ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE LIGAÇÕES VIGA MISTA-PILAR COM CANTONEIRAS DE ALMA E ASSENTO – PAVIMENTO TIPO E LIGAÇÕES ISOLADAS

William Oliveira Bessa¹ & Roberto Martins Gonçalves²

Resumo

Este trabalho apresenta um amplo programa experimental de ligações viga mista-pilar com cantoneiras de alma e assento, incluindo protótipos isolados e ligações inseridas num pavimento tipo de laje pré-moldada com vigotas e lajotas cerâmicas. Os objetivos do trabalho foram avaliar os efeitos da fissuração da laje no comportamento da ligação (rigidez inicial e momento resistente), a influência da variação da taxa de armadura secundária da laje e a eficiência dos detalhes propostos para a ancoragem das armaduras longitudinais.Nos ensaios experimentais, foram analisadas as rotações das ligações, deslocamentos e deformações nos elementos. Para a análise teórica, tomou-se como base o Método das Componentes do EUROCODE 3 e 4. Paralelamente, um estudo numérico via MEF foi desenvolvido com o objetivo de considerar a laje de concreto e as armaduras longitudinais e transversais. De acordo com os resultados, a condição prévia de fissuração da laje mostrou-se menos relevante que a continuidade das vigas na direção do eixo de menor inércia do pilar, no que se refere à determinação da rigidez inicial e resistência das ligações mista inseridas num pavimento tipo. A metodologia de modelagem numérica representou satisfatoriamente os mecanismos plásticos e os estados limites últimos da ligação.

Palavras-chave: Ligações mistas. Pavimento tipo. Cantoneiras de alma e assento.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF BEAM-TO-COLUMN COMPOSITE CONNECTIONS WITH BOTTOM AND WEB ANGLE – TYPICAL FLOOR AND ISOLATED PROTOTYPES

Abstract

This research presents an extensive experimental study of the structural behavior of the beam-to-column composite connections with bottom and web angle, including isolated prototypes and typical floor with slab made of precast joist with lattice and bricks. The objectives were to evaluate concrete slab cracking effects in the composite connections behavior (initial stiffness and resistant moment), the secondary steel ratio increase and the proposed details for the longitudinal steel bars anchorage. In the experimental tests, it was analyzed the connection total rotation, the displacements and deformations in the connection components. The theoretical study was developed based on EURODODE 3 and 4 methodologies. Besides, a numerical study was developed with the purpose of including the concrete slab modeling, the longitudinal and transversal steel bars. The geometrical and material non-linearity it was considerate in the numerical analysis. According to the results, the beam continuity through to the column minor axis showed to be more important than the concrete slab previous cracking, for the initial stiffness and resistant moment composite connections behavior in the typical floor. The numerical models represented satisfactorily the plastic mechanism connection and the ultimate limit states.

Keywords: Composite connections. Typical floor. Botton and web angle.

¹ Doutor em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, willbessa@gmail.com.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, goncalve@sc.usp.br

1 INTRODUÇÃO

As estruturas mistas, tal como as estruturas metálicas, têm seu comportamento global fortemente influenciado pelo tipo de ligação entre vigas e pilares. Esta influência é ainda mais relevante devido à grande variedade de configurações e dispositivos que podem ser utilizados, introduzindo, dessa forma, descontinuidades geométricas que, associadas a não linearidade dos materiais, propicia o comportamento não linear da estrutura como um todo.

As vigas de aço ligadas por conectores de cisalhamento à laje de concreto (vigas mistas) vêm ocupando cada vez mais espaço no mercado. Estes elementos possuem grande capacidade de resistir a momentos positivos, possibilitando a concepção de projetos com vãos maiores, menor número de pilares e uma melhor relação custo/benefício.

No que diz respeito às ligações mistas, de maneira geral podemos dizer que são mais rígidas e resistentes se comparadas com a mesma em aço (mesmos perfis sem a consideração da armadura longitudinal da laje na resistência da ligação), com uma capacidade rotacional compatível. Dessa forma, a participação da laje na concepção de pórticos metálicos visa um melhor equilíbrio entre economia e eficiência estrutural.

Alguns estudos realizados nas últimas décadas tiveram como objetivo a caracterização das ligações mistas semi rígidas e a sua influência no comportamento global das estruturas (AHMED; NETHERCOT, 1997), (NETHERCOT et. al., 1995), (NETHERCOT, 2000). No entanto, em grande parte destes trabalhos as ligações foram caracterizadas de forma isolada, sem levar em consideração sua continuidade na estrutura. Recentemente, WAN, 2007 realizou um estudo de ligações com chapa de topo inseridas num pórtico semi rígido considerando a largura efetiva da viga mista.

Diante do contexto resumidamente descrito acima, o presente trabalho teve como principais objetivos:

• Investigação do comportamento da ligação viga mista-pilar com cantoneiras de alma e assento, em estado limite último e de utilização, considerando as ligações mistas inseridas em um pavimento tipo (continuidade das lajes e vigas no eixo de menor inércia) e em protótipos isolados;

• Avaliação do comportamento das ligações mistas considerando a deterioração da rigidez em função da fissuração da laje para as várias fases de carregamento do pavimento tipo;

• Realização da análise numérica de ligações viga mista-pilar com cantoneiras de alma e assento, submetido a carregamento monotônico, com a consideração da laje de concreto, armaduras longitudinais e transversais, e sem a simetria segundo o plano médio da alma da viga;

• Avaliação da metodologia de dimensionamento apresentada pelas normas europeias EUROCODE 3, 2005, e EUROCODE 4, 2004 para determinação da rigidez inicial e momento resistente de ligações com cantoneiras de alma e assento;

2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (SET-EESC), constituído de protótipos que representam 04 (quatro) modelos de ligações isoladas – 02 (dois) modelos cruciformes (pilar de centro) e 02 (dois) de pilar de borda (configuração denominada de "T"), além de um pavimento tipo constituído de duas vigas principais, vigas secundárias e contraventamento no topo dos pilares.

A Figura 1 a seguir ilustra as características geométricas dos modelos isolados e a Tabela 1 apresenta a descrição resumida das taxas de armadura das lajes dos protótipos experimentais.



a) Isolado "T".

b) Isolado cruciforme.

Figura 1 – Características geométricas dos modelos isolados.

Protótipo	Tipo de ligação	Taxa de arm. longitudinal	Taxa de arm. transversal
TNRSS ³	Pilar de borda ("T")	1%	0,2%
TRSS⁴	Pilar de borda ("T")	1%	1%
CNRSS⁵	Pilar central (cruciforme)	1%	0,2%
CRSS ⁶	Pilar central (cruciforme)	1%	1%
Pav. Tipo	Todas as configurações	1%	1%

Tabela 1: Descrição resumida dos protótipos experimentais

O detalhamento das armaduras longitudinais e transversais está indicado na Figura 2 para os protótipos TNRSS e TRSS (isolados de pilar de borda). A mesma disposição de armaduras foi seguida no detalhamento dos modelos isolados cruciformes e no pavimento tipo.

Todos os protótipos foram constituídos de vigas mistas com perfis laminados W 200 x 26,6 Kg/m para a viga principal (conectadas na mesa do pilar) e W 150 x 13 Kg/m para a viga secundária (conectadas na alma) e conectores de cisalhamento do tipo U. Para os pilares foi adotado o perfil laminado HP 200 x 53 Kg/m. A viga principal foi conectada no pilar através de cantoneiras de alma (L3"x3"x1/2") e assento (L4"x4"x5/16"), enquanto que a viga secundária foi conectada por uma chapa de alma soldada a outra chapa que tem a função de enrijecer as mesas do pilar, constituindo-se então numa ligação rotulada.

A ligação da viga principal no pilar foi feita por parafusos ASTM A325 com diâmetro de 19 mm e as ligações secundárias por parafusos de 16 mm. A laje de concreto armado foi constituída de vigotas pré-moldadas e lajotas cerâmicas, técnica construtiva de laje pré-moldada amplamente empregada no Brasil, com a espessura final de 12 cm.

³ TNRSS – T No Reinforced Secundary Steel

⁴ TRSS – T Reinforced Secundary Steel

⁵ CNRSS – Cruciform No Reinforced Secundary Steel

⁶ CRSS – Cruciform Reinforced Secundary Steel

William Oliveira Bessa & Roberto Martins Gonçalves



Figura 2 – Detalhamento das armaduras para os protótipos isolados de pilar de canto e seção transversal da viga mista (cm).

A Figura 3 ilustra os protótipos isolados CRSS e TRSS após a montagem, com todos os dispositivos de ensaio conectados. Nos protótipos isolados "T" o topo do pilar foi enrijecido por meio de uma diagonal parafusada junto viga base, com o objetivo de restringir os deslocamentos do mesmo durante o carregamento.



Figura 3 – Visão geral dos protótipos isolados CRSS e TRSS.

O pavimento tipo ensaiado foi projetado com aproximadamente 33m² de área da laje, composto de dois pórticos interligados por uma laje mista, um dos pórticos constituído por pilares de canto e de borda, e o outro, um pórtico interno da estrutura, com a consideração da largura efetiva da viga mista.

A Figura 4 apresenta o pavimento tipo em planta, com a respectiva numeração de cada ligação analisada, que será utilizada como identificação das mesmas no decorrer deste trabalho. Da mesma forma que os protótipos isolados TRSS e CRSS, a taxa de armadura longitudinal e transversal da laje em todas as ligações do pavimento tipo foi de 1%. Os perfis da viga principal, secundária, cantoneiras

e o pilar, bem com o detalhe da ligação das vigas principais nos pilares foram os mesmo dos modelos isolados.



Figura 4 – Esquema do pavimento tipo ensaiado em planta (mm).

O carregamento no pavimento tipo foi constituído de duas etapas distintas: carregamento distribuído e concentrado.

<u>1) Carregamento distribuído</u> - composto de oito fases com o objetivo de solicitar a laje e observar a formação de fissuras dentro do estado limite de utilização, principalmente nas regiões próximas das ligações. Cada fase de carregamento foi estabelecida a partir do valor da sobrecarga nas áreas A, B e C da laje indicadas na Figura 5.

B	Carregamento \ Área	A (kgf/m ²)	B (kgf/m ²)	C (kgf/m ²)
	Fase 1	128,0	0	0
	Fase 2	208,0	0	0
	Fase 3	208,0	160,0	0
	Fase 4	208,0	0	107,0
(A) (C)	Fase 5	208,0	240,0	107,0
	Fase 6	288,0	360,0	114,0
	Fase 7	384,0	0	114,0
	Fase 8	427,0	0	0

Figura 5 – Resumo da etapa de carregamento distribuído na laje no pavimento tipo.

<u>2) Carregamento concentrado</u> – constituído de 09 (nove) fases distintas em função da posição do carregamento na laje e nas vigas principais do pavimento tipo (Tabela 2). O objetivo desta etapa de carregamento foi avaliar o comportamento momento-rotação (M- θ) das ligações do pavimento tipo.







A Figura 6 indicada abaixo ilustra a fase 8 das etapas de carregamento distribuído e concentrado no pavimento tipo.



a) Carregamento distribuído: Fase 8.
b) Carregamento concentrado: Fase 8.
Figura 6 – Etapas de carregamento distribuído e concentrado do pavimento tipo.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

Os modelos numéricos foram desenvolvidos por meio do software comercial ANSYS de modelagem numérica, utilizando a ferramenta do Método dos Elementos Finitos, e um software específico para o pré-processamento dos modelos, denominado de TRUEGRID, que permite ganhos significativos de produtividade e precisão na fase de construção da malha.

A metodologia de modelagem numérica adotada neste trabalho consiste no aperfeiçoamento das ferramentas desenvolvidas em trabalhos anteriores do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP (MAGGI, 2004), (TRISTÃO, 2006) e (BESSA et. al., 2008). Dessa forma, foram adotados diagramas multilineares para a representação do comportamento tensão-deformação do aço das chapas e parafusos (Figura 7). Este modelo consiste em segmentos de retas consecutivos que permitem definir o comportamento elástico, a plastificação e o comportamento pós-plastificação do aço, de acordo com os parâmetros fornecidos pelo usuário. Para simulação numérica do deslizamento relativo entre a armadura de aço e a laje de concreto foi utilizado o elemento de mola.





Na discretização da laje de concreto, o modelo constitutivo adotado na compressão foi do tipo multilinear com encruamento isótropo (Figura 8), de acordo com as recomendações do EUROCODE 2, 2003. O modelo constitutivo adotado para a região tracionada da laje foi do tipo linear, com os

valores da resistência última à tração e o módulo de elasticidade obtida a partir de ensaios de caracterização dos corpos de prova de concreto. Esta estratégia apresentou resultados satisfatórios e com uma boa convergência da solução numérica, embora não permita a simular numericamente a fissuração da laje de concreto.



Figura 8 – Modelo constitutivo adotado para o concreto na compressão - Fonte: EUROCODE 2, 2003.

A consideração do comportamento não linear geométrico também se impõe devido à necessidade de se considerar a interação entre os diversos elementos componentes da ligação, através da utilização de elementos finitos especiais com os quais é possível simular o contato entre parafusos, porcas, cantoneiras, pilar, laje de concreto e viga.

A Figura 9 ilustra o modelo numérico da ligação viga mista-pilar do protótipo isolado TRSS ensaiado experimentalmente. Nos modelos cruciformes foi considerada a simetria segundo um plano passando pelo CG da seção do pilar perpendicular a alma, com as devidas condições de contorno. Na figura abaixo foi representada somente uma parte da laje para uma melhor visualização das armaduras longitudinais e conectores de cisalhamento.



Figura 9 – Visão geral da ligação viga mista-pilar do protótipo isolado "T".

As condições de contorno representam as restrições impostas à simulação numérica. Em todos os modelos, nós das faces superior e inferior do pilar foram restringidos nas três direções globais, reproduzindo assim o sistema de travamento dos protótipos. O carregamento foi aplicado em duas etapas: protensão dos parafusos e carregamento na viga (através da aplicação de deslocamento em sua extremidade).

4 **RESULTADOS**

Na comparação dos resultados foram adotadas curvas momento-rotação bi-linear e tri-linear, de acordo com o EUROCODE 3, 2005. As Figuras 10 e 11 apresentam as curvas M- θ para os modelos numéricos e protótipos isolados de pilar de borda, com taxa de armadura secundária da laje de concreto de 0,2% e 1,0%, respectivamente.



Figura 10 – Comportamento M- θ das ligações de pilar de borda com taxa de armadura secundária de 0,2%.



Figura 11 – Comportamento *M*- θ das ligações de pilar de borda com taxa de armadura secundária de 1%.

As Figuras 12 e 13 ilustram as curvas M- θ para as ligações de pilar de centro com taxa de armadura secundária da laje de concreto de 0,2% e 1,0%, respectivamente.

Nas ligações do pavimento tipo, a continuidade da viga na direção do eixo de menor inércia do pilar proporcionou a perfeita ancoragem das armaduras longitudinais da viga mista, e consequentemente um maior momento transmitido para a ligação após a fissuração da laje, comparando os resultados com as respectivas ligações dos modelos isolados.

No entanto, nas ligações dos modelos isolados (TNRSS, TRSS, CNRSS e CRSS) observou-se uma considerável perda de rigidez e resistência da ligação nos estágios iniciais da fissuração da laje. Este resultado pode ser atribuído ao detalhe adotado para a ancoragem das armaduras longitudinais da viga mista junto às vigas secundárias (eixo de menor inércia da ligação). Dessa forma, esta componente responsável pela maior parcela de resistência à tração da laje na ligação ficou prejudicada nos modelos isolados, com a consideração física apenas do trecho de largura efetiva da laje, resultando também num elevado nível de fissuração quando comparado com as respectivas ligações de mesma geometria inseridas no pavimento tipo.







Figura 13 – Curva M- θ total das ligações de pilar de centro com taxa de armadura secundária de 1%.

A síntese dos parâmetros de rigidez inicial e momento resistente das ligações por meio dos estudos experimentais, numéricos e analíticos estão indicados nas Tabelas 3 e 4, para as ligações de pilar de borda e de centro, respectivamente, considerando para o momento resistente o valor do momento máximo na ligação ou o momento equivalente à rotação de 2.260 rad10⁻⁵ e 2.000 rad10⁻⁵ para pilar de borda e centro, respectivamente (rotação equivalente ao momento resistente fornecido pelo modelo tri-linear do EUROCODE 3, 2005).

Ligação	Parâmetro	Experimental (1)	Numérico (2)	Analítico (3)	(1)/(2)	(1)/(3)
TNRSS	M _{rd} (kNm)	46,83	94,62	65,07	0,49	0,72
	S _{j,ini} (kNm/rad)	10.397,6	12.143,83	12.832,4	0,86	0,81
TRSS	M _{rd} (kNm)	45,57	80,68	65,07	0,57	0,70
	S _{j,ini} (kNm/rad)	8.723,2	13.686,79	12.832,4	0,64	0,68
Pav. Tipo [1]	M _{rd} (kNm)	63,93	-	65,07	-	0,98
	S _{j,ini} (kNm/rad)	11.921,62	-	12.832,4	-	0,93
Pav. Tipo [2]	M _{rd} (kNm)	63,93	-	65,07	-	0,98
	S _{j,ini} (kNm/rad)	8.103,65	-	12.832,4	-	0,64

Tabela 3 – Momento resistente e rigidez inicial para as ligações de pilar de borda

A rigidez inicial das Ligações [1] e [2] do pavimento tipo tiveram valores inferiores quando comparado ao valor analítico fornecido pelo EUROCODE 3, 2005. A Ligação [1] apresentou rigidez inicial aproximadamente igual ao modelo isolado TNRSS, mesmo com a fissuração da laje resultante das fases da etapa de carregamento distribuído no pavimento tipo. Por fim, a rigidez inicial da Ligação [2] ficou abaixo da rigidez inicial da Ligação [1] em aproximadamente 36%, efeito este causado pela continuidade de apenas uma viga na direção do eixo de menor inércia do pilar.

Ligação	Parâmetro	Experimental (1)	Numérico (2)	Analítico (3)	(1)/(2)	(1)/(3)
	M _{rd} (kNm)	51,8	80,04	65,07	0,65	0,80
CINKSS	S _{j,ini} (kNm/rad)	12.835,2	14.792,1	15.295,1	0,87	0,84
CRSS	M _{rd} (kNm)	50,93	59,17	65,07	0,86	0,78
	S _{j,ini} (kNm/rad)	5.456,5	13.237,3	15.295,1	0,41	0,37
Pav. Tipo	M _{rd} (kNm)	64,62	-	65,07	-	0,99
[3]	S _{j,ini} (kNm/rad)	15.500,2	-	15.295,1	-	1,01
Pav. Tipo [4]	M _{rd} (kNm)	64,62	-	65,07	-	0,99
	S _{j,ini} (kNm/rad)	9.717,7	-	15.295,1	-	0,64

Tabela 4 – Momento resistente e rigidez inicial para as ligações de pilar de centro

Nas ligações de pilar de centro, a rigidez inicial da Ligação [3] do pavimento tipo foi superior aos respectivos protótipos isolados e praticamente coincidentes quando comparado ao valor analítico obtido de acordo com o EUROCODE 3, 2005.

A rigidez inicial da Ligação [4] do pavimento tipo também foi aproximadamente 36% inferior quando comparado com a Ligação [3], mesma diferença obtida na comparação da rigidez inicial das Ligações [1] e [2].

Os resultados da Tabela 3 e 4 indicam uma menor variação do valor da rigidez inicial das ligações segundo o eixo de maior inércia do pilar inseridas num pavimento tipo (com a continuidade das vigas na direção do eixo de menor inércia do pilar, assim como da laje de concreto e armaduras), em relação às mesmas ligações dos protótipos isolados.

No que diz respeito à fissuração, a análise comparativa apresentada na Tabela 5 indica que a condição prévia de fissuração na laje, resultante da etapa de carregamento distribuído, foi mais significativa na determinação da rigidez inicial das Ligações [2] e [4] do pavimento tipo, em relação às Ligações [1] e [3], tomando como referência os resultados obtidos de acordo com a metodologia proposta pelo EUROCODE 3, 2005.

Tabela 5 – Comparação da rigidez inicial das ligações do Pav. Tipo e segundo o Método das Componentes do EUROCODE 3, 2005

Ligação	Pav. Tipo [1]	Pav. Tipo [2]	Pav. Tipo [3]	Pav. Tipo [4]
S _{j,ini} (kNm/rad)	11.921,7	8.103,7	15.500,2	9.717,7
S _{j,ini} (kNm/rad) EUROCODE 3 (2005)	12.832,4	12.832,4	15.295,1	15.295,1
S _{j,ini} /S _{j,ini} (EC3)	0,93	0,63	1,01	0,64

Outro aspecto importante que diz respeito ao comportamento das ligações inseridas no pavimento tipo, está relacionado com a perda de rigidez e da resistência da ligação após a ruptura pela fissuração da laje, que foi bem menor nas ligações do pavimento tipo, quando comparado aos

respectivos protótipos isolados, conforme os resultados indicados nas Tabelas 6 e 7 para as ligações de pilar de borda e de centro, respectivamente.

Os resultados apontam que a perda de resistência e rigidez após a ruptura por fissuração da laje foi praticamente uniforme para todas as ligações do pavimento tipo, independentemente de sua geometria. Na comparação com as ligações dos protótipos isolados, a perda de rigidez da ligação após a ruptura por fissuração foi em média de duas a três vezes maiores que as mesmas ligações inseridas no pavimento tipo. A Figura 14 ilustra a fissuração da laje para as Ligações [1] e [3] do pavimento tipo após a etapa de carregamento concentrado, e as respectivas ligações dos protótipos isolados (TRSS e CNRSS) ao término do ensaio.

Tabela 6 – Perda da rigidez devido à fissuração da laje nas ligações dos protótipos isolados de pilar borda e a respectivas ligações do Pav. Tipo

Ligação	Pav. Tipo [1]	Pav. Tipo [2]	TNRSS	TRSS
S _{j,ini} (kNm/rad)	11.921,7	8.103,7	10.397,6	8.723,2
S _j (kNm/rad)	4.999,0	3.943,1	1.365,2	1.185,5
S _{i,ini} /S _i	2,38	2,06	7,62	7,36

Tabela 7 – Perda da rigidez devido à fissuração da laje nas ligações dos protótipos isolados de pilar centro e a respectivas ligações do Pav. Tipo

Ligação	Pav. Tipo [3]	Pav. Tipo [4]	CNRSS	CRSS
S _{j,ini} (kNm/rad)	15.500,2	9.717,7	12.835,2	5.456,5
S _j (kNm/rad)	4.855,0	3.994,1	1.961,1	880,4
S _{j,ini} /S _j	3,19	2,43	6,54	6,20



a) Fissuração da laje no protótipo TRSS



c) Fissuração da laje no protótipo CRSS



b) Fissuração da laje na Ligação [1] do Pav. Tipo.



d) Fissuração da laje na Ligação [3] do Pav. Tipo.

Figura 14 – Fissuração da laje nas ligações do pavimento tipo e modelos isolados.

Por fim, no que diz respeito à classificação das ligações, de acordo com o EUROCODE 3, 2005, todas ligações ensaiadas podem ser consideradas semi-rígidas e de resistência parcial, conforme ilustram as Figuras 15 e 16, para ligações de pilar de borda e centro, respectivamente, considerando vão da viga de 5m (pavimento tipo) e sistema contraventado.



Figura 15 – Classificação de acordo com o EUROCODE 3, 2005 para as Ligações [1] e [2] do pavimento tipo e protótipos isolados de pilar de borda.



Figura 16 – Classificação de acordo com o EUROCODE 3, 2005 para as Ligações [3] e [4] do pavimento tipo e protótipos isolados de pilar de centro.

5 CONCLUSÕES

A proposta inicial deste trabalho teve como principal objetivo a análise do comportamento das ligações viga mista-pilar com cantoneiras de alma e assento, em estado limite último e de utilização, considerando as ligações inseridas em um pavimento tipo e em protótipos isolados.

No pavimento tipo, várias situações de carregamento foram avaliadas com o objetivo de analisar o comportamento das ligações mistas, em particular a deterioração da rigidez das ligações segundo o eixo de maior inércia dos pilares em função da fissuração da laje.

De maneira geral, a perda de rigidez e resistência das ligações após a ruptura devido à fissuração da laje de concreto foi bem menos significativa nas ligações do pavimento tipo, quando comparado aos respectivos protótipos isolados. Este efeito deve-se à continuidade das vigas na direção do eixo de menor inércia do pilar, possibilitando uma melhor redistribuição dos esforços de tração e ancoragem das armaduras longitudinais da viga mista, de acordo com o detalhe de ancoragem proposto neste trabalho. O acréscimo da taxa de armadura secundária da viga mista (de 0,2% para 1%) mostrou-se

eficiente na distribuição das tensões de tração e, consequentemente na restrição da abertura de fissuras da laje nas regiões próximas da ligação.

No que diz respeito à concepção dos protótipos experimentais, atenção deve ser dada na concepção de modelos isolados de ligações viga mista-pilar de modo a garantir a efetiva ancoragem das armaduras longitudinais, uma vez que neste caso não haverá a parcela de contribuição das vigas secundárias (direção do eixo de menor inércia do pilar) e elementos a estes associados.

Finalmente, recomenda-se novos estudos no que diz respeito aos efeitos da fissuração da laje na rigidez inicial das ligações, através de ensaios com outras geometrias tais como chapa de topo, cantoneiras de alma ou cantoneiras de apoio e ligações soldadas.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos todos os técnicos e funcionários do Laboratório de Engenharia de Estruturas da EESC-USP.

7 REFERÊNCIAS

AHMED, B.; NETHERCOT, D. A. Prediction of initial stiffness and available rotation capacity of major axis composite end plate connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 41, n. 1, p. 31-60, 1997.

BESSA, W.; GONÇALVES, R. M.; CALADO, L.; CASTIGLIONI, C. A. Advanced Numerical Modelling of Composite Steel Concrete Joints. **Anais** 5th EUROSTEEL - European Conference on Steel and Composite Structures. Graz, 03-05 September, 2008.

DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES, Part 1.1: General rules and rules for buildings. **EUROCODE 2** - prEN 1992-1-1 - European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2003.

DESIGN OF STEEL JOINTS, Part 1.8: Design of Joints. **EUROCODE 3** - European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.

DESIGN OF COMPOSITE STEEL AND CONCRETE STRUCTURES – Part1-1: General Rules and Rules for Buildings. **EUROCODE 4** - prEN 1994-1-1 European Commitee for Standartization, Bruxells (final Draft), 2004.

MAGGI, Y. I. Análise do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

NETHERCOT, D. A.; LI, T. Q.; CHOO, B. S. Required Rotations and Moment Redistribution for Composite Frames and Continuous Beams. **Journal of Constructional Research**, v. 35, p. 121-163, 1995.

NETHERCOT, D. A. Frame Structures: Global Performance, Static and Stability Behaviour. General Report. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 55, p. 109-124, 2000.

TRISTÃO, G. A. Análise Teórica e Experimental de Ligações Mista Viga-Pilar de Extremidade com Cantoneiras de Alma e Assento. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

WANG, J. F.; LI, G. Q. Testing of Semi-Rigid Steel-Concrete Composite Frames Subjected to Vertical Loads. **Engineering Structures**. In press, corrected proof, November, 2006.