



VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO: MODELAGEM NUMÉRICA COM ÊNFASE NA INTERFACE LAJE-VIGA

Liliane do Rocio Marconcin (1); Roberto Dalledone Machado(2); Marcos Antonio Marino (3)

(1) Departamento de Construção Civil – Universidade Federal do Paraná, Brasil – e-mail:
liliane.m@ufpr.br

(2) Departamento de Construção Civil – Universidade Federal do Paraná, Brasil – e-mail:
rdm@ufpr.br

(3) Departamento de Construção Civil – Universidade Federal do Paraná, Brasil – e-mail:
marino@ufpr.br

RESUMO

Proposta: As vigas mistas aço-concreto, muito utilizadas nas obras de engenharia civil, são constituídas por vigas de aço e lajes de concreto, ligadas entre si por conectores de cisalhamento, visando aproveitar as vantagens estruturais dos materiais. As funções principais dos conectores são: permitir o trabalho conjunto da laje-viga, restringir o escorregamento longitudinal e o deslocamento vertical na interface dos elementos e, absorver forças de cisalhamento. Tendo em vista os aspectos mencionados, propõe-se neste artigo a simulação do comportamento estrutural de vigas mistas, especialmente da interface laje-viga, através de modelagem numérica. **Método de pesquisa/Abordagens:** São apresentados neste trabalho, modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas aço-concreto cujas simulações foram feitas através do software comercial ANSYS versão 10.0, que tem como base o Método de Elementos Finitos. **Resultados:** Os resultados foram comparados com valores extraídos de trabalhos apresentados por outros pesquisadores e estão de acordo com aqueles. **Contribuições/Originalidade:** A modelagem numérica é uma ferramenta válida para a análise de vigas mistas aço-concreto.

Palavras-chave: vigas mistas; conectores de cisalhamento; modelagem numérica.

ABSTRACT

Propose: Steel-concrete composite beams, widely used in civil engineering, are constituted of steel beams and concrete slabs, connected by means of shear connectors, providing better management of each structural material. Shear connectors allow slab and beam work together, restrict the longitudinal slipping and the uplifting between steel beam and concrete slab and, absorb shear forces. In this sense, this paper proposes the simulation of structural behavior of composite beams, especially the interface slab-beam, by numerical modeling. **Methods:** The work presents three-dimensional numerical models of steel-concrete composite beams. Simulations had been carried out by means of the commercial program ANSYS version 10.0, based on Finite Elements Method. **Findings:** The results had been compared with values extracted of works presented by others researchers with good agreement between them. **Originality/value:** The numerical approach is a valid tool to analyze behavior of steel-concrete composite beams.

Keywords: composite beams; shear connectors; numerical modeling.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estruturas mistas aço-concreto

As estruturas mistas aço-concreto, surgidas em meados do século passado, envolvem de uma forma geral, a ligação mecânica de elementos de concreto com perfis metálicos, por meio do uso de dispositivos metálicos denominados de conectores de cisalhamento. As principais funções dos conectores são: permitir o trabalho conjunto da laje-viga, segundo Kirchhof (2004), restringir o escorregamento longitudinal e o deslocamento vertical na interface dos elementos e, absorver forças de cisalhamento (ALVA E MALITE, 2005). As vigas mistas, em particular, são estruturas constituídas por um perfil metálico (geralmente um perfil “I”), situado em região predominantemente tracionada, que suporta uma determinada seção de concreto, situada em região predominantemente comprimida, cuja ligação é feita através dos conectores de cisalhamento. Portanto, do ponto de vista da resistência dos materiais, é possível tirar grande proveito da seção de aço para resistir aos esforços de tração e do concreto para os esforços de compressão. Com isso, obtém-se elementos de elevada rigidez e ao mesmo tempo pequeno peso, devido a possível redução da altura dos elementos estruturais, o que leva a uma concepção mais econômica, pois conduz a um projeto com fundações leves, de acordo com David (2007).

Os primeiros edifícios a lançar mão do sistema misto, no Brasil, foram construídos na década de 50. Porém, nos últimos 20 anos, a demanda pelo sistema cresce vertiginosamente, pois segundo o CBCA (2007), a disponibilidade do aço está aumentando no país.

Este artigo procura analisar as vigas mistas computacionalmente, estudando-as de maneira aprofundada. A idéia central é modelar vigas mistas através do código ANSYS 10.0, que tem como base o Método dos Elementos Finitos, enfatizando a interface laje-viga.

2 OBJETIVO

O objetivo principal deste artigo é simular o comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto, especialmente a interface laje-viga, através de modelagem numérica.

Este objetivo, em termos gerais, equivale a conhecer melhor o comportamento estrutural (mecânico) das vigas mistas. Especificamente pretende-se verificar o deslizamento na interface laje-viga, as flechas e a força vertical máxima suportada pelas vigas, comparando os valores obtidos na modelagem numérica com referências encontradas na literatura.

3 METODOLOGIA

3.1 Modelagem numérica

Foram desenvolvidos neste trabalho modelos numéricos com a finalidade de simular o comportamento estrutural de vigas mistas simplesmente apoiadas (figura 1), com perfil de alma compacta, laje de face plana armada em duas direções (transversal e longitudinal), sujeitas a um carregamento concentrado no meio do vão. Os conectores de cisalhamento utilizados nos modelos são do tipo pino com cabeça, apresentam três valores distintos de alturas e diâmetros e foram distribuídos uniformemente ao longo do vão da viga.

A modelagem numérica, baseada no Método dos Elementos Finitos e solucionada pelo programa ANSYS versão 10.0, seguiu a mesma metodologia apresentada por Kotinda (2006).

Inicialmente escolheram-se os elementos finitos para discretizar os materiais. Em seguida foram introduzidas, no código adotado, as propriedades dos materiais e as relações constitutivas dos mesmos. Posteriormente definiu-se a malha, os acoplamentos e vinculações entre os elementos, a condição de simetria e consequente restrição dos graus de liberdade, a vinculação no apoio da viga e o carregamento. Todos os dados introduzidos nas modelagens seguiram valores e metodologias estabelecidas por Kotinda (2006).

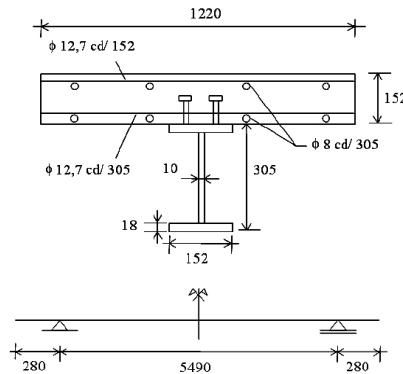


Figura 1 – Dimensões (mm) da viga mista modelada (dados de KOTINDA, 2006)

3.2 Elementos finitos

A elaboração dos modelos numéricos propostos se deu a partir de elementos finitos disponibilizados na biblioteca interna do código de cálculo ANSYS.

Na discretização da laje de concreto foi utilizado o elemento tridimensional SOLID 65, que é capaz de simular o comportamento à fissuração do concreto na tração (nas três direções ortogonais) e esmagamento na compressão, bem como um comportamento de não linearidade física e ainda possibilita a inclusão das barras de armadura de forma discreta ou na forma de taxas (armadura dispersa).

A representação do perfil de aço foi feita pelo elemento SHELL 43, que permite a consideração de não-linearidade do material e apresenta deformação linear no plano em que está contido.

A modelagem dos conectores de cisalhamento foi feita com o elemento BEAM189, que permite a configuração da forma da seção transversal, possibilita a consideração da não linearidade física do material e responde aos esforços de flexão.

Os elementos TARGE 170 e CONTA 173 foram utilizados na representação do contato na interface laje-viga. Esses elementos são capazes de simular a existência de pressão entre os elementos, quando há contato, e a separação entre os mesmos elementos, quando não há contato, ou seja, quando o contato laje-viga é estabelecido, surgem tensões normais de compressão que possibilitam a separação entre os elementos. O par de contato ainda permite a consideração de atrito e coesão entre as partes.

3.3 Propriedades dos materiais

Quadro 1 – Características das vigas e propriedades dos materiais

VIGA	Modelo A3
Tipo de carregamento	Concentrado no meio do vão
Número de conectores	68
Diâmetro do corpo do conector (mm)	16 / 19 / 22
Altura total do conector (mm)	76 / 88 / 102
f_{cm} cilíndrico (kN/cm²)	1,84
E_{cm} (kN/cm²)	2.642
E (kN/cm²)	Alma 19.456 Mesa 20.064
f_y (kN/cm²)	Alma 30,2 Mesa 25,2
f_u (kN/cm²)	Alma 44,4 Mesa 44,7
E (kN/cm²)	Conectores 20.500
f_u (kN/cm²)	51,4
f_v (kN/cm²)	42,1
E (kN/cm²)	Armadura 20.500
f_v (kN/cm²)	32,0

Para validar o modelo computacional implementado no presente trabalho, foram consideradas as características das vigas e propriedades dos materiais (quadro 1) utilizadas no trabalho de Chapman e Balakrishnan (1964), que desenvolveram ensaios experimentais com várias vigas mistas. Dentro as vigas ensaiadas, adotou-se uma delas, a de designação “A3”, considerando um carregamento decorrente do peso próprio e uma carga externa concentrada no meio do vão. Este exemplo foi também o escolhido e simulado numericamente por Kotinda (2006).

O presente trabalho procurou também verificar a influência dos conectores de cisalhamento nas vigas mistas, além da modelagem das condições originais da viga “A3”. Assim, foram consideradas diversas alternativas conectores, variando os seus diâmetros de 16, 19 e 22 mm e alturas de 76 mm, 88 mm e 102 mm. Nos modelo A3 de Chapman e Balakrishnan (1964) os conectores eram de 19 mm e o diâmetro de 102 mm de altura.

3.4 Relações constitutivas

A simulação do comportamento estrutural do aço do perfil foi feita por meio de uma relação elasto-plástica multilinear com encruamento isótropo, associada ao critério de plastificação de von Mises. A curva tensão-deformação segue o modelo constitutivo apresentado por Gattesco (1999), conforme ilustra a figura 2.

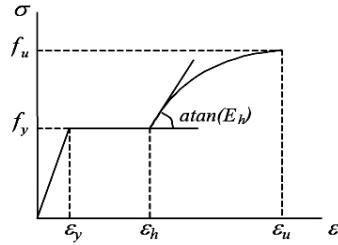


Figura 2 – Relação constitutiva para o perfil de aço (dados de GATTESCO, 1999)

O modelo adotado para o aço dos conectores é do tipo bi-linear com encruamento isótropo, também associado ao critério de plastificação de von Mises. A figura 3 mostra o diagrama tensão-deformação para o aço dos conectores.

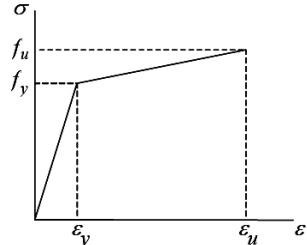


Figura 3 – Relação constitutiva para os conectores de cisalhamento (dados de KOTINDA, 2006)

A relação constitutiva para o aço da armadura segue um modelo elasto-plástico perfeito e também está associada ao critério de plastificação de von Mises, com base na relação entre as tensões uniaxiais e suas respectivas deformações plásticas equivalentes, conforme indica o diagrama de tensão-deformação apresentado na figura 4.

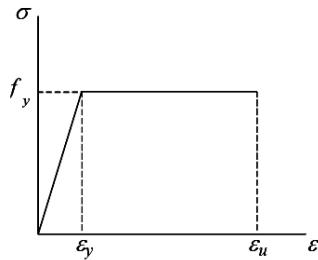


Figura 4 – Relação constitutiva para o aço da armadura (dados de KOTINDA, 2006)

Para a laje de concreto a relação constitutiva na tração segue o modelo CONCRETE, disponibilizado pelo ANSYS, que tem como base o modelo de Willan-Warnke e permite simular a fissuração do concreto. Já, para o concreto na compressão, admitiu-se o critério de plastificação de von Mises. O modelo que representa o comportamento do concreto, neste caso, é multilinear com encruamento isótropo, apresentado pelo diagrama de tensão-deformação na figura 5.

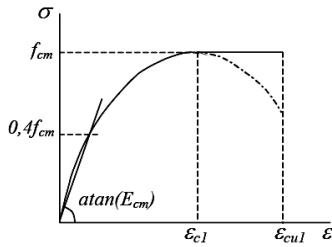


Figura 5 – Relação constitutiva para o concreto (dados de KOTINDA, 2006)

Na solução para o contato utilizou-se o método “Pure Lagrange Multiplier”, disponibilizado pelo ANSYS. Esse método, de acordo com Kotinda (2006), impõe penetração nula quando existe o contato entre as partes, ou seja, quando o contato está fechado e escorregamento nulo, enquanto não se atinge a tensão cisalhante limite. Os parâmetros que definem se o contato está fechado ou aberto são estabelecidos por FTOLN, que se refere a um valor mínimo de penetração para que o contato seja considerado como fechado e por TNOP, que se refere a uma valor mínimo de tração, normal à superfície de contato, para que o status se altere para aberto. O valor absoluto adotado para o FTOLN foi de -0,01 cm. Já para o TNOP adotou-se 0,18 kN/cm². Já o valor estabelecido para o coeficiente de atrito entre aço e concreto foi 0,4 e, para a coesão, foi estimado um valor de 0,18 kN/cm² a partir de valores médios de tensão de adesão correspondentes ao surgimento de escorregamento na interface.

3.5 Malha de elementos finitos

Os modelos construídos para a análise numérica são constituídos por quatro elementos que formam a laje de concreto com armaduras incluídas sob a forma de taxa, a viga de aço, os conectores de cisalhamento e o par de contato na interface laje-viga. Os elementos foram construídos separadamente, porém os nós de cada um foram acoplados na interface entre eles. A figura 6 mostra a malha de elementos finitos para os componentes citados, onde a letra (a) corresponde à laje de concreto, a (b) a viga de aço, a (c) os conectores de cisalhamento e a (d) o par de contato.

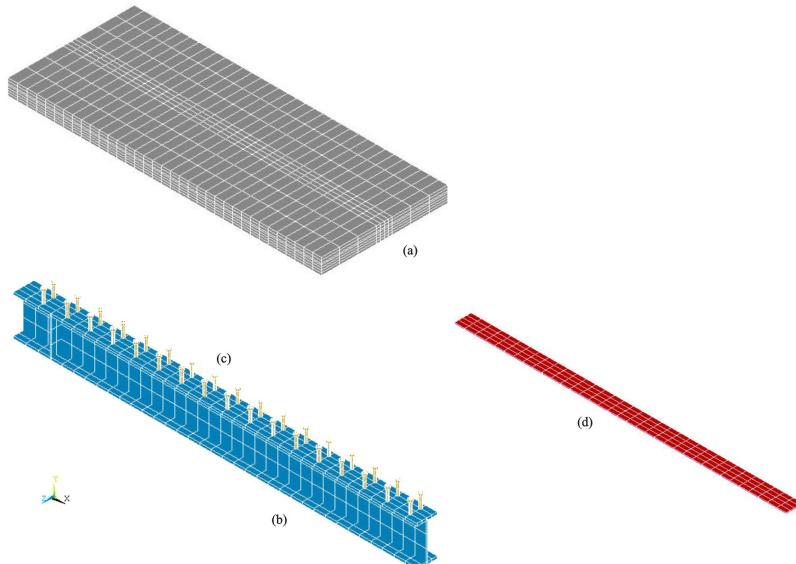


Figura 6 – Malha de elementos finitos

3.6 Acoplamento e vinculações

Nos acoplamentos entre os elementos, realizados através dos nós coincidentes, todos os graus de liberdade foram compatibilizados, conforme ilustra a figura 7.

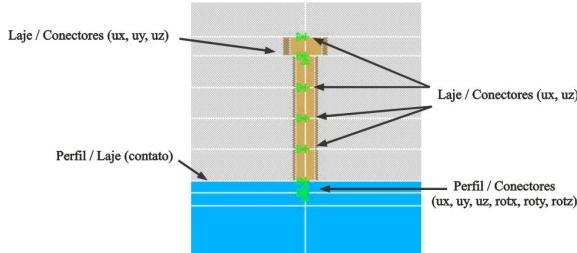


Figura 7 – Acoplamento entre os elementos

O contato laje-viga foi estabelecido pelos elementos CONTA 173, ligado a mesa do perfil e TARGE 170, ligado a face inferior da laje. A vinculação viga-conector foi considerada como um engastamento do pino no perfil metálico, ou seja, rotações e translações foram compatibilizadas. Já na interface laje-conector, compatibilizaram-se as translações referentes aos eixos x e z e, no nó abaixo da cabeça do pino, considerou-se um acoplamento na direção y para a representação da ancoragem mecânica existente.

Com objetivo de reproduzir um apoio do tipo móvel, os graus de liberdade referentes à translação em x e rotação em z não foram restringidos nos nós referentes ao apoio da viga mista. Já nos nós da seção central da viga mista foi aplicada a condição de simetria, disponibilizada pelo ANSYS e consequente restrição dos graus de liberdade. Na figura 8 é mostrada a condição de simetria, a vinculação do apoio da viga mista no detalhe e, ainda, o acoplamento entre os materiais.

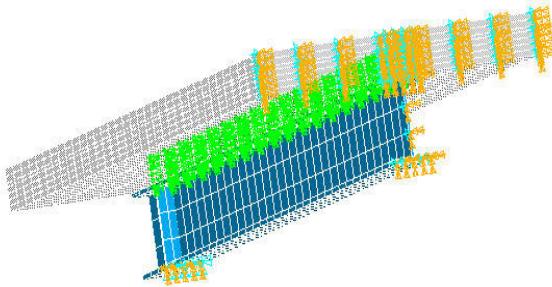


Figura 8 – Condicão de simetria, vinculação no apoio e acoplamento dos materiais

3.7 Carregamento

A aplicação do carregamento em vigas mistas pode ocorrer de duas formas, dependendo no método construtivo das mesmas, que pode ser: (i) sem escoramento; (ii) com escoramento. Na primeira alternativa, o perfil metálico suporta o seu peso próprio e do concreto recém lançado na mesa, sem que, no início, haja o trabalho conjunto entre os dois materiais. O comportamento como viga mista ocorrerá somente depois da cura do concreto, quando se atingir a resistência prevista em projeto. Ao iniciar o trabalho como viga mista, a estrutura já está deformada. No segundo caso, o conjunto só entra em funcionamento depois da retirada do escoramento, fato que pode ocorrer somente depois da cura do concreto. Neste caso, não existirá deformação inicial. O modelo desenvolvido no presente trabalho foi o de viga escorada. Os pesos específicos dos materiais foram: concreto - 24 kN/m³ e aço da viga, conectores e armadura, 77 kN/m³. O carregamento externo foi aplicado de modo crescente e monotônico, imediatamente após a atuação do peso próprio da viga mista. Embora concentrado no meio do vão, o carregamento foi tratado como distribuído em uma pequena área, aplicada nos nós pertencentes à face superior da laje de concreto, de forma centralizada em relação ao eixo da viga, para ficar de acordo com o modelo experimental desenvolvido por Chapman e Balakrishnan (1964). O

carregamento foi aplicado de forma incremental para levar em consideração o comportamento não linear dos materiais que compõe a viga mista.

4 RESULTADOS

Na figura 9 visualizam-se os resultados do deslocamento vertical no meio do vão com a evolução da carga aplicada, obtidos neste trabalho e nos de Chapman e Balakrishnan (1964) e de Kotinda (2006).

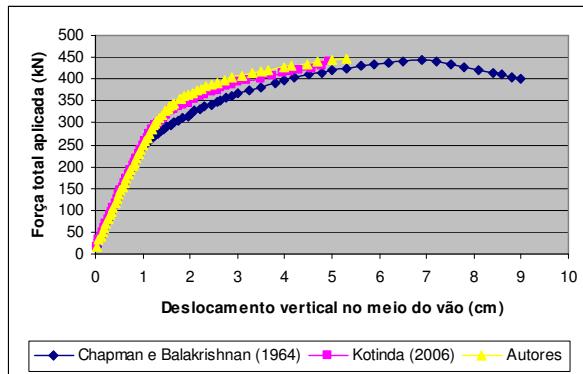


Figura 9 – Gráfico força x deslocamento vertical no meio do vão

Nos quadros 2, 3 e 4 é possível verificar os resultados obtidos. O quadro 2 se refere aos conectores com 16 mm de diâmetro, o quadro 3 mostra resultados para conectores com 19 mm de diâmetro e o quadro 4 apresenta os resultados para os conectores com diâmetro igual a 22 mm.

Nas figuras 10, 11 e 12 estão apresentados os gráficos com a evolução dos deslocamentos verticais no meio do vão (a) e dos deslizamentos horizontais relativos (entre laje e perfil metálico) médios na extremidade da viga mista (b), com a força total aplicada no sistema misto, utilizando-se conectores com 16 mm, 19 mm e 22 mm de diâmetro, respectivamente.

Quadro 2 – Resultados das vigas com conectores de 16 mm de diâmetro

VIGA COM CONECTORES DE 16 MM DE DIÂMETRO		
Altura dos conectores (mm)	76	88
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	17,16
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	2,23	5,24
Deslizamento horizontal relativo médio na extremidade da viga (cm)	0,0040	0,0167
Força vertical total aplicada (kN)	377,32	443,78

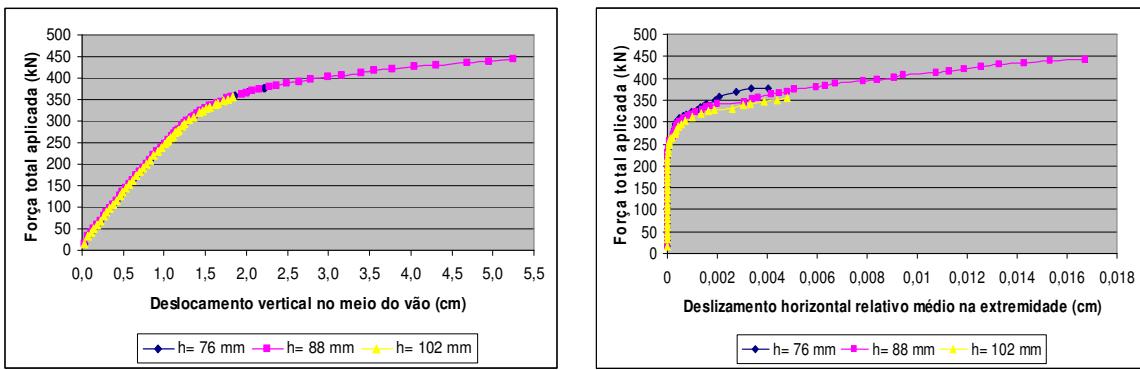
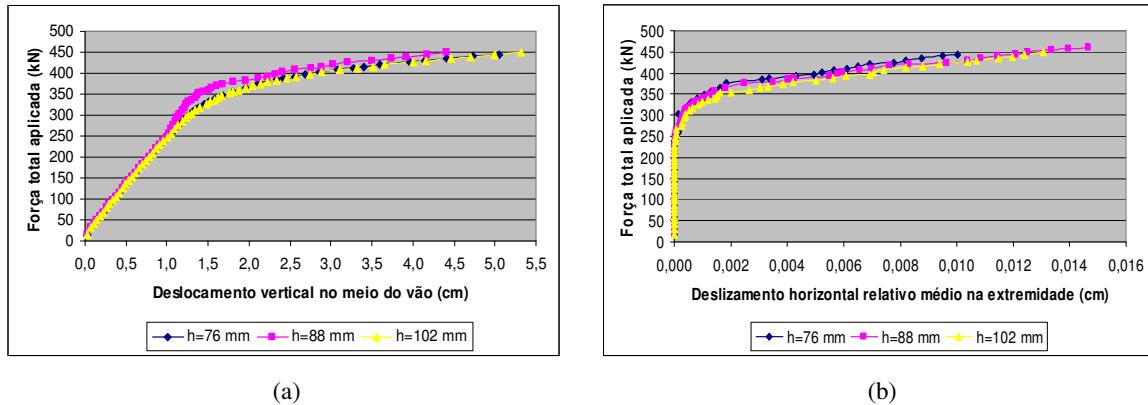


Figura 10 – Gráficos força x deslocamento (a) e força x deslizamento (b) para conectores com 16 mm de diâmetro

Quadro 3 – Resultados das vigas com conectores de 19 mm de diâmetro

VIGA COM CONECTORES DE 19 MM DE DIÂMETRO			
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	17,16	17,16
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,05	6,49	5,32
Deslizamento horizontal relativo médio na extremidade da viga (cm)	0,0100	0,0147	0,0131
Força vertical total aplicada (kN)	444,32	460,50	448,64



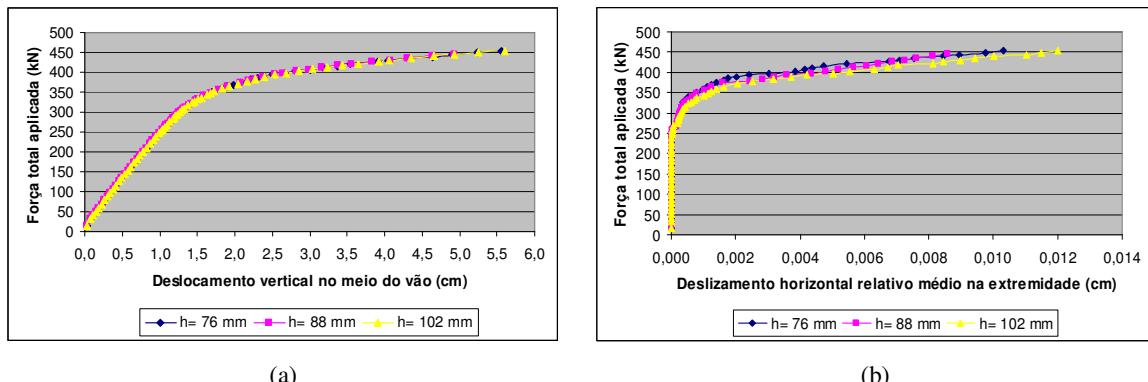
(a)

(b)

Figura 11 – Gráficos força x deslocamento (a) e força x deslizamento (b) para conectores com 19 mm de diâmetro

Quadro 4 – Resultados das vigas com conectores de 22 mm de diâmetro

VIGA COM CONECTORES DE 22 MM DE DIÂMETRO			
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	17,16	17,16
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,57	4,94	5,61
Deslizamento horizontal relativo médio na extremidade da viga (cm)	0,0103	0,0086	0,0120
Força vertical total aplicada (kN)	453,18	444,92	453,76



(a)

(b)

Figura 12 – Gráficos força x deslocamento (a) e força x deslizamento (b) para conectores com 22 mm de diâmetro

5 DISCUSSÃO

Neste trabalho verificou-se que no regime elástico a resposta da viga mista é semelhante para quaisquer tipos de conectores, independentemente do diâmetro e altura. No entanto, no regime não

linear, esses parâmetros afetam o comportamento da estrutura de diferentes modos, conforme observações abaixo relacionadas, no limite de carregamento:

- a) Influência da altura do conector (H) na carga limite (F_{max}), deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}) e deslizamento (d_{max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga (quadro 5):

Quadro 5 – Síntese dos resultados considerando a influência as variações de \emptyset e de H

Parâmetro	\emptyset (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)	d_{max} (cm)
$H = 76\text{ mm}$	16	377,32	2,23	0,0040
	19	444,32	5,05	0,0100
	22	453,18	5,57	0,0103
$H = 88\text{ mm}$	16	443,78	5,24	0,0167
	19	460,50	6,49	0,0147
	22	444,92	4,94	0,0086
$H = 102\text{ mm}$	16	354,52	1,84	0,0048
	19	448,64	5,32	0,0131
	22	453,76	5,61	0,0120

Percebe-se através do quadro 5 que o carregamento máximo ocorre para o conector com $H=88\text{ mm}$ e $\emptyset = 19\text{ mm}$. Essa solução foi também a que apresentou o maior deslocamento vertical, o que sugere um comportamento mais dúctil. Ainda observa-se que o aumento da altura do conector não necessariamente incrementa a carga limite. A questão do deslizamento, por outro lado, não apresenta necessariamente o mesmo comportamento, conforme se depreende no quadro 5, onde o maior deslizamento corresponde ao conector com $H=88\text{ mm}$ e $\emptyset = 16\text{ mm}$.

- b) Influência do diâmetro do conector (\emptyset) na carga limite (F_{max}), deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}) e deslizamento (d_{max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade do vão (quadro 6):

Quadro 6 – Síntese dos resultados considerando a influência as variações de \emptyset e de H

Parâmetro	H (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)	d_{max} (cm)
$\emptyset = 16\text{ mm}$	76	377,32	2,23	0,0040
	88	443,78	5,24	0,0167
	102	354,52	1,84	0,0048
$\emptyset = 19\text{ mm}$	76	444,32	5,05	0,0100
	88	460,50	6,49	0,0147
	102	448,64	5,32	0,0131
$\emptyset = 22\text{ mm}$	76	453,18	5,57	0,0103
	88	444,92	4,94	0,0086
	102	453,76	5,61	0,0120

Nota-se no quadro 6 que o carregamento máximo ocorre para o conector com $H=88\text{ mm}$ e $\emptyset = 19\text{ mm}$. Essa solução ainda sugere um comportamento mais dúctil que as demais, por apresentar o maior deslocamento vertical no meio do vão. Percebe-se também que o aumento do diâmetro do conector não necessariamente incrementa a carga limite. Já o deslizamento não apresenta necessariamente o mesmo comportamento, pois o maior valor encontrado para o mesmo corresponde ao conector com $H=88\text{ mm}$ e $\emptyset = 16\text{ mm}$.

Segundo Chapman (1964), as forças de afastamento (*uplift*) que surgem no contato laje-perfil, podem provocar o arrancamento dos conectores de cisalhamento da laje de concreto. Dessa forma, para

garantir a ancoragem dos conectores, o Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003) recomenda que altura do conector tipo pino com cabeça, após a soldagem, seja igual ou superior a quatro vezes o diâmetro do corpo do mesmo. Apesar desta recomendação, adotaram-se, neste trabalho, para fins de comparação com os outros conectores utilizados, conectores de 22 mm de diâmetro e 76 mm de altura, que é inferior ao valor de quatro vezes o diâmetro citado.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou que o diâmetro e altura dos conectores de cisalhamento não afetam os resultados de vigas mistas, no regime elástico.

No entanto, no regime não linear, no limite de carregamento, esses parâmetros são afetados de diferentes modos, notando-se, em geral, que, com o aumento do diâmetro do conector, aumenta-se a força máxima suportada pela viga mista, porém a rigidez da mesma diminui.

Comprovou-se, ainda, pelos resultados obtidos, que a modelagem computacional representa de forma satisfatória o comportamento das vigas mistas, quando comparada com resultados experimentais, de Chapman e Balakrishnan (1964), e o modelo numérico de Kotinda (2006). Percebe-se ainda que, para os exemplos estudados, a solução de conector com altura inferior a quatro vezes seu diâmetro (portanto, não respeitando as exigências de norma), teve comportamento semelhante aos demais casos analisados. A análise de novos modelos poderáclarear a questão.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de Revisão da NBR 8800: projeto e execução de estruturas de aço de edifícios.** Rio de Janeiro, 2003, em andamento.
- ALVA, G. M. S.; MALITE, M. **Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto.** Publicação Interna: Cadernos de Engenharia de Estruturas. Vol. 7, n. 25, p. 51-84. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
- CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço. **Características do sistema construtivo em aço.** Disponível em: <<http://www.cbca-ibs.org.br/caracteristicas.asp>>. Acesso em: 10 junho 2007.
- CHAPMAN, J. C. Composite construction in steel and concrete – the behaviour of composite beams. **The Structural Engineer**, v. 4, p. 115–125, 1964.
- CHAPMAN, J. C.; BALAKRISHNAN, S. Experiments on composite beams. **The Structural Engineer**, v. 42, p. 369–383, 1964.
- DAVID, D. L. **Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas.** Tese. 250 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- GATTESCO, N. Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 52, p. 195-218, 1999.
- KIRCHHOF, L. D. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio.** Dissertação. 143p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga.** Dissertação. 116 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.