

Avaliação da influência da posição dos conectores de cisalhamento no comportamento de vigas mistas parcialmente revestidas

(Contribution of headed studs to the composite behavior of the partially encased beams)

Silvana De Nardin

*Departamento de Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo - São Carlos, SP, Brasil
Professora da Unilins - Centro Universitário de Lins
E-mail: snardin@sc.usp.br*

Ana Lucia H. de C. El Debs

*Departamento de Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo - São Carlos, SP, Brasil
E-mail: analucia@sc.usp.br*

Resumo

A utilização de conectores de cisalhamento, especialmente os conectores tipo pino com cabeça, é um artifício comum para promover o comportamento misto aço-concreto. O embutimento da viga de aço no pavimento permite reduzir a altura total do pavimento sem comprometer a resistência e a rigidez. Nesse trabalho, são estudadas, experimentalmente, posições alternativas para conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça em vigas de aço parcialmente revestidas com concreto. Logo, a principal variável é a posição dos conectores e foram estudadas as posições vertical e horizontal. Verticalmente, os conectores foram soldados na face interna da mesa inferior da viga de aço e, na posição horizontal, os conectores foram soldados nas duas faces opostas da alma. Os resultados mostraram que os conectores contribuem para o comportamento misto e para aumentar a resistência da viga embutida; a posição mais eficiente é soldar os conectores na mesa inferior da viga assimétrica de aço.

Palavras-chave: Viga mista, comportamento misto, conectores de cisalhamento, vigas parcialmente revestidas, transferência de esforços.

Abstract

The use of mechanical shear connectors, mainly headed stud bolts, is the most common way to achieve steel-concrete composite action. The encasement of the steel beam in the depth slab results in increase of strength and stiffness, reducing the total height of the floor. In this investigation, three partially encased composite beams were tested under flexural conditions and the main objective was to investigate some alternative positions for the headed studs. To provide longitudinal shear resistance between the I-shaped beam and the concrete, two positions of the studs were investigated: vertically welded on the bottom flange and horizontally welded on the faces of the web. The experimental results have shown that the headed studs are effective to provide the composite action and increase the bending strength. Furthermore, the headed studs welded vertically on the bottom flange proved to be the most reliable position.

Keywords: Composite beam, composite action, stud bolts, partially encased beam.

1. Introdução

Uma viga mista convencional tem configuração tipo T e é composta por um perfil I, conectado a uma laje de concreto armado ou mista de aço e concreto. A ligação aço-concreto é feita utilizando conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça ou perfis U. Apesar de esse arranjo já estar consolidado no meio técnico e ter procedimentos de cálculo e verificação incorporados às normas de dimensionamento de estruturas de aço, em muitos casos resulta em pavimentos de altura elevada. O intuito de reduzir a altura total do piso conduz a soluções bastante inovadoras e criativas, como, por exemplo, embutir a viga de aço, parcial ou totalmente, na altura da laje, variando a posição dos conectores de cisalhamento, quer seja na mesa superior, inferior, quer seja em ambas, ou na posição vertical ou horizontal (Figura 1).

O volume de concreto entre as mesas da viga (Figura 1b, c, e) confere algumas características ao elemento misto resultante, tais como: aumento da resistência ao fogo, capacidade resistente e rigidez em relação à seção de aço, aumento da resistência às instabilidades locais da seção de aço, redução da altura total da viga mista e do piso como um todo, economia de material e de mão-de-obra. Portanto o concreto revestindo a viga de aço constitui uma alternativa interessante e um amplo campo de estudo, pois, a cada arranjo dos componentes, corresponde a particularidades que merecem ser investigadas.

Apesar das vigas embutidas apresentarem boas características em termos

de comportamento estrutural e de custo, elas são uma solução construtiva pouco estudada até o momento, sobretudo no tocante à contribuição dos conectores de cisalhamento para promoção do comportamento misto. No momento, apenas as soluções apresentadas na Figura 1a e Figura 1e foram incorporadas aos códigos normativos (EUROCODE 4 e AISC-LRFD).

Em comparação com vigas mistas tradicionais (Figura 1a), o concreto armado existente entre as mesas aumenta a rigidez à flexão e diminui os deslocamentos verticais, mas não impede a instabilidade da mesa comprimida por flexão (Mergulhão et al., 1998).

Independente da morfologia, as vigas total ou parcialmente embutidas só podem ser consideradas mistas se houver algum tipo de mecanismo que promova o comportamento conjunto entre seus componentes. Portanto o comportamento misto constitui a mais importante propriedade desse tipo de elemento e tem influência decisiva nos critérios de dimensionamento e verificação. Nesse contexto, alguns tipos de vigas parcialmente revestidas têm sido estudados e os principais aspectos avaliados são o grau e os tipos de interação aço-concreto.

2. Comportamento misto via conectores tipo pino com cabeça e armadura

O conector de cisalhamento tipo pino com cabeça é o dispositivo mecâ-

nico mais utilizado para promover o comportamento misto aço-concreto. É comum o seu posicionamento acima da mesa superior da viga I de aço, mas isto exige que a altura de concreto acima da viga seja relativamente grande (NBR 8800:2006). Entretanto nada impede de posicionar o conector sobre a mesa inferior, por exemplo. A influência da posição do conector foi avaliada, experimentalmente, para pisos compostos por vigas de aço de seção assimétrica e forma de aço apoiada na mesa inferior (Bernuzzi et al., 1995). Conectores tipo pino com cabeça foram posicionados na mesa superior (posição convencional) de forma a obter diferentes graus de interação aço-concreto (interação total e parcial). Também foram posicionados conectores na vertical, em ambas as mesas - Figura 2a - sendo que os conectores na mesa inferior foram distribuídos apenas na região de momento negativo (Bernuzzi et al., 1995).

Para a situação de momento positivo, não houve grande influência do grau de interação e os elementos com interação total e parcial apresentaram comportamento momento-rotação semelhante. Sob a atuação de momento fletor negativo, embora o sistema tenha se mostrado mais deformável, quando com interação parcial, ainda assim a influência do grau de interação foi muito pequena (Bernuzzi et al., 1995). Além disso, quando há interação total, os conectores, na face interna da mesa inferior, não contribuem, de forma significativa, para aumentar a resistência ou a rigidez das vigas mistas.

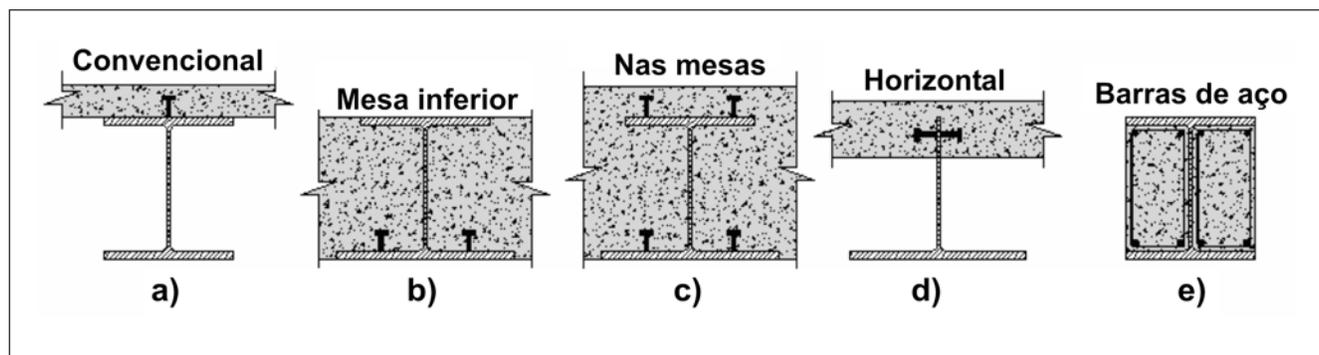


Figura 1 - Arranjo dos conectores de cisalhamento em vigas I de aço parcial ou totalmente revestidas.

Soldados horizontalmente às faces da alma da viga de aço (Figura 2d), os conectores podem levar o elemento misto a atingir sua capacidade resistente por fendilhamento do concreto (modo de falha predominante), pela associação entre fendilhamento do concreto e arrancamento dos conectores ou por arrancamento dos conectores (Breuninger, 2001), sendo que os dois últimos provocam perdas significativas de ductilidade. O fendilhamento da laje de concreto ocorre devido a baixas taxas de armadura ou porque os conectores foram posicionados muito próximos à superfície da laje. O arrancamento é raro e ocorre apenas quando os conectores são curtos e situados muito próximos da extremidade da laje.

Parâmetros como resistência do concreto, espessura da laje, espaçamento, diâmetro e comprimento dos conectores, quantidade, diâmetro e configuração dos estribos têm influência sobre a capacidade resistente. Contudo os aspectos mais importantes são a armadura da laje, a distribuição dos estribos e, principalmente, sua interseção com a armadura longitudinal, que funciona como ancoragem para as fissuras.

Os conectores, na horizontal, estão sujeitos, predominantemente, a forças de cisalhamento longitudinal que se concentram na região do conector e que devem ser distribuídas na altura da laje. As forças de tração produzem dois efeitos no concreto: o fendilhamento com fissu-

ras paralelas à chapa de aço (que funciona como forma) e a expansão; a abertura das fissuras pode ser limitada pela colocação de estribos verticais. O fendilhamento é predominante na ruína de elementos com conectores posicionados na horizontal, mas esse tipo de ruína não é contemplado pelos critérios de dimensionamento existentes, pois não é predominante para conectores na vertical.

A utilização de barras de armadura é uma forma interessante de promover o comportamento misto. Utilizando taxas elevadas de armadura longitudinal, no concreto armado posicionado entre as mesas da seção de aço, não é necessário utilizar conectores tipo pino com cabeça soldados horizontalmente à alma do perfil de aço para promover o comportamento misto (Kidmann et al., 1993) - Figura 3b.

Também é possível eliminar a mesa superior da viga de aço fazendo o concreto responder pelos esforços de compressão (Figura 1d). Nessa situação, o comportamento misto pode ser obtido fazendo furos igualmente espaçados na alma, próximo ao seu topo. Esses furos são ocupados pelas barras de armadura e pelo concreto em estado fresco; ambos promovem o comportamento misto no elemento resultante. Resultados indicam que a presença da mesa superior não tem grande influência sobre os valores de capacidade resistente à flexão e escorregamento aço-concreto (Klaiber & Wipf, 2000) - Figura 3a.

Adicionalmente, Jurkiewicz e Hottier (2005) propõem, além da retirada da mesa superior, a execução de dentes para redução do peso da viga e, na região dos dentes, barras de armadura são posicionadas para promover o comportamento misto (Figura 3c). Nesse tipo de arranjo, a ruína é caracterizada pelo escoamento da mesa inferior e posterior propagação para a alma. Logo, o modo de falha e a capacidade resistente são governados pela flexão da viga e não por falha na ligação aço-concreto (Jurkiewicz & Hottier, 2005).

Para Dipola et al. (2006), em vigas de aço revestidas com concreto, o comportamento misto pode ser atribuído apenas à aderência natural aço-concreto (Figura 3c). Na ausência de momento-fletor, o cisalhamento vertical é resistido apenas pela alma do perfil de aço, pois a contribuição do concreto é inexpressiva neste caso. Existindo momento-fletor e não havendo conectores de cisalhamento, a transferência de esforços entre os componentes depende, essencialmente, das parcelas de aderência correspondentes à adesão e ao atrito.

3. Programa experimental

3.1 Elementos ensaiados

O objetivo principal desse estudo experimental é avaliar a contribuição de conectores tipo pino com cabeça variando sua posição em vigas parcialmente

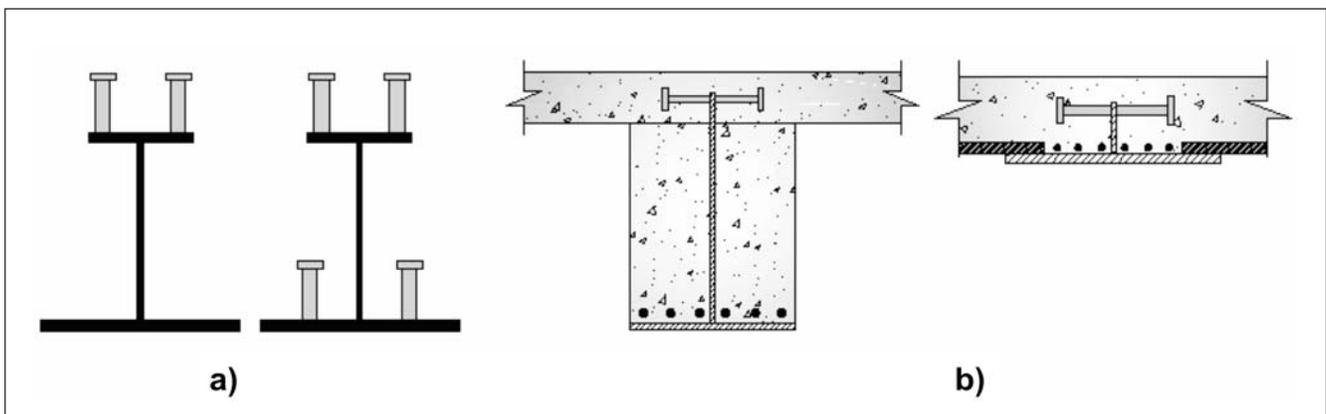


Figura 2 - Disposição dos conectores de cisalhamento - a) verticais (Bernuzzi et al., 1995); b) horizontais (Breuninger, 2001).

revestidas com concreto. Os resultados apresentados aqui são parte de um amplo estudo para o desenvolvimento e inserção dos pisos mistos de pequena altura no Brasil. Com a realização de três ensaios estáticos, foi possível determinar a posição mais eficiente para os conectores de cisalhamento e estudar os mecanismos de transferência das forças de cisalhamento na interface aço-concreto.

Ao todo, foram ensaiados três modelos de vigas submetidas à flexão em quatro pontos. Um destes modelos (PEB-B) possuía conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça soldados vertical-

mente sobre a mesa inferior. O segundo modelo (PEB-W) possuía conectores soldados horizontalmente na alma da viga assimétrica de seção I. O terceiro modelo (PEB), utilizado como referência, não possuía nenhum tipo de conector mecânico e a transferência de esforços de cisalhamento se dava apenas pela aderência natural aço-concreto.

Cinco conectores de cisalhamento com o comprimento de 75 mm e diâmetro de 19 mm foram soldados em cada lado da seção de aço. O espaçamento entre os conectores foi mantido constante e igual a 480 mm - Figura 4.

3.2 Instrumentação e esquema de ensaio

Deformações no aço e no concreto foram medidas utilizando extensômetros posicionados em diversas seções, totalizando 37 pontos instrumentados - Figura 5. Dez transdutores de deslocamento foram posicionados para medir deslocamentos verticais das vigas e quatro foram utilizados para registrar o escorregamento aço-concreto na extremidade das vigas - Figura 5.

Os ensaios das vigas parcialmente revestidas foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de

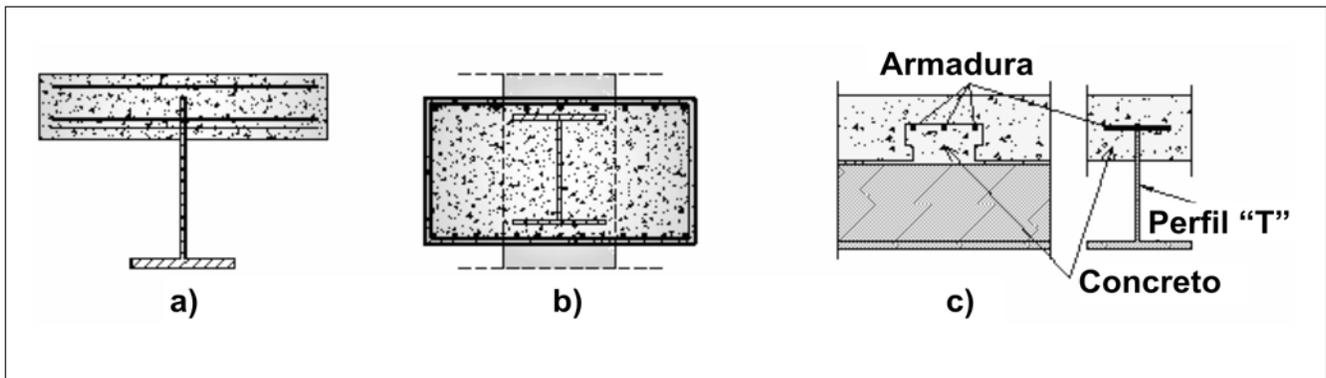


Figura 3 - Comportamento misto via armaduras - a) Klaiber e WIPF (2000); b) Dipaola et al. (2006) e c) Jurkiewicz e Hottier (2005).

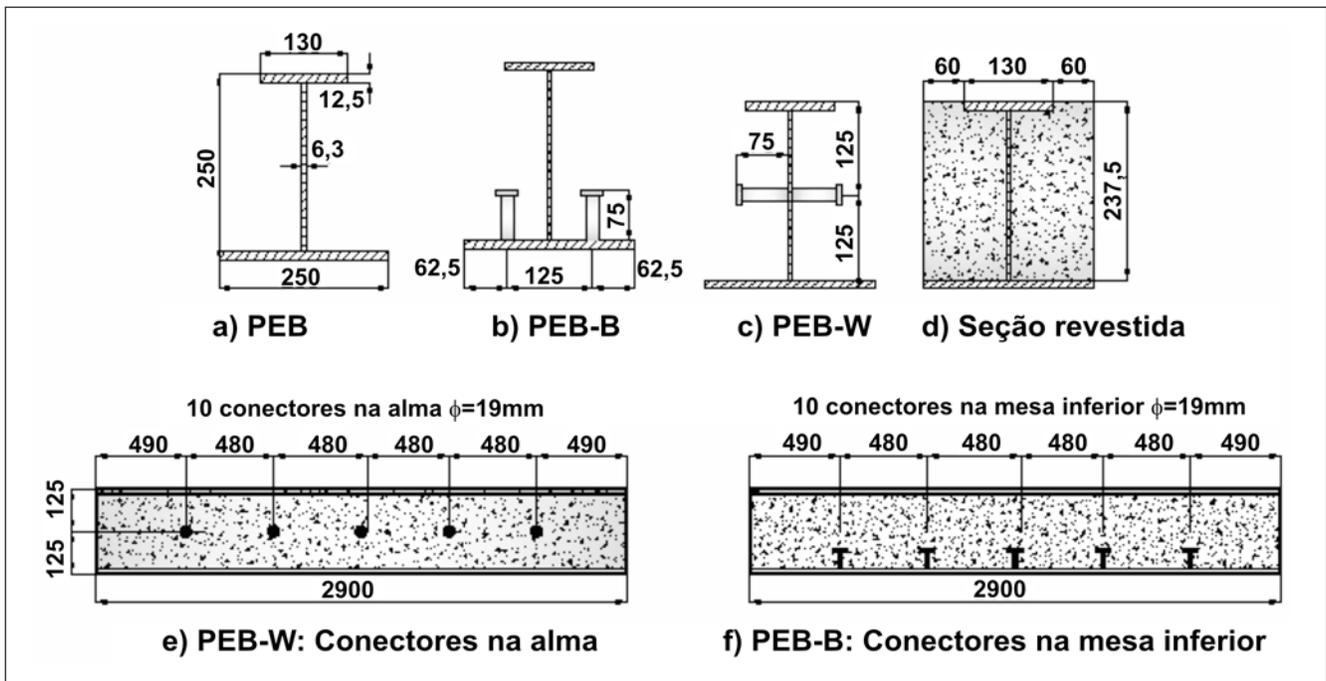


Figura 4 - Geometria dos modelos ensaiados.

Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. O esquema de ensaio adotado (Figura 6) resulta em um trecho central da viga sob momento-fletor constante e em um trecho com cisalhamento constante. As duas forças verticais foram aplicadas simultaneamente com controle de deslocamento e velocidade de 0,05mm/s, utilizando atuadores hidráulicos servo-controlados.

3.3 Caracterização dos materiais

Aço e concreto foram caracterizados a fim de determinar algumas de suas propriedades mecânicas. Para o concreto, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos 100 x 200 mm ensaiados a compressão simples. A resistência à compressão média do concreto foi de 35,7 MPa e o módulo de elasticidade foi de 32290 MPa.

As vigas foram confeccionadas em aço ASTM A-36, que, caracterizado à tra-

ção, apresentou 308 MPa de resistência ao escoamento e 469 MPa de resistência à tração.

4. Resultados

Valores de força máxima, em cada ponto de carregamento, flecha máxima e escorregamento médio são apresentados na Tabela 1. A partir dos valores de força máxima obtidos experimentalmente, verifica-se que a contribuição dos conectores é pequena, independente de sua posição na seção de aço. Acréscimos de 10% e 7% foram registrados, quando os conectores são posicionados na mesa inferior (PEB-B) e na alma (PEB-W), respectivamente. Portanto, a posição horizontal sobre a mesa inferior resulta em leve vantagem em relação às demais.

Quanto ao escorregamento aço-concreto, medido na extremidade das vigas revestidas parcialmente (Figura 7), a primeira parte das curvas apresenta

comportamento rígido, que corresponde à parcela de adesão ou aderência química. Essa parcela foi superada para uma força de, aproximadamente, 10 kN (Figura 7a) e a ruptura da adesão não é facilmente identificada nos modelos com conectores mecânicos de cisalhamento (modelos PEB-B e PEB-W). Portanto a presença dos conectores tipo pino com cabeça aumenta a capacidade resistente à flexão e produz mudanças sutis no comportamento Força vs. Escorregamento. Embora os elementos ensaiados tenham apresentado comportamento similar nos trechos pré e pós-pico, o elemento PEB (sem conectores mecânicos) apresentou leve redução da capacidade resistente após ser atingida a força máxima. No trecho pré-pico, os elementos com conectores apresentaram comportamento mais rígido, sobretudo o elemento com conectores verticais soldados na mesa inferior.

Em relação aos valores de escorregamento, para uma força aplicada de

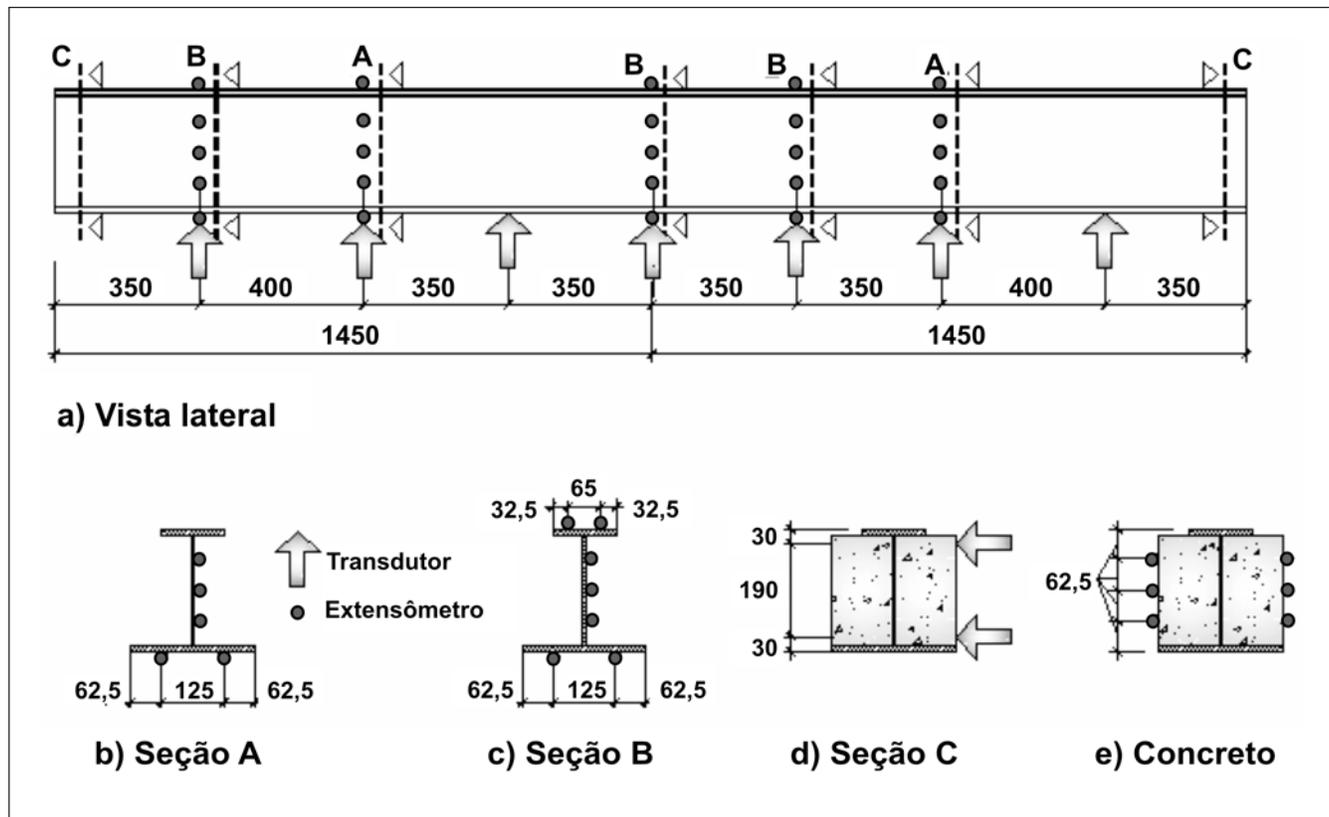


Figura 5 - Distribuição dos extensômetros elétricos e transdutores de deslocamento.

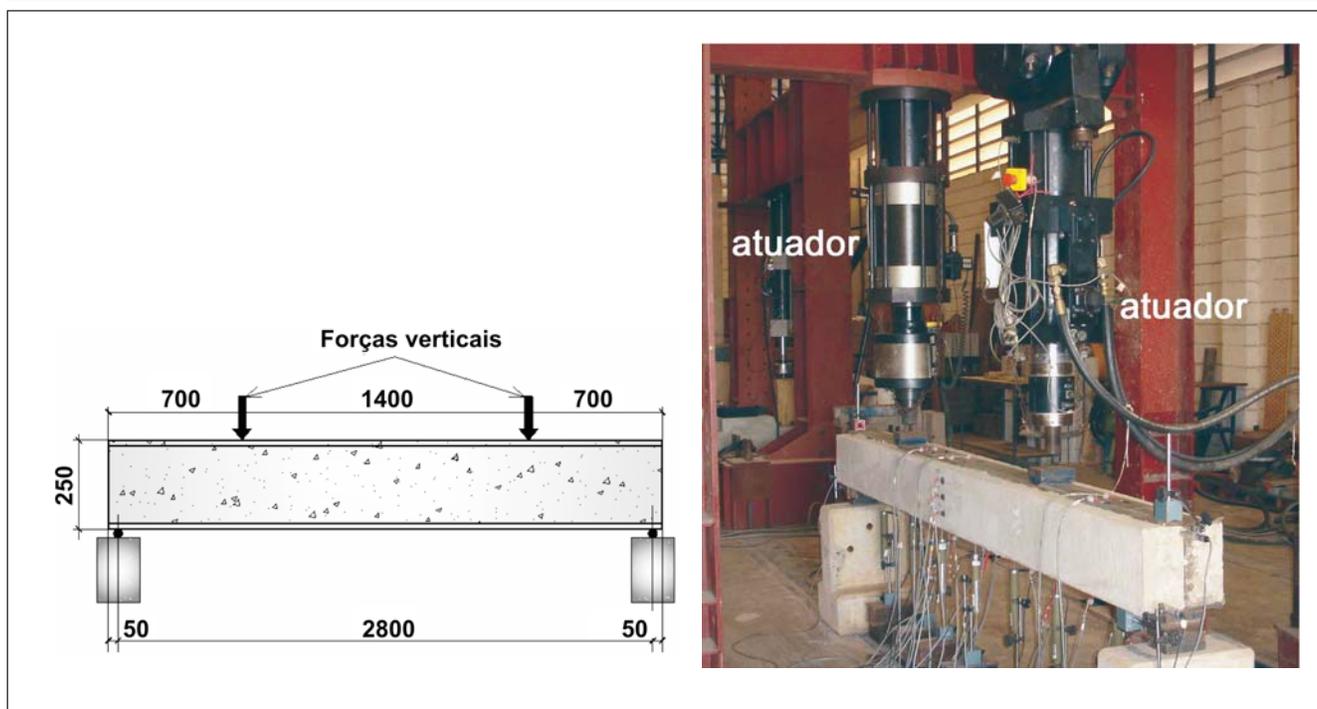


Figura 6 - Esquema de ensaio: flexão em quatro pontos.

Tabela 1 - Resultados experimentais.

| Elemento | Força máxima (kN) | Momento máximo (kN.cm) | Flecha (mm) | Escorregamento (mm) |
|----------|-------------------|------------------------|-------------|---------------------|
| PEB | 288,15 | 20170,5 | 18,68 | 1,87 |
| PEB-B | 317,16 | 22201 | 26,70 | 2,53 |
| PEB-W | 309,10 | 21637 | 27,36 | 3,14 |

150kN, em cada ponto de carregamento, as reduções nos elementos PEB-B e PEB-W foram de 37 % e 32 %, respectivamente, em relação ao escorregamento medido no elemento PEB (sem conectores mecânicos). Portanto os resultados de escorregamento indicam que os conectores verticais na mesa inferior correspondem à posição mais favorável.

Em relação à flecha medida pelos transdutores, os elementos com conectores apresentaram comportamento mais dúctil no trecho pós-pico que o elemento PEB (Figura 8a). Em contrapartida, no trecho pré-pico, o elemento PEB apresentou rigidez superior aos demais; fato visível na Figura 8b. Após ser atingida a

força máxima, ocorre perda abrupta de capacidade resistente à flexão para o elemento PEB.

Na Figura 9, é apresentado o panorama de fissuração para os elementos ensaiados. A fissuração iniciou na região de momento constante, ou seja, no trecho central da viga parcialmente revestida, atingindo uma força de, aproximadamente, 33 kN em cada ponto de aplicação do carregamento. Após iniciada, a fissuração foi se propagando em direção aos apoios. As primeiras fissuras que surgiram foram, aproximadamente, verticais e, à medida que a força aplicada aumentava, as fissuras se tornavam cada vez mais inclinadas em direção aos apoios.

As deformações, nos componentes da seção mista, são apresentadas na Figura 10 e, comparando os valores medidos no meio do vão do elemento PEB, estes são similares em ambos os materiais, na região comprimida da seção transversal (Figura 10a). A meia altura da seção transversal, os valores de deformação de compressão registrados no concreto são superiores aos medidos no perfil de aço, indicando que o concreto absorve grande parte desses esforços e contribui, significativamente, para a capacidade resistente à flexão da seção mista. Na região tracionada, como era de se esperar, devido à baixa resistência do concreto à tração, deformações significativas são registradas, no perfil de aço,

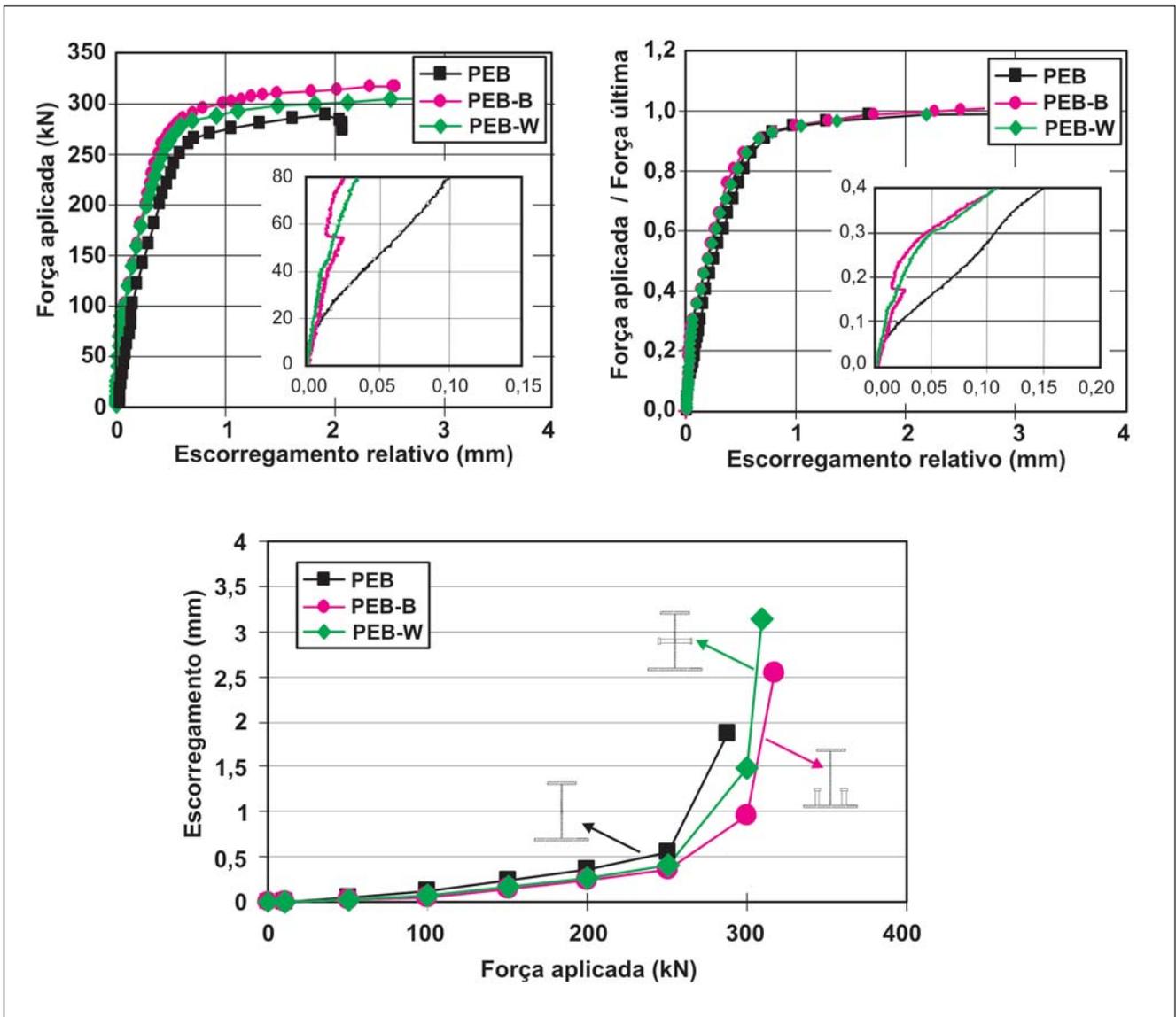


Figura 7 - Escorregamento aço-concreto.

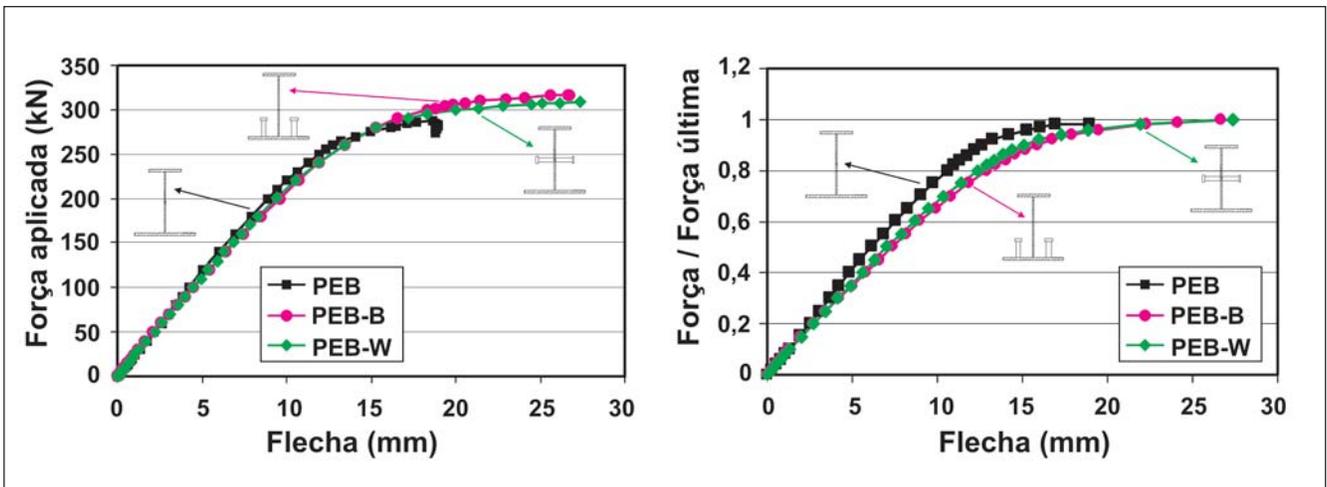


Figura 8 - Deslocamento vertical.

e deformações quase nulas são registradas no concreto.

No elemento com conectores verticais na mesa inferior (elemento PEB-B), aço e concreto contribuem na região comprimida, mas a parcela maior cabe ao concreto (Figura 10b). De forma semelhante, no elemento PEB, quase toda a tensão de tração é absorvida pelo perfil. Quando os conectores são posicionados horizontalmente na alma da seção de aço, as tensões de compressão são resistidas pelo concreto e as de tração, pelo perfil de aço (Figura 10c). As deformações no concreto da região comprimida dos elementos PEB e PEB-W apresentam comportamento bastante semelhante (Figura 10d).

5. Conclusões

O comportamento de vigas parcialmente revestidas e a eficiência de conectores tipo pino com cabeça, na promoção do comportamento conjunto aço-concreto, foram avaliados, experimentalmente, considerando duas posições distintas para tais conectores: soldados verticalmente na mesa inferior e soldados horizontalmente nas duas faces da alma. Com base nos resultados obtidos e considerando as limitações do programa experimental realizado, algumas conclusões são apresentadas a seguir.

Em relação à eficiência dos conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, os resultados experimentais mostraram que os conectores soldados verticalmente na mesa inferior são mais eficientes em termos de capacidade resistente à flexão e redução do escorregamento aço-concreto. Entretanto vale ressaltar que os valores de capacidade resistente à flexão encontrados no estudo experimental não diferem muito das demais situações investigadas.

Nos três elementos ensaiados, o modo de falha foi caracterizado por fissuração do concreto, que teve início no meio do vão e se propagou, progressivamente, na direção dos apoios. A presença de armaduras longitudinais e verticais poderia modificar o modo de falha



A) Elemento PEB



B) Elemento PEB-B



C) Elemento PEB-W

Figura 9 - Panorama final de fissuração.

observado e elevar os valores de capacidade resistente obtidos. No entanto, o objetivo desse estudo foi avaliar a influência da posição dos conectores no desenvolvimento do comportamento conjunto aço-concreto e, sendo assim, a posição não modificou o modo de falha dos elementos investigados.

Quanto ao comportamento global, a presença dos conectores torna o comportamento Força vs. Deslizamento mais dúctil, podendo ser classificado como elasto-plástico perfeito. Por outro lado, o elemento sem conectores apresentou perda de rigidez após ter atingido a força máxima, ou seja, no trecho pós-pico do diagrama Força vs. Deslizamento. Portanto ambas as posições investigadas para os conectores de cisalhamento mostraram-se eficientes na promoção do comportamento conjunto aço-concreto.

Por fim, vale lembrar que foi realizado um número limitado de ensaios e que

apenas a influência da presença de um tipo de conector de cisalhamento foi avaliada. Sendo assim, as conclusões aqui apresentadas estão fundamentadas apenas na variável analisada. Parâmetros como vão da viga, dimensões da seção transversal, resistência do concreto, presença de armaduras e interação entre força cortante e momento-fletor não foram avaliados e merecem estudos específicos para avaliar sua influência sobre o comportamento de vigas parcialmente revestidas.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro para a realização dos ensaios. Também agradecem à empresa Holcim pela doação do cimento para confecção dos modelos.

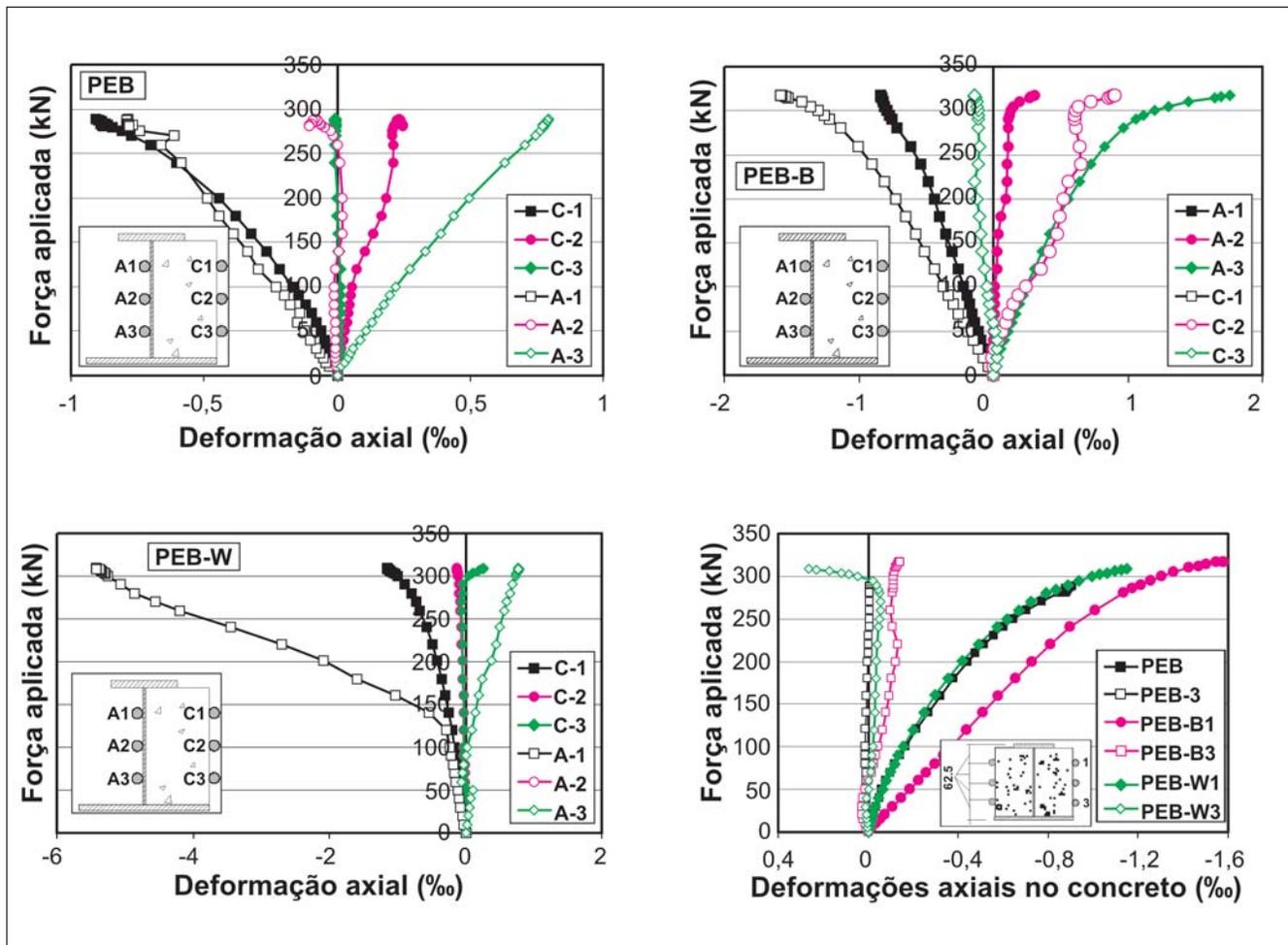


Figura 10 - Deformação axial no concreto e no aço. a) Modelo PEB; b) Modelo PEB-B; c) Modelo PEB-W e d) Deformação no concreto para todos os modelos ensaiados.

7. Referências bibliográficas

NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. *Projeto de Revisão da NBR 8800*. Rio de Janeiro/RJ: 2006.

AISC. *Specification for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction, 2005.

BERNUZZI, C., GADOTTI, F., ZANDONINI, R. Semi-continuity in slim floor steel-concrete composite systems. In: EUROSTEEL - EUROPEAN CONFERENCE ON STEEL STRUCTURES, 1. Athens, Greece: A. N. Kounadis, 1995, p.287-294.

BREUNINGER, U. Design of lying studs with longitudinal shear force. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONNECTIONS BETWEEN STEEL AND CONCRETE, PRO21. Stuttgart: RILEM, 2001, p. 1015-1024.

DIPAOLA, V., PRETE, F., PRETE, G. The elasto-plastic behaviour of encased composite beams for slim floors in multi-

storey buildings. In: INTERNATIONAL CONGRESS, 2. Naples: FIB, 2006. p. 1-12 (ID 5-24). Session 5 - Composite and hybrid structures.

EUROCODE 4. Design of composite steel and concrete structures. ENV1994-1-1 - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

JURKIEWIEZ, B., HOTTIER, J.M. Static behaviour of a steel-concrete composite beam with an innovative horizontal connection. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 61, n. 09, 1286-1300, 2005.

KIDMANN, R., BERGMANN, R. Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 27, n.1-3, p. 107-122, 1993.

KLAIBER, F.W., WIPF, T.J. An alternate shear connector for composite action. In: MID-CONTINENT TRANSPORTATION SYMPOSIUM. Ames, Iowa, 2000, p.115-120.

MERGULHÃO, A.J.R., FREITAS, A.M.S., MACHADO, R.M. Composite steel beams strength evaluation constituted of steel profiles filled with reinforced concrete. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 46, n. 1-3, paper n. 302, 1998.

Artigo recebido em 03/05/2007 e aprovado em 11/03/2008.

www.rem.com.br