

Rigidez à flexão em ligações viga-pilar



**Bruna
Catoia¹**



**Roberto Chust
Carvalho²**



**Libânio Miranda
Pinheiro³**



**Marcelo de
Araujo Ferreira⁴**

RESUMO

A principal investigação dentro do estudo do comportamento semi-rígido de ligações típicas viga-pilar, em estruturas de concreto pré-moldado, está relacionada com a busca por um desempenho satisfatório quanto à resistência, à rigidez e à ductilidade. Nessas estruturas, o comportamento semi-rígido das ligações é geralmente negligenciado pelos projetistas, devido à dificuldade em se conhecer o comportamento real das ligações viga-pilar, uma vez que isso implica no conhecimento dos mecanismos internos de deformação presentes na região da ligação, onde existe um comportamento complexo de tensões e de deformações. Entretanto, várias investigações experimentais têm demonstrado que muitas ligações semi-rígidas são capazes de promover a semi-continuidade dos elementos adjacentes, reduzindo significativamente os deslocamentos laterais da estrutura pré-moldada em esqueleto. Com este trabalho, foi possível observar os principais mecanismos de deformação das ligações viga-pilar com armadura de continuidade e, além disso, foi feita uma análise comparativa do comportamento quanto à rigidez à flexão de duas ligações viga-pilar de extremidade. A partir de ensaios experimentais, foi possível determinar a rigidez à flexão para cada ligação estudada e verificar os principais fatores que influenciaram diretamente no comportamento dessas ligações.

PALAVRAS-CHAVE

Concreto pré-moldado. Ligações viga-pilar. Rigidez à flexão. Mecanismos de deformação. Resistência.

¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos, Brasil. bcatoia@sc.usp.br

² Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil. São Carlos, Brasil. chust@power.ufscar.br

³ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos, Brasil. libanio@sc.usp.br

⁴ Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil. Brasil. marcelo-ufscar@uol.com.br

1. INTRODUÇÃO

Segundo a FIB [1], as ligações estruturais interagem fortemente com os elementos adjacentes por elas conectados, de modo que o projeto e o detalhamento de uma ligação são influenciados pelo projeto e detalhamento dos elementos conectados. Portanto, as ligações e os elementos devem ser projetados e detalhados como uma unidade, na qual se tem um fluxo de forças lógico e natural, de modo que as forças que serão resistidas pela ligação poderão ser transferidas pelos elementos e pelos demais sistemas resistentes.

A rigidez de uma ligação não depende apenas da relação momento-rotação, mas também da rigidez relativa entre a da viga conjugada e da ligação. A rigidez relativa governa a quantidade de flexão que a ligação é capaz de transmitir na extremidade de uma viga. Assim, é de grande importância a realização de ensaios de vigas pré-moldadas em conjunto com as suas ligações.

Em geral, os estudos sobre ligações viga-pilar partem de experimentos em ligações isoladas. Tais estudos são importantes para a verificação da capacidade resistente de um determinado mecanismo de transferência de esforços, seja ele por meio de armadura de continuidade passante no pilar, seja por dispositivos soldados (cantoneiras e perfis unidos à viga). Neste artigo, em concordância com o Manual da FIB [1], foram realizados ensaios em vigas juntamente com as ligações selecionadas, por acreditar que os desempenhos estruturais desses componentes estão interligados.

Foram estudados dois tipos de ligações viga-pilar, compostas por armaduras de continuidade, acopladas a diferentes vigas, com o intuito de desenvolver uma análise comparativa quanto às rigidezes à flexão, identificando os principais fatores que influenciaram no comportamento dessas ligações.

2. CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES VIGA-PILAR

Segundo a NBR 9062 [2], as ligações podem ser classificadas, de acordo com o fator de restrição à rotação α_R , em rígidas, semi-rígidas e articuladas, como indicado no Quadro 1.

Quadro 1. Classificação das ligações de acordo com o fator de restrição à rotação. NBR 9062 [2].

<i>Comportamento no apoio</i>	<i>Estruturas contraventadas</i>	<i>Estruturas não contraventadas</i>
Articulado	$\alpha_R \leq 0,15$	$\alpha_R \leq 0,15$
Semi-Rígido	$0,15 < \alpha_R \leq 0,70$	$0,15 < \alpha_R \leq 0,85$
Rígido	$\alpha_R \geq 0,70$	$\alpha_R \geq 0,85$

Conforme essa Norma, o fator de restrição à rotação α_R define a rigidez relativa de cada ligação da extremidade do elemento conectado, sendo calculado com a Eq. (1).

$$\alpha_R = \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot (EI)_{\text{sec}}}{R_{\text{sec}} L_{\text{ef}}}} \quad (1)$$

$(EI)_{\text{sec}}$: Rigidez secante da viga;

L_{ef} : Vão efetivo entre apoios, distância entre centros de giros nos apoios;

R_{sec} : Rigidez secante ao momento fletor da ligação viga-pilar

3. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO EM LIGAÇÕES VIGA-PILAR

A rigidez de uma ligação está relacionada com o momento fletor resistido por ela e a rotação relativa viga-pilar causada por esse momento. Dessa forma, a rigidez de uma ligação pode ser obtida pelo gradiente da curva momento-rotação. Entretanto, para a obtenção da rigidez à flexão de ligações entre elementos pré-moldados, é necessária a realização de ensaios experimentais, pois diferentemente das estruturas de concreto armado, as de concreto pré-moldado não possuem modelos analíticos consagrados pela literatura para obtenção da relação momento-rotação nas ligações viga-pilar. Devido à complexidade do comportamento, é difícil desenvolver equações que representem o comportamento semi-rígido dessas ligações.

De acordo com o PCI [3], que contém resultados de diversos ensaios realizados com vários tipos de ligações, os mecanismos de deformação das ligações viga-pilar com armadura de continuidade podem ser definidos em quatro situações: ligação com armadura de continuidade com capacidade à flexão semelhante à dos elementos conectados; ligação com armadura que atravessa a interface viga-pilar, com capacidade à flexão inferior à da viga conectada; ligação com armadura de cisalhamento insuficiente e, finalmente, viga e consolo com armadura de tirante insuficiente.

No primeiro caso, a ligação irá resistir ao momento fletor e ocorrerá um espalhamento de fissuração na extremidade da viga, ao longo da “região” da ligação, o que se pode chamar de formação de rótula plástica na extremidade da viga. Esse mecanismo é considerado como ideal, pois as fissuras se estendem ao longo de um trecho da viga, não se concentrando apenas na interface viga-pilar.

No segundo caso, a rotação entre a viga e o pilar terá a tendência de se concentrar na ligação, devido à falta de armadura de flexão, e muitas vezes devido a um grauteamento inadequado.

No terceiro caso, ocorrerá fissuração na interface do concreto pré-moldado e do concreto moldado no local, devido à falta de armadura de cisalhamento (estribos) que garanta o trabalho conjunto de ambos.

No quarto caso, ocorrerá um fendilhamento nos cantos do consolo e da viga, devido à falta de armadura de tirante nesses elementos.

De acordo com CHEOK e LEW [4], as ligações que apresentam um mecanismo de deformação com formação da rótula plástica na extremidade da viga possuem maior capacidade de rotação e de dissipação de energia, possuindo ductilidade maior.

Assim, nota-se que o comportamento mecânico de uma ligação está relacionado diretamente à maneira como ela é projetada. No primeiro caso, a ligação é projetada considerando sua capacidade de resistir a momentos fletores, sendo que a rotação na extremidade da viga irá depender da distribuição da curvatura dentro da região plastificada. No segundo caso, pode-se notar que a ligação é projetada com pequenas armaduras que não apresentarão a função de resistir a momentos fletores, sendo a rotação relativa viga-pilar delimitada pela capacidade de alongamento ou de ancoragem das barras tracionadas.

Diversos fatores afetam a rigidez à flexão de uma ligação viga-pilar, como: o processo construtivo; as propriedades dos materiais que compõem uma ligação (principalmente o módulo de elasticidade e a resistência à tração); a geometria dos elementos; os tipos de solicitações a que a viga é submetida e a rigidez da viga conectada.

Sabe-se que uma mesma ligação terá maior capacidade de restrição para vigas menos rígidas do que para vigas com maior rigidez. A análise de uma ligação não deve ser feita apenas para o valor absoluto de sua rigidez, ou da relação momento-rotação, mas também é importante conhecer a relação entre a rigidez da ligação e a da viga por ela vinculada.

Vigas pré-moldadas de concreto armado e de concreto protendido, no Estado Limite Último (ELU), conectadas por ligações semi-rígidas, e até mesmo por ligações rígidas, apresentam redução de rigidez na extremidade, formando uma rótula plástica, o que não ocorre nas vigas articuladas.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram ensaiados três modelos, com o intuito de melhor analisar as rigidezes de ligações viga-pilar, a partir de variações referentes ao tipo de viga empregada e aos elementos constituintes das ligações.

4.1 Modelo 1

O primeiro modelo ensaiado, denominado Modelo 1, foi composto por uma viga pré-moldada protendida simplesmente apoiada.

4.2 Modelo 2

O segundo modelo ensaiado, denominado Modelo 2, foi composto por uma viga protendida, igual à do Modelo 1, porém com a presença de ligação resistente à flexão. Essa ligação (Fig. 1) tinha as seguintes características: armaduras de continuidade inseridas nos pilares de extremidade através de luvas rosqueadas; preenchimento com graute das juntas verticais entre a viga e o pilar; emprego de chumbadores e grauteamento de seus nichos; fixação de uma chapa metálica na junta horizontal (região para o apoio da viga), com o intuito de definir o centro de giro da ligação, sendo a região restante preenchida com graute. Os modelos 1 e 2, que podem ser observados na Fig. 2, foram estudados detalhadamente por CATOIA [5].

Ligação Modelo 2

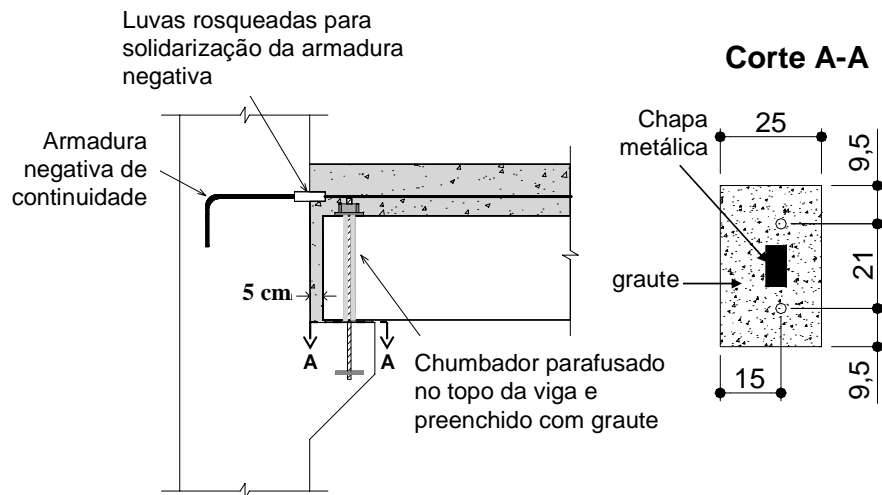


Figura 1. Ligação viga-pilar referente ao Modelo 2.



a) b)
Figura 2. Ensaio: a) Modelo1; b) Modelo 2. CATOIA [5].

4.3 Modelo 3

O terceiro modelo ensaiado, denominado Modelo 3, foi composto por uma viga pré-moldada de concreto armado, com ligação resistente à flexão. Essa ligação (Fig. 3) tinha as seguintes características: armaduras de continuidade inseridas nos pilares de extremidade através de luvas rosqueadas; preenchimento com graute das juntas verticais entre a viga e o pilar; emprego de chumbadores com os nichos sem qualquer preenchimento; emprego, na junta horizontal (região para o apoio da viga), de uma almofada de argamassa reforçada com fibras de polipropileno. O modelo 3, que pode ser observado na Fig. 4, foi estudado detalhadamente por SOUZA [6].

Ligação Modelo 3

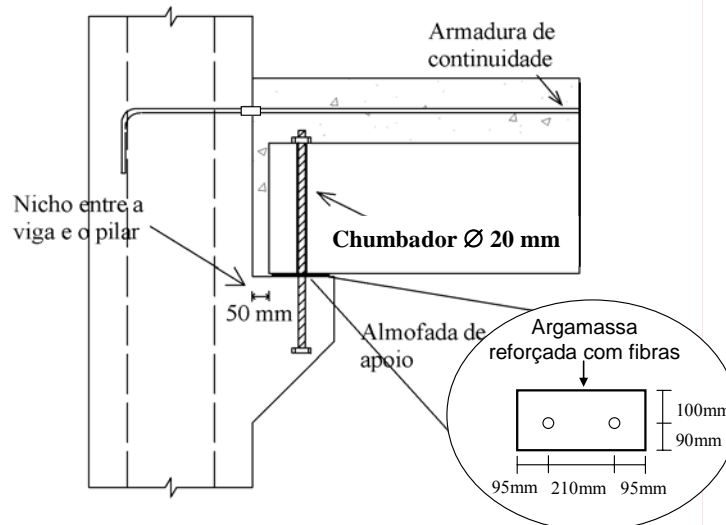


Figura 3. Ligação viga-pilar referente ao Modelo 3.



Figura 4. Ensaio do Modelo 3. SOUZA [6].

Nos ensaios, foram utilizadas pré-vigas com altura de 400mm, com a presença de estribos acima da seção concretada. Nos modelos 2 e 3, as armaduras de continuidade foram fixadas aos pilares através de luvas rosqueadas. Em seguida foi executado o preenchimento das seções transversais das vigas, com concreto moldado no local, o que garantiu a solidarização das ligações de extremidade. Dessa forma, as vigas tiveram uma altura final de 600mm, comprimento de 5900mm e largura de 400mm.

Com o ensaio do Modelo 1, foi possível caracterizar a viga protendida por meio da determinação de sua rigidez equivalente, e com os ensaios dos modelos 2 e 3, foram determinadas as rigidezes das ligações viga-pilar. Para cada ensaio, foram empregados diversos instrumentos de medição, entre eles: transdutores, para a obtenção de leituras de deslocamento, e clinômetros, para obtenção de leituras globais de rotação. A partir dessas leituras, foi possível determinar gráficos de força no atuador versus flecha e força no atuador versus rotação.

5. RESULTADOS

Em todos os ensaios, foi empregado um atuador hidráulico para a aplicação de força, que foi dividida em dois pontos, com o emprego de uma viga metálica. A carga de projeto calculada, considerando o Estado Limite Último (ELU), correspondeu a 270kN. A seguir, pode-se observar os principais resultados obtidos.

5.1 Modelo 1

As flechas da viga protendida foram determinadas a partir de um transdutor posicionado no centro, para as cargas de 190kN (Estado Limite de Serviço), 270kN (Estado Limite Último) e 350kN, valor este relativo à flecha máxima alcançada no ensaio. Esses valores e as respectivas flechas encontram-se no Quadro 2. Na Figura 5 são indicados os gráficos força no atuador versus flecha, para cada um dos três modelos.

Quadro 2. Valores de flechas obtidos através de transdutores, considerando o Modelo 1.

<i>Força</i> (kN)	<i>Flecha</i> (mm)
190	2,63
270	4,16
350	22,45

As medidas de rotação na extremidade da viga biapoiada foram obtidas através de clinômetros (Fig. 6). A viga biapoiada que compõe esse modelo apresentou o início da fissuração para a carga de projeto correspondente a 270kN.

Com os resultados obtidos para o Modelo 1, foi possível realizar a caracterização da viga pré-moldada protendida, a partir da determinação de sua rigidez equivalente, que correspondeu a um valor muito próximo do obtido considerando a seção bruta da viga, equivalente a $2,3 \cdot 10^{11} \text{ kN}\cdot\text{mm}^2$. Por meio desse resultado, pôde-se observar que a viga protendida se encontrava no estágio I, mesmo quando submetida à carga de projeto (270kN). Além disso, os resultados obtidos nesse ensaio auxiliaram na determinação da rigidez da ligação viga-pilar do Modelo 2.

Nas Figuras 5 e 6, podem ser observados os gráficos obtidos com os ensaios referentes a cada modelo. Neste trabalho, foram feitas comparações entre os resultados obtidos com os ensaios dos modelos somente até a carga de projeto, equivalente a 270kN, pois a partir desse valor teve início a fissuração da viga protendida e a intensificação da fissuração da viga de concreto armado.

O Modelo 2, por ser composto por uma viga protendida com ligações semi-rígidas, é indicado com o símbolo “CP” (Concreto Protendido), e o Modelo 3, como contém uma viga pré-moldada de concreto armado com ligações semi-rígidas, é indicado com o símbolo “CA” (Concreto Armado).

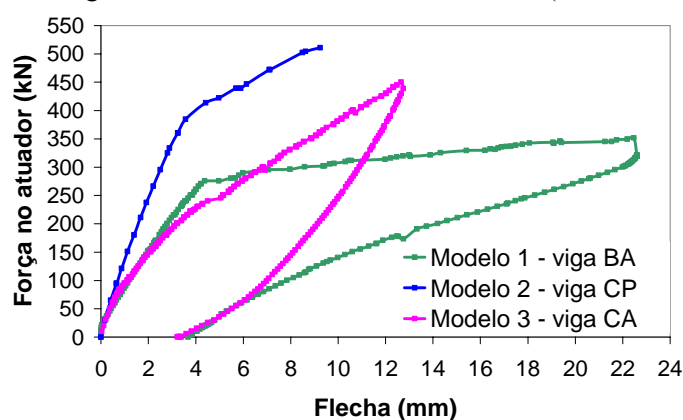


Figura 5. Gráficos força no atuador versus flecha para cada modelo.

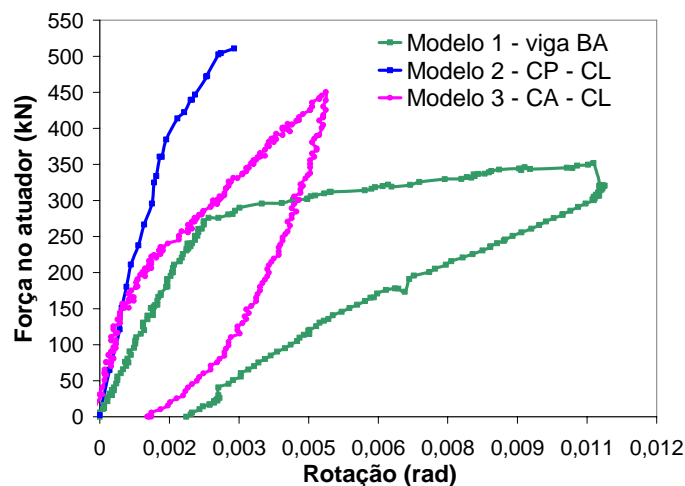


Figura 6. Gráficos de força no atuador versus rotação, determinados para os três modelos ensaiados, considerando as medições realizadas pelos clinômetros e transdutores, para os modelos com ligações viga-pilar 2 e 3.

5.2 Modelo 2

Foram obtidas flechas considerando as cargas de 190kN (ELS) e 270kN (ELU). Além disso, a flecha máxima atingida no ensaio do Modelo 2 foi obtida para o carregamento de 500kN no atuador central (Fig. 5). As medidas de rotação na extremidade da viga com ligações resistentes à flexão foram obtidas com clinômetros posicionados na extremidade (Fig. 6). Esses clinômetros foram posicionados na região considerada como sendo o centro de rotação da ligação, fornecendo leituras globais de rotação. A viga protendida com ligações resistentes à flexão, correspondente ao Modelo 2, apresentou o início da fissuração para a carga de 270kN. Para as forças correspondentes ao ELS e ao ELU, foram determinados os momentos mobilizados pelas ligações e suas respectivas rotações. Todos esses resultados experimentais podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3. Valores referentes ao ensaio do Modelo 2

<i>Força (kN)</i>	<i>Flecha (mm)</i>	<i>Momento mobilizado (kN.m)</i>	<i>Rotação (rad)</i>
190	1,39	81,84	0,00030
270	2,20	112,2	0,00049
500	8,34	-----	-----

Assim, dividindo os valores de momento por rotação, foram obtidas as rigidezes à flexão das ligações, que corresponderam a 272.800kNm/rad no ELS, para a carga de 190 kN, e 228.979kNm/rad no ELU, para a força de 270kN.

5.3 Modelo 3

Da mesma forma que para os outros modelos, no Modelo 3 as flechas foram determinados considerando os carregamentos de 190kN e de 270kN, sendo a flecha máxima obtida para o carregamento de 450kN no atuador central (Fig. 5). Os resultados experimentais referentes ao Modelo 3 podem ser observados no Quadro 4.

O início da fissuração da ligação que compõe o Modelo 3 ocorreu com apenas 60kN, o que não estava previsto. Com o ensaio realizado, foi possível observar que a fissura na ligação viga-pilar afetou as curvas da flecha no meio do vão da viga, demonstrando que a não linearidade da viga pré-moldada em concreto armado foi fortemente afetada pela não linearidade da ligação viga-pilar.

Após a força de 270kN, a fissuração na parte central da viga foi intensificada, aumentando a flecha obtida por meio dos transdutores

Quadro 4. Valores referentes ao ensaio do Modelo 3

<i>Força (kN)</i>	<i>Flecha (mm)</i>	<i>Momento mobilizado (kN.m)</i>	<i>Rotação (rad)</i>
190	2,98	84,0	0,0009
270	5,75	98,0	0,002
450	12,65	-----	-----

A partir dos valores de rotação presentes no Quadro 4, pode-se notar que um acréscimo significativo na rotação para a força última de projeto, estimada em 270kN. Nesse instante a rotação mais que dobrou de valor (Fig. 6). Tais valores indicam que a rigidez da ligação à flexão foi fortemente afetada a partir da carga de serviço. Os valores obtidos para a rigidez à flexão nas ligações foram de 97.096kNm/rad no ELS, para a carga de 190kN, e de 58.871kNm/rad no ELU, para a força de 270kN.

6. CONCLUSÕES

Mesmo sendo a ligação dimensionada para resistir a 100% dos momentos elásticos (187kN.m) no ELU, em virtude das rotações relativas entre a viga e o consolo, a ligação do Modelo 2 foi capaz de mobilizar 60% do momento elástico, que correspondeu a 112,2kN.m, considerando a carga de projeto de 270kN. Para o momento mobilizado (112,2kN.m) e a rotação equivalente (0,00049rad), a ligação apresentou uma rigidez correspondente a 228.979kN.m/rad.

A ligação do Modelo 3, também dimensionada para resistir a 100% dos momentos elásticos no ELU, foi capaz de mobilizar cerca de 52% do momento elástico, que correspondeu a 98kN.m, considerando a carga de projeto de 270kN. Para o momento mobilizado (98kN.m) e a rotação equivalente (0,002rad), a ligação apresentou uma rigidez correspondente a 58.871kN.m/rad.

Comparando os modelos 2 e 3, que utilizaram os mesmos elementos de pilares e as mesmas luvas rosqueadas para a fixação das armaduras negativas, pode-se dizer que o grande aumento da rigidez da ligação obtida no Modelo 2 se deve às melhores condições do apoio, obtidas com o preenchimento das interfaces viga-pilar e dos nichos dos chumbadores com um graute que apresentou um módulo de elasticidade da ordem de 43 GPa, diferentemente da almofada de argamassa empregada na ligação do Modelo 3. Dessa forma, acredita-se que, para o ensaio realizado com o Modelo 3, o principal fator que proporcionou uma pequena rigidez da ligação está relacionado com a utilização da almofada para o apoio da viga, que apresentou um reduzido módulo de elasticidade.

As rotações obtidas no Modelo 3 corresponderam a valores muito superiores aos apresentados pelos mesmos instrumentos utilizados no ensaio do Modelo 2. Devido às elevadas rotações sofridas pelas ligações, o Modelo 3 acabou perdendo a ação de pórtico, no Estado Limite Último.

Considerando a carga correspondente ao ELU (270kN), observou-se que a flecha (2,20mm) obtida no ensaio do Modelo 2, correspondeu a 53% da flecha (4,16mm) obtida no ensaio do Modelo 1 (viga protendida biapoiada). Pode-se dizer que tal fato ocorreu devido à ligação viga-pilar promover a redistribuição dos esforços ao longo da viga, alterando a sua configuração de fissuração.

O Modelo 3 apresentou maiores flechas que os outros modelos, da ordem de 5,75mm considerando a carga de projeto (270kN). Isso ocorreu, em parte, pelo fato da viga de concreto armado possuir rigidez inferior à das vigas protendidas, e em parte pela baixa rigidez à flexão das ligações adjacentes, que acabaram influenciando no comportamento do Modelo 3. As ligações presentes no Modelo 3, por apresentarem menores rigidezes, foram capazes de mobilizar menores momentos negativos, considerando o ELU, o que acarretou na obtenção de maiores momentos positivos na região central da viga, possibilitando a obtenção de elevadas flechas.

A partir da análise do comportamento das ligações estudadas, pode-se dizer que o Modelo 2 apresentou melhor desempenho que o Modelo 3. Considerando a análise das flechas, o Modelo 3 apresentou elevado deslocamento vertical, superior ao observado na viga protendida biapoiada do Modelo 1, não correspondendo a uma solução adequada. Da mesma forma, o Modelo 3 apresentou elevadas rotações, perdendo a ação de pórtico no Estado Limite Último, o que inviabiliza seu emprego em edificações de múltiplos pavimentos.

Dessa forma, o comportamento das vigas pré-moldadas de concreto armado foi fortemente influenciado pelo desempenho da rigidez à flexão das suas ligações viga-pilar. A complexidade do problema advém de tratar-se da interdependência entre duas não linearidades físicas, a primeira devida às diferentes configurações de fissuração ao longo da viga de concreto armado, e a segunda decorrente da relação momento-rotação nas ligações viga-pilar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelas bolsas de mestrado e pelo auxílio do Programa Jovem Pesquisador em Centros Emergentes. Agradecem também às empresas Leonardi e Protendit, pela doação dos modelos ensaiados.

REFERÊNCIAS

- [1] FIB GUIDE TO GOOD PRACTICE. Structural Connections for Precast Concrete Buildings. 2008. Commission C6: Prefabrication. Bulletin 43. ISBN 978-2-88394-083-3.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062:2006. Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro.
- [3] PRECAST CONCRETE INSTITUTE. Moment resistant connections and simple connectios. 1986. Chicago, Illinois.
- [4] CHEOK, G. S.; LEW, H. S. Performance of precast concrete beam-to-column connections subject to cyclic loading. PCI Journal. v.36, n.3, p.56-67. May-June, 1991.
- [5] CATOIA, Bruna. Comportamento de vigas pré-moldadas protendidas com ligações semi-rígidas. Universidade Federal de São Carlos, 2007. 149p. Dissertação de Mestrado.
- [6] SOUZA, Abner Soares. Comportamento de elementos pré-moldados com ligações semi-rígidas. Universidade Federal de São Carlos, 2006. 113p. Dissertação de Mestrado.