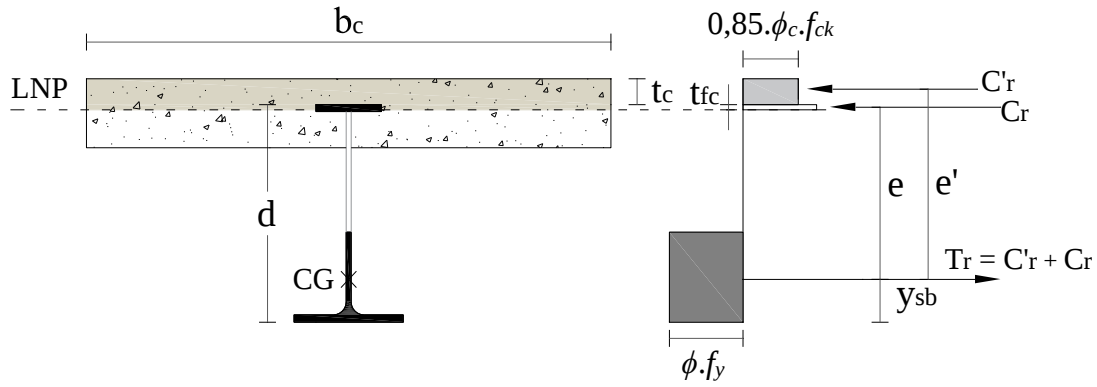


Figura 6. Modelo de cálculo para a linha neutra plástica posicionada na mesa do perfil

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 Fig. 6. 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 .

$$e = d - y_{sb} - \frac{t_{fc}}{2} \quad (6)$$

$$e' = d + \frac{t_c}{2} - y_{sb} \quad (7)$$

Onde:

$$t_{fc} = \frac{C_r}{\phi \cdot b_s \cdot f_y + 0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot (b_c - b_s)} \quad (8)$$

$$M_{Rd} = C'_r \cdot e' + C_r \cdot e \quad (9)$$

- Linha neutra na alma do perfil 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 Fig. 7.

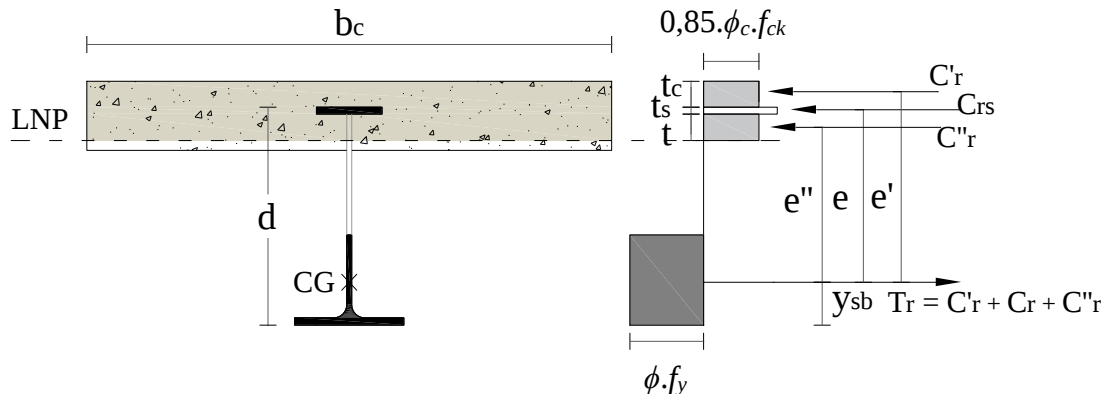


Figura 7. Modelo de cálculo com linha neutra plástica sobre o concreto abaixo da mesa do perfil metálico

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

$$C_{rs} = \phi \cdot f_y \cdot b_s \cdot t_s + 0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot (b_c - b_s) \cdot t_s \quad (10)$$

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

$$C''_r = C_r - C_{rs} \quad (11)$$

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:

$$e = d - y_{sb} - \frac{t_s}{2} \quad (12)$$

$$e' = d + \frac{t_c}{2} - y_{sb} \quad (13)$$

$$e'' = d - y_{sb} - t_s - \frac{t}{2} \quad (14)$$

Onde:

$$t = \frac{C''_r}{0,85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck} \cdot b_c} \quad (15)$$

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

$$M_{Rd} = C'_r \cdot e' + C_{rs} \cdot e + C''_r \cdot e'' \quad (16)$$

2.2 Análise paramétrica

Baseando-se nos resultados de resistência última à flexão obtida teoricamente, foi desenvolvido um estudo paramétrico para avaliar os casos mais competitivos em termos de eficiência estrutural. Para este estudo variou-se o perfil W original utilizado, a largura efetiva da laje e o vão. A espessura da laje não variou, permanecendo com 80 mm.

Para o estudo foram escolhidos os perfis laminados W de primeira alma. 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 ½ W.

Estudo da chapa de compressão. Para avaliar a influência da chapa de aço soldada ao perfil, na resistência última a flexão, e o impacto na taxa de aço (massa de aço / m² de laje), foi traçado o gráfico taxa de aço pelo momento resistente de cálculo para alguns casos de perfis ½ W. Foram utilizados três tipos de chapa: Chapa 1 (76,2 x 6,3 mm), Chapa 2 (76,2 x 8,0 mm) e Chapa 3 (90,0 x 9,5 mm). O vão foi fixado em 6 m e a largura efetiva em 1500 mm.

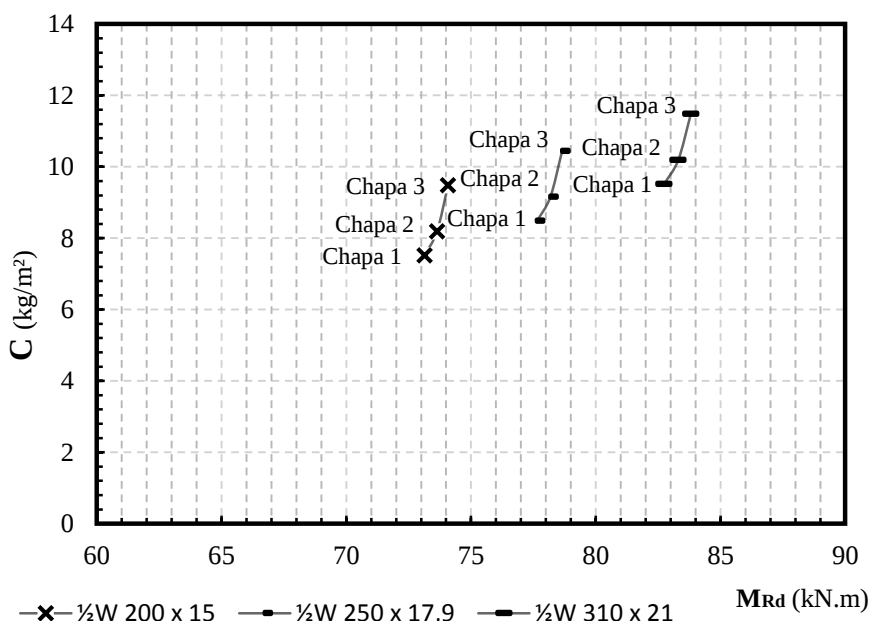


Figura 8. Taxa de aço x M_{Rd} , variando a chapa de aço soldada ao perfil

Como pode ser observada nos gráficos da Fig. 8, a chapa de aço não possui uma influência relevante na resistência última. Para os próximos estudos, foi utilizada a Chapa 1 (76,2 x 6,3 mm) soldada a alma do perfil em todos os modelos.

Avaliação da capacidade resistente. Utilizando-se o momento resistente último da viga mista, e considerando-se 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 Eq. (17). Para este carregamento é considerado que as ações permanentes e variáveis estão agrupadas.

$$q = \frac{M_{Rd} \cdot 8}{L^2 \cdot b_c \cdot \gamma} \quad (17)$$

Onde: L é o vão da viga mista; b_c é a largura efetiva da laje de concreto; γ é o coeficiente de ponderação para combinações normais, obtido segundo a NBR 8800: 2008, tomado igual a 1,4.

Os gráficos da Fig. 9 apresentam o carregamento distribuído último em função do vão da viga, para cada um dos perfis 1/2W. Cada gráfico foi feito variando a largura efetiva da laje de concreto em 1000, 1200, 1500 e 2000 mm. Por meio dos gráficos pode-se escolher uma opção de configuração de viga mista levando em consideração o carregamento necessário pelo vão a ser vencido.

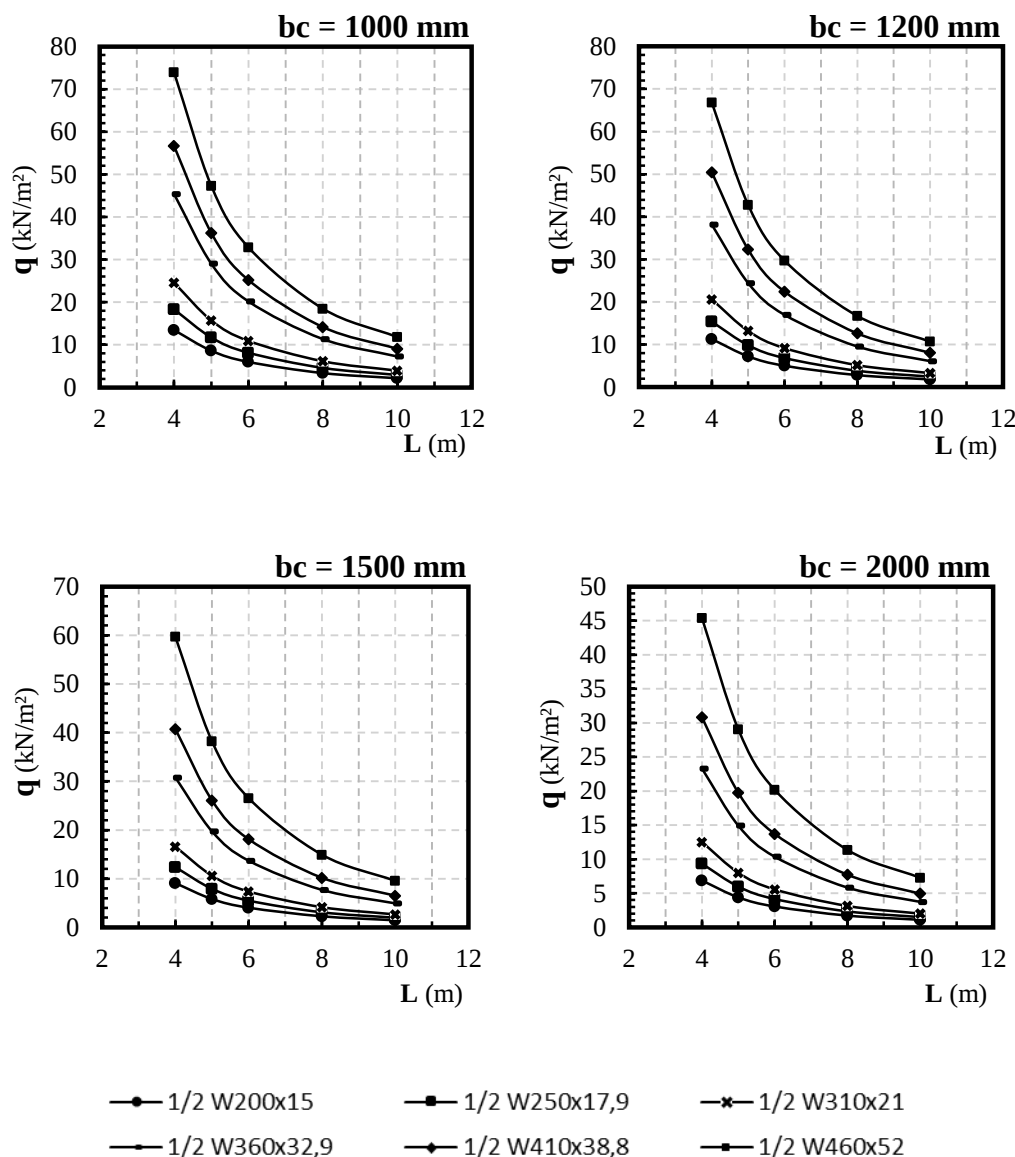


Figura 9. Carregamento distribuído $\times$ vão variando a largura efetiva para cada perfil

Estudo do consumo de aço. Buscando-se empregar este sistema em projetos de edifícios comerciais com lojas, o valor do carregamento distribuído, carga permanente mais carga acidental, foi fixado em 10 kN/m². Desta forma, foi possível calcular o vão correspondente, isolando-se o vão (L) na Eq. (17). Com estes valores foi feito um estudo relacionando-se a taxa de aço “ c ” com o vão da viga. Nos gráficos da Fig. 10, 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 ½W 410 x 38,8 e largura efetiva de 2000 mm possui uma menor taxa de aço que a viga com perfil ½W 360 x 32,9 e largura efetiva de 1500 mm, impactando na quantidade total de aço da obra e, conseqüentemente, no custo da estrutura.

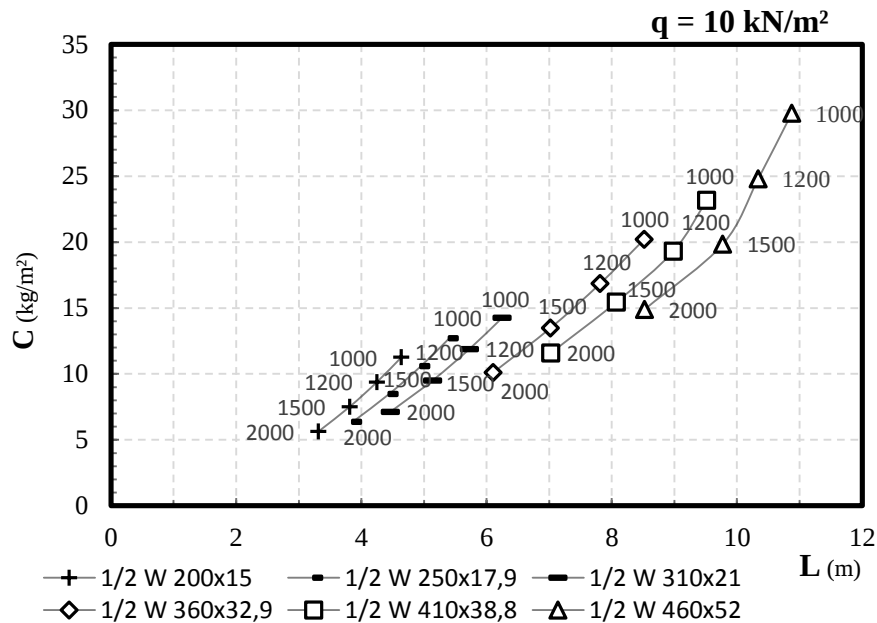


Figura 10. Taxa de aço x vão livre

Estudo da relação resistência/massa. Com o objetivo de aprofundar a análise anterior (consumo de aço x vão da viga), no gráfico da Fig. 11 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. O gráfico da Fig. 11 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.

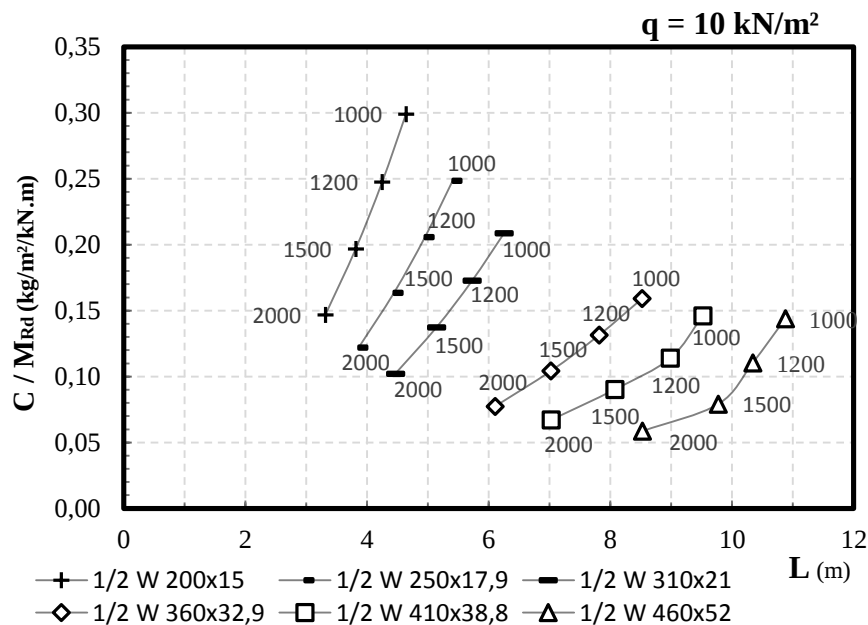


Figura 11. Estudo da relação taxa de aço pelo momento resistente para cada vão da viga mista

Na Tabela 1 foram selecionadas as soluções mais eficientes obtidas com base nos gráficos da Fig. 11.

Tabela 1. 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

Estudo da relação resistência/massa para os perfis de segunda alma. Expandindo o estudo anterior para os perfis de segunda alma, foi traçado o gráfico $c/M_{Rd} \times L$ incluindo mais 6 perfis ½W.

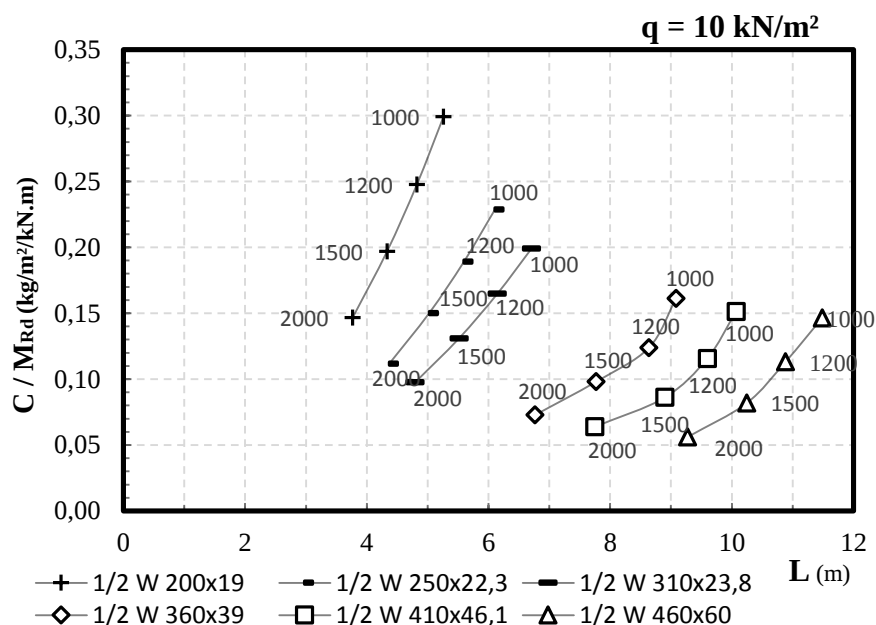


Figura 12. Taxa de aço/ momento resistente para cada vão utilizando perfis de segunda alma

Comparando o gráfico da Fig. 11 com o da Fig. 12, observa-se que a relação c/M_{Rd} manteve-se praticamente a mesma para os perfis de segunda alma. Por outro lado, o vão a ser vencido foi maior para um mesmo carregamento distribuído de 10 kN/m².

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

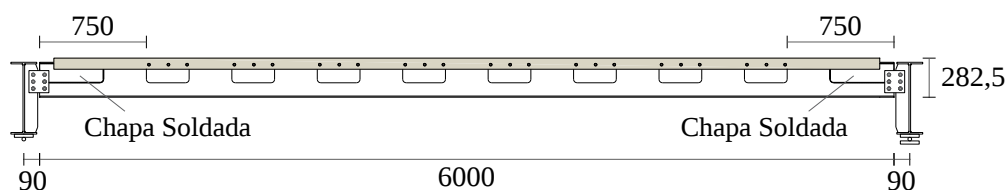
O comportamento de um modelo de viga mista em escala real, submetido a um carregamento estático monotônico, foi analisado experimentalmente no Laboratório de Estruturas da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. A viga mista parcialmente revestida foi submetida a um ensaio de flexão simples.

A escolha do protótipo foi realizada baseando-se no estudo paramétrico desenvolvido. Por meio da Tabela 1, foi escolhido o perfil W360 x 32,9 para um vão de 6 m. A largura da laje de concreto de 1200 mm foi definida de acordo com a disponibilidade de espaço no laboratório para confecção e movimentação do modelo.

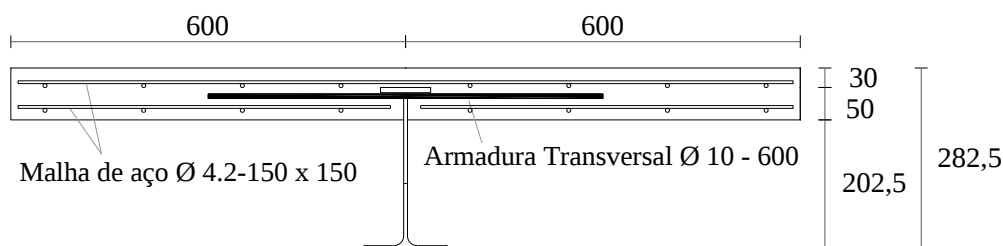
3.1 Descrição do protótipo

O protótipo é composto por perfil celular parcialmente embutido na laje de concreto. A laje de concreto possui 1200 mm de largura por 80 mm de espessura, sendo 50 mm do embutimento da viga metálica e 30 mm considerando a capa de concreto. O concreto utilizado foi usinado com resistência característica prevista de 30 MPa. A Fig. 13 mostra as seções longitudinal e transversal da viga mista.

Seção longitudinal da viga mista 1



Seção transversal da viga mista 1



Seção transversal do perfil celular e detalhe da abertura

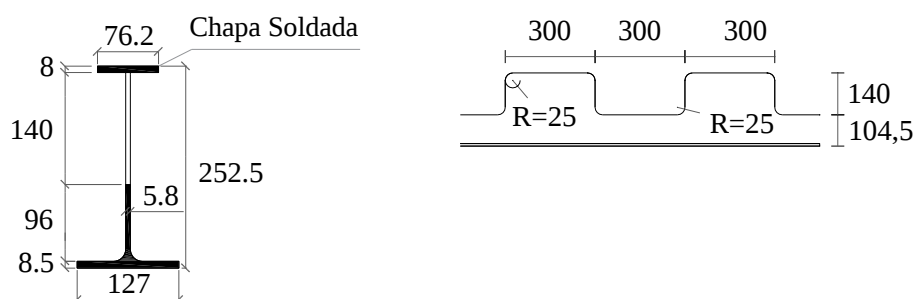


Figura 13. Detalhamento das dimensões e posicionamento das armaduras na viga mista (dimensões em mm)

A laje foi reforçada, na face superior e inferior, com malha de aço CA-60 com diâmetro de 4,2 mm, e espaçamento de 150 mm em ambas as direções. Para a armadura transversal, foram utilizados vergalhões de aço tipo CA-50 com diâmetro de 10 mm e 600 mm de comprimento. Em cada abertura de alma, utilizaram-se três barras espaçadas a cada 150 mm. O vão total do modelo, considerando a distância de eixo a eixo da viga de apoio, foi de 6180 mm.

3.2 Configuração de ensaio

Para o ensaio a flexão, foram utilizados transdutores de deslocamento para obter os deslocamentos verticais e deslizamento na interface aço-concreto. A Fig. 14 apresenta o posicionamento da instrumentação utilizada.

Viga mista 1

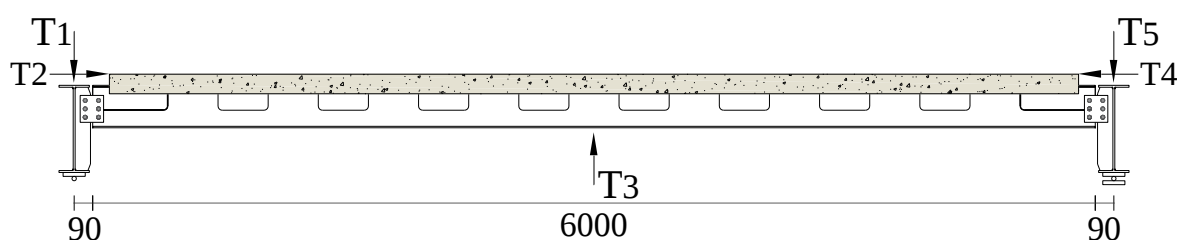


Figura 14. Posicionamento dos transdutores de deslocamento no protótipo (dimensões em mm)

Para a configuração do carregamento, foram utilizados dois atuadores hidráulicos com capacidade de 500 kN cada. Um sistema de transmissão de cargas foi montado com perfis metálicos duplos posicionados ao longo da largura efetiva da laje distribuindo o carregamento em quatro pontos. O controle do carregamento aplicado foi feito por uma célula de carga, em cada atuador, com capacidade de 100 kN cada. O esquema de aplicação do carregamento é apresentado na Fig. 15.

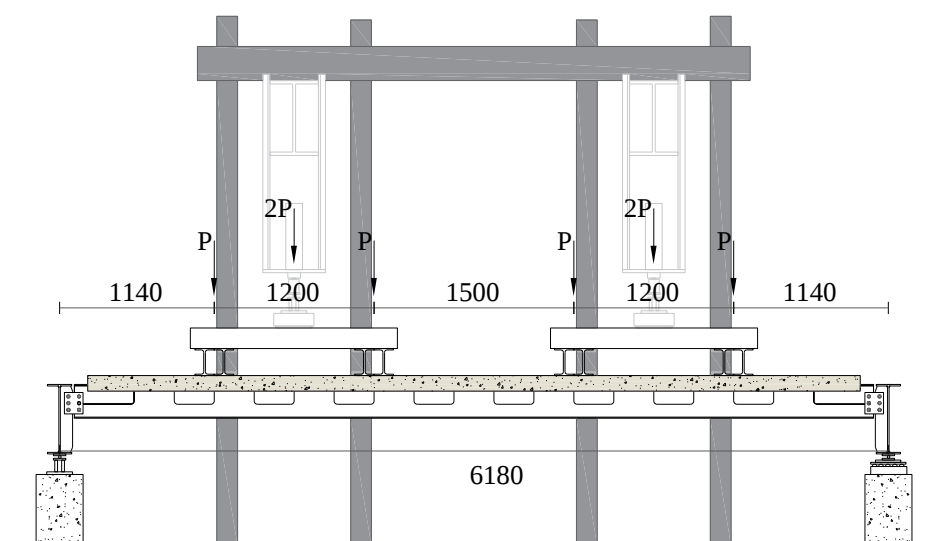


Figura 15. Esquema do sistema de ensaio (dimensões em mm)

3.3 Propriedade dos materiais

Concreto. A resistência à compressão do concreto empregado na laje foi determinada por meio do ensaio à compressão utilizando 12 corpos de prova. O valor obtido da resistência característica à compressão (f_{ckest}) aos 28 dias foi de 32,80 MPa.

Aço. As propriedades mecânicas de resistência ao escoamento (f_y) e resistência a ruptura (f_u), para o perfil celular na região da mesa inferior, foram determinadas por meio de ensaios de tração direta utilizando-se quatro corpos de prova. Os resultados apresentaram resistência ao escoamento (f_y) de 337,5 MPa e a resistência à ruptura (f_u) de 462,07 MPa, que correspondem à média dos valores obtidos experimentalmente.

3.4 Resultados

Resultado experimental. Durante o ensaio não foi verificado deslizamento na interface entre a laje de concreto e a viga metálica. A viga apresentou um comportamento linear elástico até atingir um momento fletor de aproximadamente 104 kN.m. No estágio final do ensaio, a viga mista atingiu um momento fletor de 139 kN.m, e apresentou uma deformação no meio do vão de 53 mm. Durante o ensaio não foram observadas fissuras significativas, exceto duas fissuras no meio do vão, ver Fig. 16.



Figura 16. Configuração do protótipo após o ensaio e fissuras na laje de concreto

Comparação entre os resultados teóricos e experimentais. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados baseados no modelo analítico (CAN/CSA-S16-10). O comportamento elástico da viga mista foi calculado assumindo a rigidez da seção com abertura e a laje de concreto não fissurada. Também se levou em conta a ação mista completa, visto que o ensaio à flexão demonstrou que o modelo de ligação adotado entre o aço e o concreto foi suficiente para garantir a interação total entre os dois materiais.

A Fig. 17 apresenta o diagrama que relaciona momento fletor solicitante pela flecha, para o modelo experimental e teórico. O momento fletor corresponde à soma do momento devido ao peso próprio mais o momento devido à carga aplicada. O momento fletor produzido pelo peso próprio da viga mista, mais sistema de transmissão de carga foi de 16,5 kN.m. Ao atingir este valor, ocorre uma mudança na curva representando o início da aplicação do carregamento, como pode ser observado no gráfico da Fig. 17.

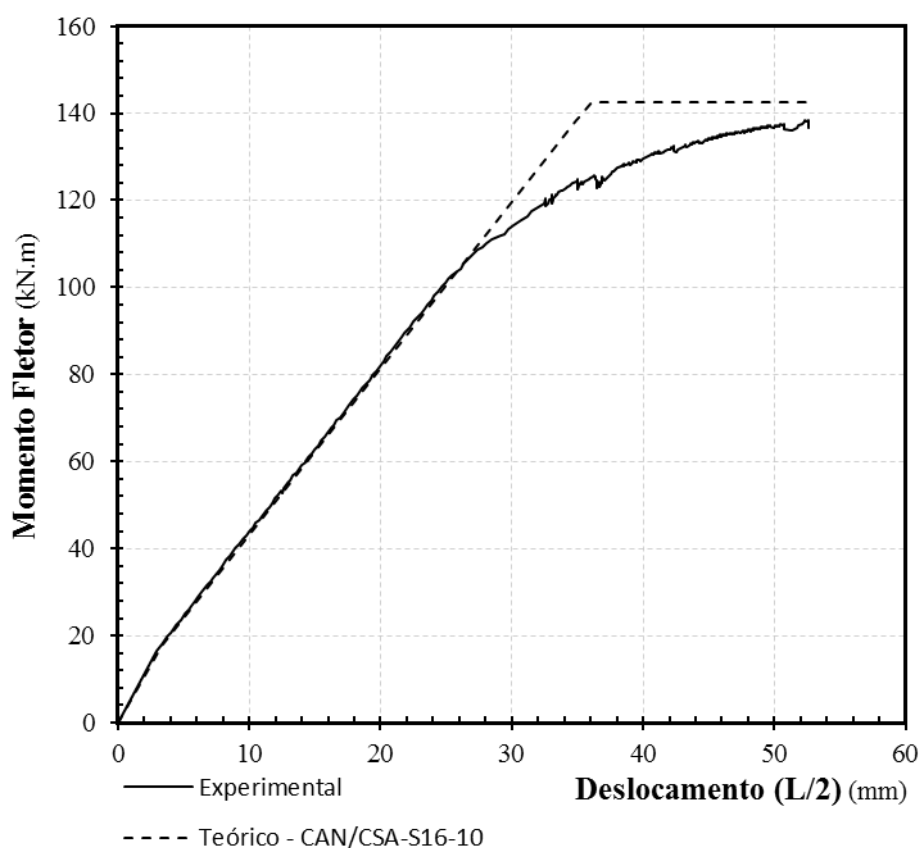


Figura 17. Momento fletor x deslocamentos medidos no meio do vão: modelo teórico e experimental

Comparando o comportamento carga-deformação calculado com a curva experimental, observa-se que o modelo teórico apresenta resultados adequados para a rigidez e resistência última para o modelo proposto de viga mista.

Na Tabela 2 são apresentados os momentos resistentes últimos: teórico e experimental.

Tabela 2. Momentos fletores resistentes teóricos e experimentais

Vigas	M_{pl} exp.	M_{pl} teórico	M_{pl} exp./ M_{pl} teórico
	kN.m	kN.m	%
VM-01	139	143	97%
M_{pl} – momento fletor resistente último.			

A comparação feita na Tabela 2 mostra que o valor de momento resistente último medido durante o ensaio foi menor que o estimado teoricamente. O ensaio da viga VM-01 atingiu 97% do momento resistente esperado pelo modelo analítico.

4 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO MISTO

Para analisar os efeitos na região do perfil com abertura (tê inferior), submetido aos esforços combinados de momento fletor local e esforço axial, foi utilizado um método simplificado, adaptado do modelo apresentado por Chien e Ritchie (1984) para o cálculo de vigas mistas do tipo Stub-Girder. O modelo foi desenvolvido com o auxílio da ferramenta computacional Ftool.

A viga mista, com vão de 6,18 m, foi modelada biapoiada com elementos de barras. Devido à presença das aberturas de alma, a região de alma cheia foi segmentada em três partes entre aberturas e quatro partes nas extremidades. A laje de concreto é representada pela corda superior e o tê da viga metálica pela corda inferior. O modelo estrutural utilizando o método simplificado adaptado à viga mista proposta é apresentado na Fig. 18.

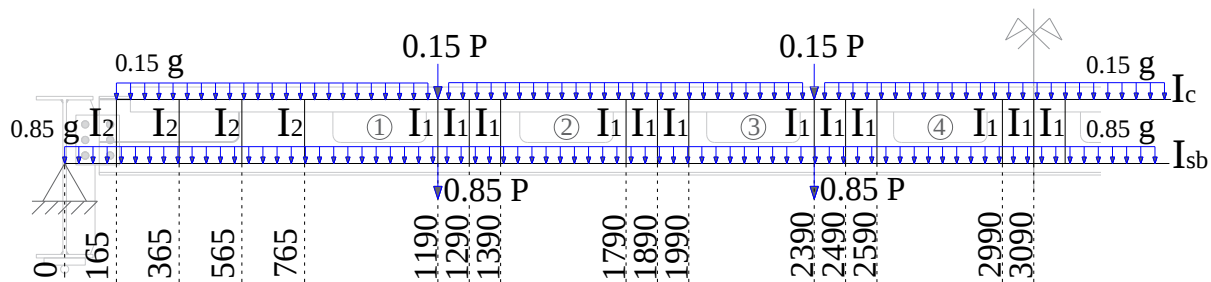


Figura 18. Modelo estrutural simplificado para a viga mista (dimensões em mm)

Neste modelo, foram utilizadas as cargas (P) obtidas experimentalmente, mais o peso próprio (g) da viga mista. O carregamento foi distribuído de acordo com a proporção de momento de inércia entre a laje de concreto e o tê inferior do perfil.

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos momentos de inércia de cada elemento (tê inferior, alma e laje de concreto) e carga imposta na estrutura.

Tabela 3. Dados de entrada no modelo estrutural para a viga mista

Elemento	I mm ⁴	I _{sb} + I _c %	P = 32 kN	g = 2,55 kN/m
Tê inferior	1436961,62	15%	4,9	0,39
Alma 1	4350000			
Alma 2	50976562,5			
Laje de concreto	7872853,88	85%	26,82	2,16

I_c – momento de inércia da laje de concreto.

I_{sb} – momento de inércia do tê inferior do perfil.

I_1 – momento de inércia da alma entre aberturas com comprimento de 300 mm.

I_2 – momento de inércia da alma de extremidade com comprimento de 750 mm.

Os diagramas de momento fletor e esforço normal, obtidos pelo programa Ftool estão apresentados na Fig. 19.

Diagrama de Momento Fletor

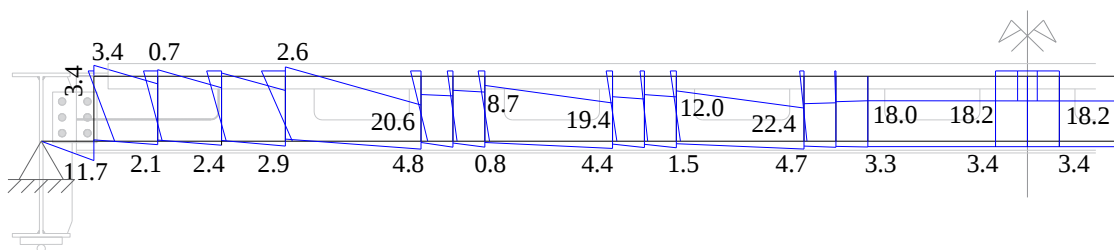


Diagrama de Força Axial

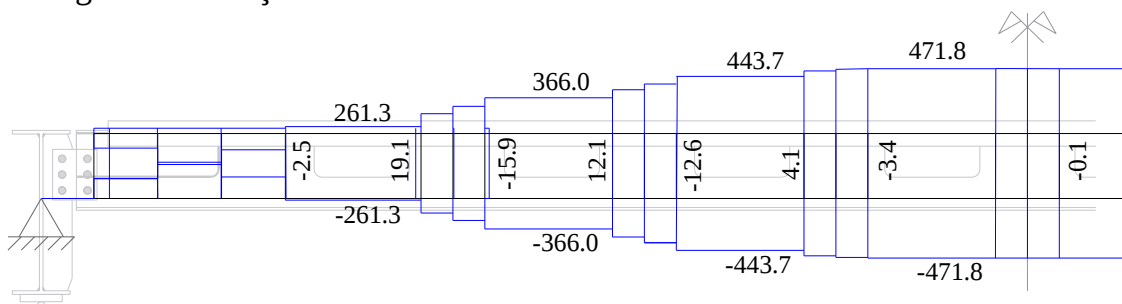


Figura 19. Diagrama de momento fletor (kN.m) e esforço axial (kN) do modelo estrutural

O cálculo do momento resistente último (M_p) e força resistente à tração (T_n) do tê inferior do perfil é feito através das Eq. (18) e (19), respectivamente, utilizando o esquema apresentado na Fig. 20. Na Tabela 4 são apresentados os dados referentes ao tê.

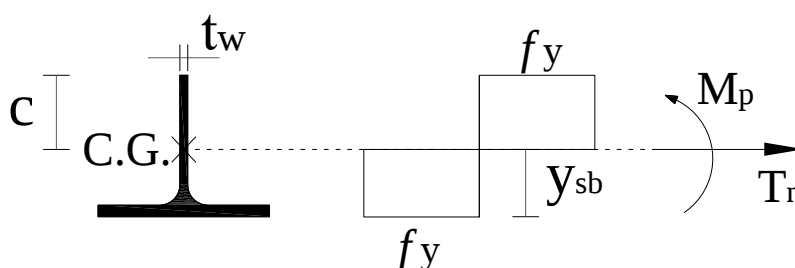


Figura 20. Modelo de cálculo para o tê inferior submetido à flexo-tração

Tabela 4. Propriedades do tê inferior do perfil

c	t_w	y_{sb}	A_{sb}	f_y
mm	mm	mm	mm ²	MPa
82,47	5,8	22,03	1636,3	345

A_{sb} – área do tê inferior

y_{sb} – centro de gravidade do tê

$$M_p = (c \cdot t_w \cdot f_y) \cdot \frac{c}{2} \cdot 2 \quad (18)$$

$$T_n = A_{sb} \cdot f_y \quad (19)$$

Para a abertura 4 mais próxima do centro do vão, os valores dos momentos resistente e solicitante e forças de tração são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de momentos e forças de tração, resistentes e solicitantes

Md	Mn	Td	Tn
MPa	MPa	kN	kN
3,4	13,6	471,8	564,52

Mediante a superposição dos efeitos do momento fletor e da força normal, a interação entre os dois esforços pode ser obtida pela Eq. (20).

$$\left(\frac{M_d}{M_n} \right) + \left(\frac{T_d}{T_n} \right) \leq 1 \quad (20)$$

$$1,086 > 1,0$$

A equação de interação dos esforços axiais e momentos fletores demonstra que ocorreu plastificação completa do perfil por flexo-tração.

5 CONCLUSÕES

Após a execução da análise parcial teórico-experimental das vigas mistas com perfil celular parcialmente embutido, concluiu-se que o modelo proposto é viável tecnicamente. Também foi possível concluir que:

- Os resultados da análise paramétrica demonstraram que entre os perfis de menor massa o perfil ½ W 410 x 38,8 apresentou vantagem na maioria dos casos (para os vãos 7, 8 e 9 m), modificando-se somente a largura efetiva da laje.
- O comportamento medido experimentalmente foi bem próximo do comportamento previsto teoricamente. Entretanto, não foi identificado um modo de ruína global. O teste experimental foi encerrado quando a flecha atingiu o limite vão/50.
- Os valores obtidos através do modelo teórico considerando-se a resistência plástica da seção mostraram-se satisfatórios para uma análise preliminar do comportamento geral do sistema misto. O ensaio da viga mista atingiu 97% do momento resistente esperado pelo modelo analítico.
- Os ensaios das vigas mistas demonstraram satisfatoriamente um comportamento misto e resistência ao cisalhamento longitudinal.
- A modelagem do comportamento misto demonstrou que ocorreu plastificação completa do perfil por flexo-tração.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa, à empresa Metalfenas pelo serviço de fabricação dos perfis metálicos, e à empresa Periplásticos pelo fornecimento de espaçadores plásticos. Os autores também agradecem aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800:Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 237 p., 2008.
- Association Canadian Standards. CAN/CSA-S16-10: Limit states design of steel structures. Ontario, 146 p., 2010.
- Chen, S., Limazie, T., Tan, J, 2015. Flexural behavior of shallow cellular composite floor beams with innovative shear connections. *Journal of constructional steel research*, pp. 329-346.
- Chien, E. Y. L., Ritchie, J. K, 1984. Design and Construction of Composite Floor Systems. *Canadian Institute of Steel Construction*, 323 p..
- Ferrante, C. A. O., 2015.*Estudo Teórico-Experimental do Comportamento à Flexão de Vigas Mistas com Perfil Assimétrico Parcialmente Embutido*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 138 p..
- Frangi, A., Knobloch, M., Raveglia, E., Fontana, M., 2008. Composite slab with integrated installation floor using cellular beams. *International conference on composite construction in steel and concrete*, pp. 112-124.
- Grünbauer, J. Grünbauer BV. Disponível em: <<http://www.grunbauer.nl/eng/raatvorm.htm>>. Acesso em: 25 abr. 2015.
- Ju, Y. K., Chun, S., Kim, S., 2009. Flexural test of a composite beam using asymmetric steel section with web opennings. *Journal of structural engineering*, pp. 448-458.
- Jurkiewicz, B.; Hottier, J. M., 2005. Static behaviour of a steel-concrete composite beam with an innovative horizontal connection. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 61, pp. 1286-1300.
- Lawson, R. M., Saverirajan, A. H. A., 2011. Simplified elasto-plastic analysis of composite beams and cellular beams to Eurocode 4. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, pp. 1426-1434.
- Martha, L. F, 2012. Ftool: A Frame Analysis Educational Software. v.3. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>>