

## Um sistema de laje mista para edificações residenciais usando perfis de chapa dobrada com corrugações

(Composite slab system for residential constructions using cold-formed steel plates with embossments)

Juliana Cruz Vianna

*Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil - E-mails: jvianna@civ.puc-rio.br*

Sebastião Arthur Lopes de Andrade

*Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil - E-mails: andrade@civ.puc-rio.br*

Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

*Departamento de Estruturas e Fundações. Faculdade de Engenharia - UERJ, RJ, Brasil E-mails: vellasco@uerj.br*

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

*Departamento de Estruturas e Fundações. Faculdade de Engenharia - UERJ, RJ, Brasil E-mails: lucianolima@uerj.br*

José Guilherme Santos da Silva

*Departamento de Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia - UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil - E-mail: jgss@uerj.br*

### Resumo

Sistemas mistos aço-concreto têm sido largamente utilizados na construção civil e vêm motivando o desenvolvimento de sistemas de lajes de piso com forma de aço incorporado, usando-se perfis formados a frio com corrugações na alma. O sistema aqui investigado baseou-se em protótipos de fôrmas metálicas, usando várias formas de ligação na interface aço/concreto. Para desenvolver um novo perfil metálico, que apresentasse uma boa aderência mecânica entre o concreto e o aço e com comportamento dúctil, avaliou-se uma seção transversal ideal. Diversas variáveis foram consideradas, tais como: peso, altura, espessura e tensão de escoamento. A investigação, também, contemplou ensaios em escala real de forma a validar, experimentalmente, o sistema de laje mista (aço-concreto) proposto.

**Palavras-chave:** Laje mista, perfil de chapa dobrada, corrugações, construção mista.

### Abstract

*The composite steel-concrete system has been used in various major projects motivating the development of an efficient composite floor system using cold-formed steel sections with web corrugations. The system was based on previous investigations that involved the development of steel deck prototypes using various types of interlocking mechanisms in the concrete to steel deck interface. An ideal section evaluation was made to determine an efficient steel profile that presented a good mechanical adherence to the concrete interface while keeping a ductile behavior. Variables like weight, height, thickness and yield stress amongst others were investigated. An experimental program consisting of a full-scale composite slab test was executed to validate the proposed composite cold-formed system.*

**Keywords:** Composite slab, cold-formed steel section, corrugations, composite construction.

## 1. Introdução

O sistema misto aço-concreto, além de possibilitar a obtenção de benefícios arquitetônicos e econômicos, apresenta vantagens, como a dispensa de fôrmas e escoramentos, redução do peso próprio e do volume da estrutura, redução considerável do consumo do aço estrutural, etc. Estas foram as principais motivações para o desenvolvimento de um sistema de laje de piso com fôrma de aço incorporada, utilizando perfis indentados de chapa dobrada com mossas (corrugações) na alma.

A idéia teve origem em alguns trabalhos já concluídos nessa linha de pesquisa, nas quais foram desenvolvidos protótipos de fôrma metálica (*steel-deck*), empregando-se diversas formas de ligação entre a chapa de aço e o concreto armado, tais como: corrugações na alma (Andrade, 1986), parafusos autobrochantes (Takey, 2004), septos em perfis tipo bandeja (Vieira, 2003) e perfis com corrugações circulares profundas (Beltrão, 2003). Com a intenção de se desenvolver um novo perfil metálico, que apresentasse uma boa aderência mecânica entre o aço e o concreto e com características de comportamento dúctil, foram avaliadas várias formas da seção transversal. Variáveis como peso, altura, espessura, tensão de escoamento, vão máximo e capacidade de suporte de carga foram consideradas.

Esse artigo apresenta os resultados obtidos com base em testes experimentais, em escala real, realizados sobre uma laje mista aço-concreto (Vianna, 2005). A investigação apresenta uma comparação dos resultados experimentais com outros

dois trabalhos existentes na literatura (Takey, 2004 e Beltrão, 2003) e, também, com resultados teóricos, objetivando a validação dos resultados obtidos para o sistema estrutural proposto.

## 2. Ensaios experimentais

O sistema estrutural analisado consistiu em uma laje de concreto com dois perfis metálicos e blocos de poliestireno expandido (EPS - isopor) preenchendo os espaços entre os perfis, conforme apresentado na Figura 1(a).

A Figura 1(a) e a Figura 1(b) apresentam uma comparação entre os dois sistemas estruturais estudados: o que foi alvo dessa investigação, com perfis de chapa dobrada com espessura de 1,20mm, 120mm de altura e um  $f_{ck}$  do concreto igual a 25MPa, e o sistema proposto por outro autor (Takey, 2004), o qual utilizou perfis com espessura de 2,00mm, com 75mm de altura e  $f_{ck}$  da ordem de 40MPa.

A armadura de pele utilizada na laje mista, para evitar fissurações na superfície, foi confeccionada com vergalhões de bitola 6,3mm dispostos a cada 200mm na largura e no comprimento. Essa armadura foi disposta a, aproximadamente, 25mm da face da mesa superior do perfil metálico. A utilização dessa armadura de pele proporcionou um pequeno ganho de resistência na estrutura.

O sistema estrutural utilizado foi bi-apoiado. Foram adotados apoios com roletes para simular essa configuração. A resistência do concreto esperada para os ensaios foi de 25 MPa. Após os 28

dias, obteve-se uma resistência média de 27,61 MPa dos 9 corpos de prova ensaiados. O traço utilizado foi de 1:2,6:1,8 (cimento, areia e brita) com um fator água/cimento de 0,52.

Foram utilizados, como equipamentos de medição de deslocamentos verticais, laterais e deslizamento da laje, cinco relógios para consulta analógica e cinco LVDT's para medição eletrônica (Figura 2). Foram posicionados um relógio e um LVDT em cada extremidade da laje com a base sendo fixada no perfil metálico e o marcador no concreto. Esses instrumentos serviram para medir o deslizamento entre o concreto e o aço. Para verificar a rotação/deslocamento lateral, ocorrida na laje durante o ensaio, foram posicionados dois relógios analógicos, sendo um em cada extremidade lateral oposta da laje com base fixa fora da laje e marcador no concreto. Para medir o deslocamento vertical da laje, para cada carga aplicada, foram posicionados um relógio analógico no meio do vão e um LVDT a 60mm de distância do relógio. Os outros dois LVDT's foram posicionados a 900mm, aproximadamente, de cada extremidade.

Para medir a deformação do perfil metálico da laje mista durante o ensaio, foram instalados seis extensômetros elétricos na face inferior da mesa superior do perfil, sendo três em cada perfil. Um extensômetro foi instalado no meio do vão e os outros dois a 775mm da extremidade do perfil.

A Figura 2 apresenta a configuração global dos relógios (R1 ao R5), dos LVDT's (83 ao 87), dos extensômetros (*Strain* 0 ao *Strain* 5) utilizados no ensaio e os pontos de aplicação de carga.

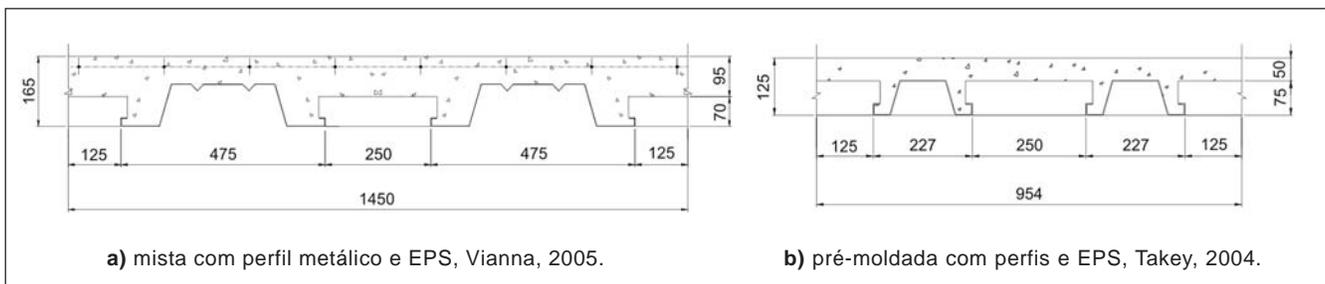


Figura 1 - Sistemas de lajes.

No programa de ensaios, foi testada uma laje de 1,45m x 3,0m, sendo o vão livre de 2,91m de comprimento, com dois perfis de chapa dobrada com mossas estampadas na alma a cada 100mm e na mesa superior a cada 310mm conforme apresentado na Figura 3.

As cargas foram aplicadas, igualmente, em dois pontos através de uma viga de distribuição de cargas, a uma distância dos apoios de 1/4 do comprimento do vão, Figura 4. Foram realizados três ensaios de pré-carga para aferir a instrumentação e mobilizar a estrutura de forma gradativa. Para todos os ensaios de pré-carga, foram aguardados 15 minutos antes do descarregamento para a acomodação da estrutura.

Após a realização do último ensaio de pré-carga, realizou-se o ensaio final da estrutura. O carregamento foi aplicado até o colapso da estrutura. As medições foram realizadas a cada 5kN até atingir o nível de carregamento do último pré-ensaio, que foi de 60kN. Após 60kN, prosseguiu-se com a aplicação do carregamento e com as medições a cada 2kN até o colapso estrutural por deslizamento na interface aço-concreto. Durante o carregamento, quando se atingiam os ní-

veis de carga dos pré-ensaios (20kN, 40kN e 60kN), aguardavam-se 5 minutos para acomodação da estrutura. A carga de colapso foi de 72kN.

A laje teve um comportamento praticamente linear, tanto para os deslocamentos, como para as deformações até um nível de carga de 60kN. Quando a carga atingiu 48kN, foram detectados os primeiros ruídos no ensaio e houve o primeiro deslizamento entre o concreto e

o perfil metálico, conforme mostram as Figura 5(a) e Figura 6. Após esse nível de carga, a estrutura adquiriu uma rigidez adicional, até que um novo deslizamento ocorreu com um carregamento de 72kN, ficando, evidente, a ruptura por deslizamento entre o aço e o concreto.

A Figura 5(a) apresenta o gráfico carga *versus* deslocamento vertical no meio do vão medido pelo LVDT 84 nos ensaios de pré-carga (20kN, 40kN e 60kN)

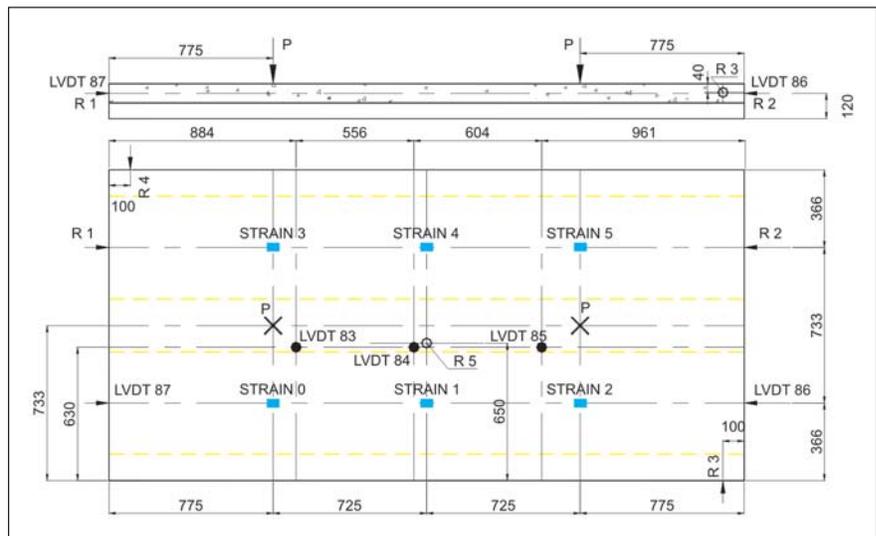


Figura 2 - Instrumentação do ensaio da laje mista.

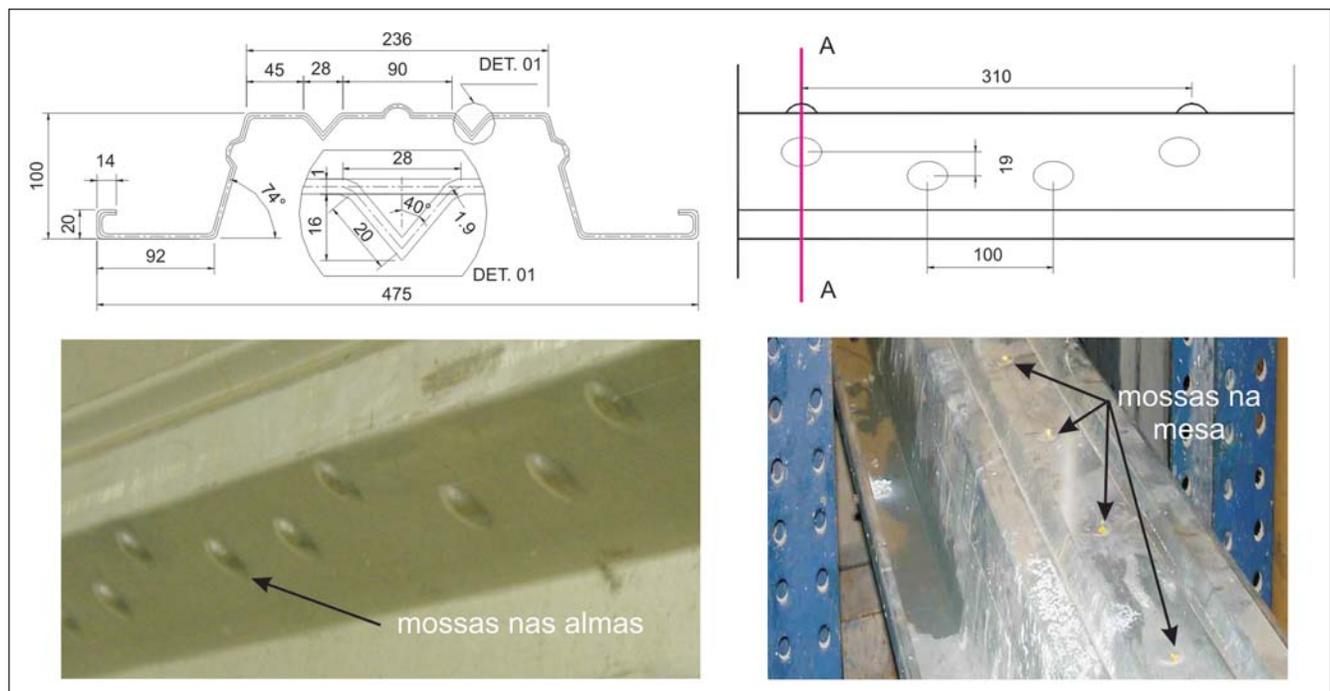


Figura 3 - Detalhe das mossas na alma do perfil.

e no ensaio final. A Figura 5(b) apresenta o gráfico de carga versus deslizamento aço/concreto medidos pelos LVDT's 86 e 87 localizados nas extremidades opostas da laje durante o ensaio final. A Figura 6 apresenta os deslocamentos verticais medidos pelos LVDT's 83, 84 e 85, na fase de carregamento dos ensaios de pré-carga e do ensaio final. Os LVDT's 83 e 85 estavam localizados a um terço do vão e o LVDT 84, no meio do vão.

As deformações do perfil metálico, na estrutura da laje mista, foram obtidas através de extensômetros posicionados na face inferior da mesa superior do perfil metálico. A Figura 7 apresenta os gráficos carga *versus* deformação no ensaio final dos pares de extensômetros. Nota-se que o escoamento (1379,3me), valor aferido com ensaio de caracterização do material da chapa, não foi atingido durante o ensaio. A aceleração das deformações observadas na Figura 7 ocorreu devido ao deslizamento na interface aço-concreto ter se iniciado.

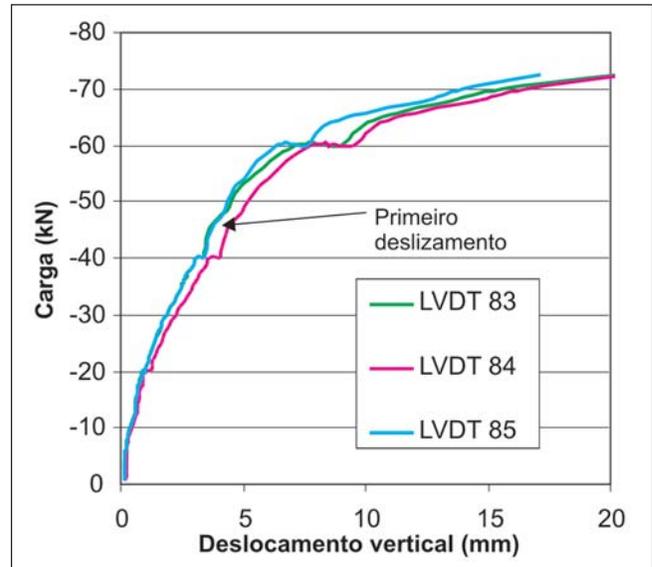


Figura 6 - LVDT's 83, 84 e 85 na fase de carregamento dos ensaios de pré-carga e ensaio final.

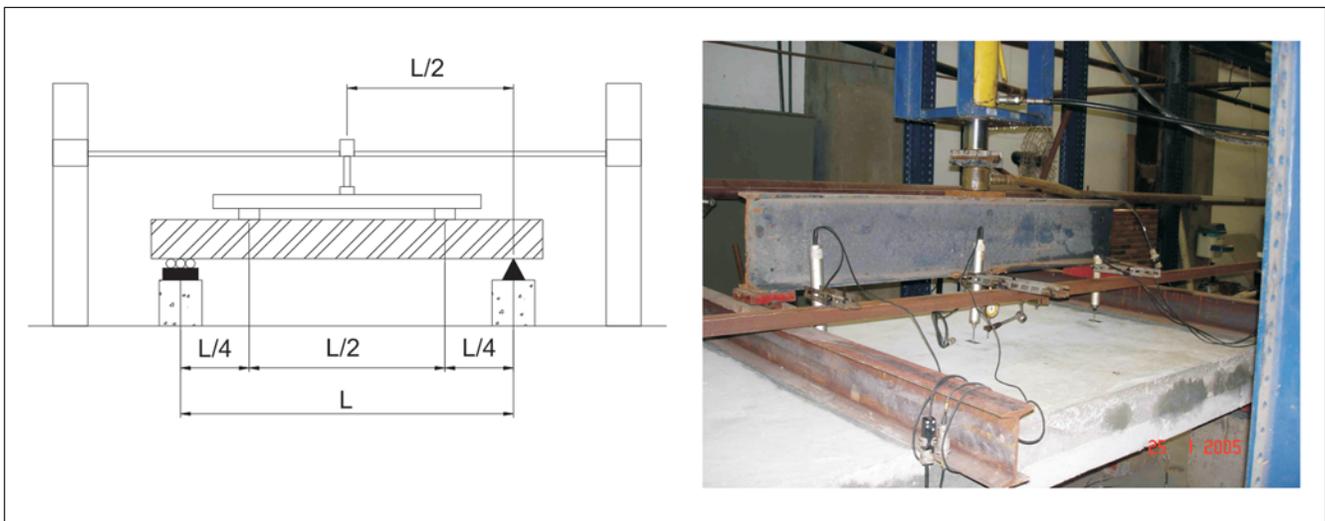


Figura 4 - Esquema de apoios e aplicação de carga.

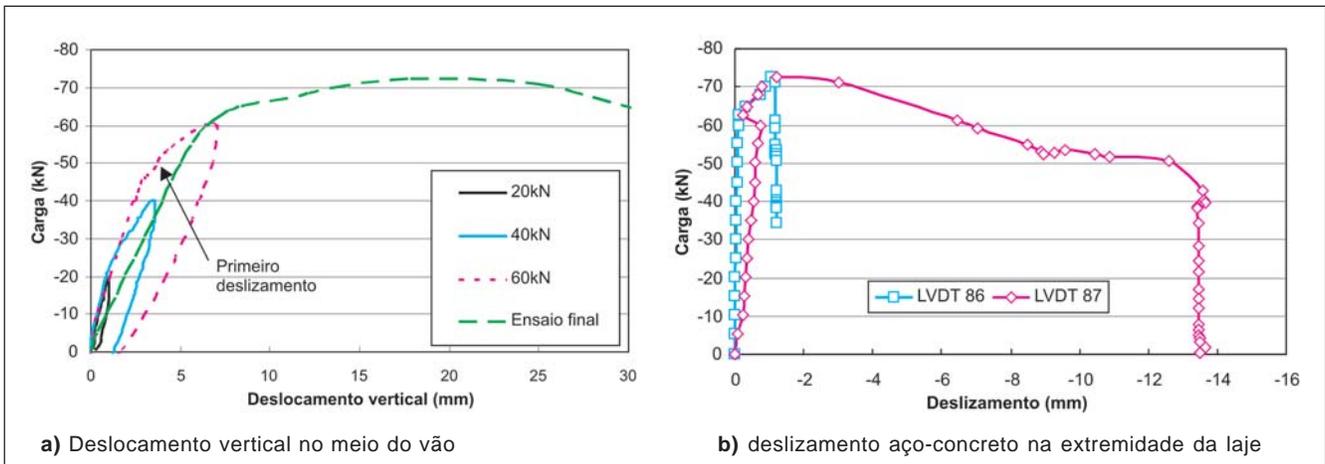


Figura 5 - Curvas carga *versus* deslocamento.

A equação 1 relaciona a rigidez da laje mista (EI) com a carga e o deslocamento vertical no regime elástico.

$$\frac{P}{\delta} = \frac{384.E.I}{11.L^3} \quad (1)$$

onde P é o carregamento aplicado,  $\delta$  é o deslocamento vertical no meio do vão e L é o vão da laje.

A Figura 8(a) apresenta a configuração inicial e a Figura 8(b), a configuração final do deslizamento ocorrido entre o concreto e o aço na extremidade da laje. A Figura 8(c) apresenta as fissuras no concreto que ocorreram próximas a um dos pontos de aplicação de carga da estrutura.

De acordo com a curva registrada pelo LVDT 84, apresentada na Figura 9, a relação  $P/\delta$  é igual a 6,76 kN/mm. Substituindo esse valor, na equação 1, toman-

do-se  $L=2910\text{mm}$ , obtém-se a rigidez à flexão da laje no regime elástico igual a  $4,77 \times 10^9 \text{kN}\cdot\text{mm}^2$ .

Para uma comparação entre o resultado experimental e o teórico da laje mista, calculou-se a rigidez teórica (EI), considerando-se:  $I = 3,613 \times 10^7 \text{mm}^4$  (com a transformação da seção de concreto em aço) e  $E = 203000 \text{MPa}$ , resultando em  $7,334 \times 10^9 \text{kN}\cdot\text{mm}^2$ .

A Tabela 1 apresenta o valor de rigidez inicial, considerando a carga até 9,0kN, a rigidez de serviço, com a carga de 4,38kN/m correspondendo a 12,74kN e a já descrita anteriormente. A Figura 9 apresenta o gráfico carga versus deslocamento vertical com as retas indicando os ângulos  $\alpha$  ( $P/\delta$ ) para cada intervalo descrito. Verifica-se que o valor teórico está no intervalo entre a rigidez de serviço e a do ensaio 1, correspondendo a uma carga de, aproximadamente, 38kN.

Para analisar os resultados obtidos nesse ensaio, fez-se uma comparação entre esses resultados e os resultados dos trabalhos desenvolvidos por Takey (2004) e Beltrão (2003). A Figura 10 apresenta o gráfico carga versus deslocamento vertical no meio do vão de todos os ensaios acima referidos, cujos vãos foram de 3,00m. Esse gráfico apresenta os valores de carga de serviço de Beltrão (2003) corrigidos para mais 50%, além de uma correção desse trabalho com o de Beltrão (2003) para a resistência do concreto, já que o valor adotado no trabalho de Takey (2004) foi de 40 MPa, diferentemente dos 25MPa adotados nos outros trabalhos. No trabalho desenvolvido por Takey (2004), foram executados três ensaios com perfil de chapa dobrada com espessura de 2,00mm, variando-se o espaçamento entre os conectores de cisalhamento do tipo parafusos autobrocantes  $\frac{1}{4}'' \times \frac{3}{4}''$  (*self drilly bolts*). O primeiro

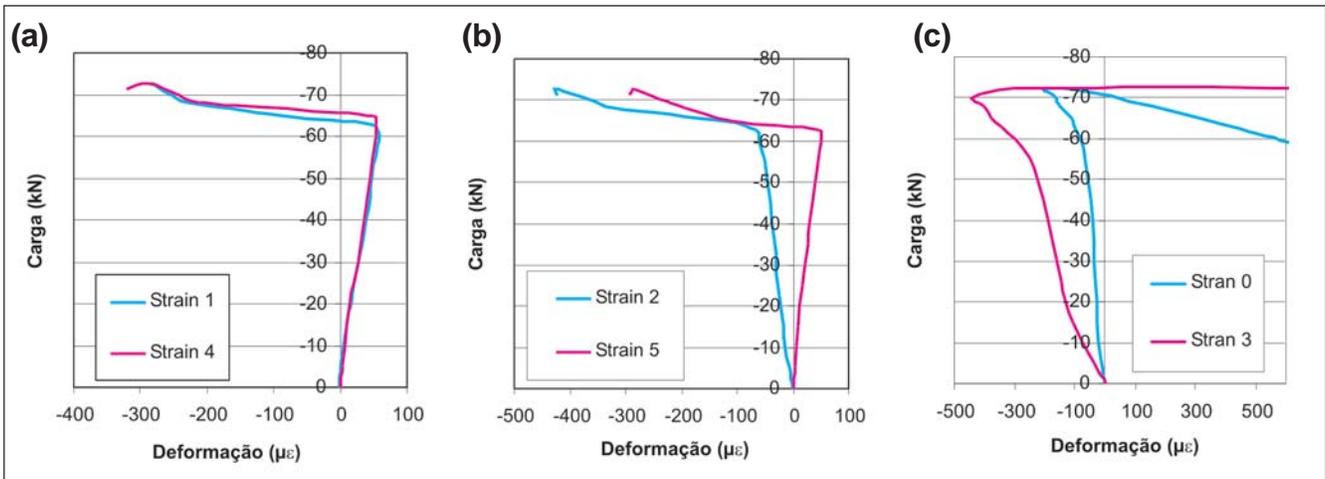


Figura 7 - Gráfico de deformação do perfil metálico.



Figura 8 - Deslizamentos entre o concreto e o aço e fissuras no concreto.

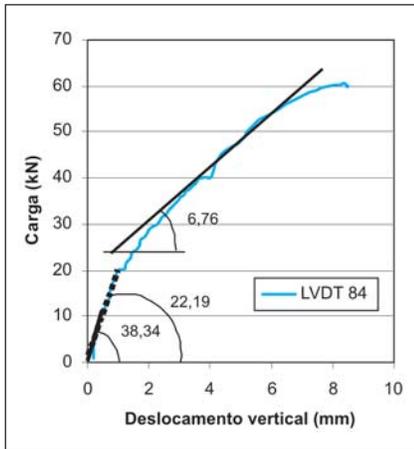


Figura 9 - Determinação da rigidez experimental.

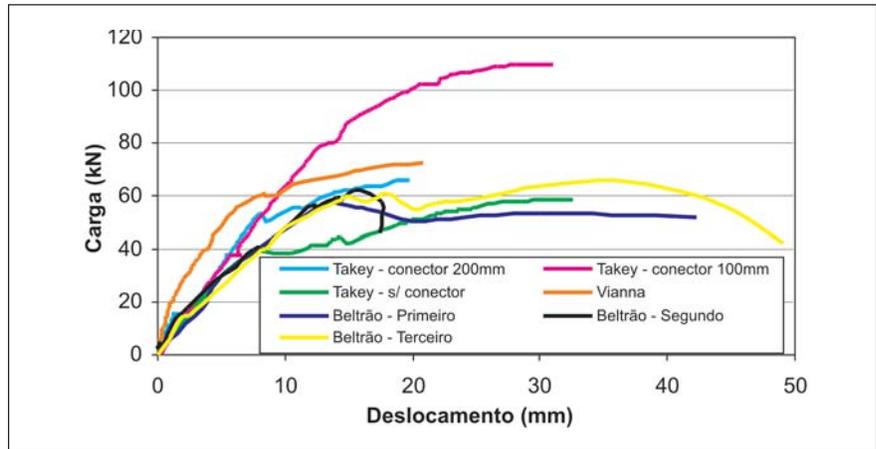


Figura 10 - Comparação com redução de 21% da carga no trabalho de Takey (2004).

ensaio foi realizado com perfil liso, sem conector, o segundo com conectores na mesa superior a cada 200mm e o terceiro ensaio com conectores a cada 100mm. No trabalho de Beltrão (2003), foram executados três ensaios com lajes de 3,00m de vão e com perfis com mesma seção transversal utilizada por Takey (2004), apresentando corrugações na alma do perfil a cada 50mm, no primeiro e segundo ensaio, e a cada 100mm, no terceiro ensaio.

A Tabela 2 apresenta as relações de carga por deslocamento ( $\alpha$ ) originais

Tabela 1 - Valores de rigidez, carga aplicada e deslocamentos.

Ensaio	$P/\delta$ ( $\alpha$ )	El (kN/mm <sup>2</sup> ) - Original	Carga (kN)	Deslocamento (mm)
Inicial	38,34	2,71E+10	9,00	0,38
Serviço	22,19	1,57E+10	12,74	0,68
Ensaio 1	6,76	4,77E+09	60,00	7,84
Teórico	10,39	7,33E+09	38,18	3,39

Tabela 2 - Comparação de valores de rigidez dos ensaios.

Ensaio	$P/\delta$ ( $\alpha$ )	El original (kN.mm <sup>2</sup> )	El corrigido (kN.mm <sup>2</sup> )	Carga última (kN)	Desl. Máx. (mm)	Carga (kN/m)
Vianna	6,76	4,77E+09	4,77E+09	72,00	20,78	24,00
Takey - sem conectores	6,80	5,26E+09	4,25E+09	59,64	32,5	19,88
Takey - conec. c/200mm	7,50	5,80E+09	4,69E+09	67,84	19,83	22,61
Takey - conec. c/100mm	7,20	5,57E+09	4,51E+09	112,22	30,97	37,41
Beltrão - Ensaio 1	2,61	2,02E+09	4,04E+09	58,00	13,77	19,33
Beltrão - Ensaio 2	2,50	1,93E+09	3,87E+09	62,00	15,31	20,67
Beltrão - Ensaio 3	2,39	1,85E+09	3,70E+09	66,00	36,21	22,00

dos ensaios de Takey (2004) e Beltrão (2003), a rigidez calculada pela equação 1, a rigidez e carga última corrigidas, o deslocamento vertical máximo e a carga em kN/m em função do momento de todos os ensaios.

Nota-se, na Tabela 2, que não houve uma diferença significativa em relação à rigidez para todos os ensaios da laje, quando os valores corrigidos são comparados.

O sistema de laje mista, estudado nesse trabalho, apresentou a maior rigidez entre todos os ensaios. Esse aumento de rigidez se deve à utilização de uma laje com espessura maior em relação aos outros ensaios, além de o perfil metálico possuir corrugações na alma do perfil e dois enrijecedores intermediários na mesa superior (substituindo os conectores de cisalhamento), possuindo uma inércia consideravelmente maior em relação aos outros ensaios.

Segundo o EUROCODE 4 (2001), o comportamento dúctil de uma laje mista é caracterizado, quando a carga final alcançada pelo sistema supera, em pelo menos 10%, o valor da carga no momento em que o escorregamento, entre o aço e o concreto, atingir 0,5mm. Caso contrário, o sistema é considerado frágil. Como pode ser visto no gráfico da Figura 5(b), a carga de 40kN, referente ao deslocamento de 0,5mm, corresponde a 55,5% da carga final (72kN). Portanto o sistema estudado apresentou um comportamento dúctil.

A análise desses resultados mostra que é viável a utilização do sistema estrutural desenvolvido nessa investigação, devido à economia de tempo, custo e trabalhabilidade em relação aos conectores utilizados no trabalho de Takey (2004).

### 3. Considerações finais

Essa investigação apresentou os resultados de testes experimentais desenvolvidos no estudo de perfis metálicos de chapa dobrada com mossas (corrugações) na alma, a fim de compor um sistema de laje de piso com fôrma de aço incorporado.

Desse modo, foi estudada uma opção para um sistema de laje mista (aço-concreto) com conectores (Takey, 2004), substituindo-os por corrugações nas almas e por dois enrijecedores intermediários na mesa superior do perfil.

O objetivo principal desse trabalho de pesquisa foi o de apresentar uma contribuição associada a uma nova alternativa de um perfil metálico. Para tal, foi feita uma variação da seção transversal do mesmo, de modo a avaliar, teórica e experimentalmente, o comportamento estrutural do perfil, bem como o sistema estrutural de laje mista.

Os ensaios experimentais comprovaram a resistência adequada do novo sistema estrutural, como também a viabilidade da solução técnica, suposta economicamente viável para emprego na construção civil.

O ensaio, em escala real da laje mista, apresentou um comportamento dúctil e comprovou o tipo de colapso mais usual, que ocorreu por cisalhamento longitudinal, não sendo atingida a resistência última ao momento-fletor do sistema estrutural.

### 4. Referências bibliográficas

- ANDRADE, A., VELLASCO, P., SILVA, J., TAKEY, T. Standardized composite slab systems for building constructions. *Journal of Constructional Steel Research*, 60, p. 493-524. 2004.
- ANDRADE, S. A. L. de. *Laje mista com deck-metálico*, 6º CECAP. Colóquio sobre Estruturas de Concreto Armado e Protendido. Rio de Janeiro, 1990. v. 2, p. 54-75.
- BELTRÃO, A. J. N. *Comportamento estrutural de lajes mistas com corrugações na alma de perfis de chapa dobrada*. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio, 2003. 124p. (Dissertação de Mestrado).
- CRISINEL, M., MARIMON, F. A new method for the design of composite slabs. *Journal of Constructional Steel Research*, 60, p. 481-491. 2004.
- CSA S136-01. *North american specification for the design of cold-formed steel structural members*, AISI Committee on Specifications, CSA's S136 Committee and CANACERO, 2001.
- CSA STANDARD S136-94. *Cold formed steel structural members*. Canadian Standards Association. Ontario, Canadá, 1994. 178 p.
- EUROCODE 4. EN 1994. *Design of composite steel and concrete structures Part 1.1 General rules and rules for buildings*. CEN, European Committee for Standardisation. Document CEN/TC 250/SC 4, Brussels, 2001. p. 135.
- VIANNA, J. C. *Sistema de laje mista para edificações residenciais com uso de perfis embossados de chapa dobrada*. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio. 2005. 189p. (Dissertação de Mestrado).
- VIEIRA, J. D. *Estudo teórico-experimental do comportamento de lajes mistas com perfis incorporados de aço*. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio, 2003. 121p. (Dissertação de Mestrado).

Artigo recebido em 24/11/2006 e aprovado em 28/11/2006.

**REM - Revista Escola de Minas**  
**www.rem.com.br**