

# ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÃO VIGA-PILAR COM CONSOLO METÁLICO EMBUTIDO: DESENVOLVIMENTO NA PESQUISA, PROJETO E PRODUÇÃO

Luís Augusto Bachega<sup>1</sup>, Antonio Carlos Jeremias Jr.<sup>2</sup> & Marcelo de Araújo Ferreira<sup>3</sup>

## Resumo

*Este artigo apresenta uma experiência de integração pesquisa-projeto-produção dentro do estudo de ligação viga-pilar para estruturas pré-moldadas numa pesquisa de mestrado junto ao NETPre-UFSCar. A pesquisa realizada em BACHEGA (2013) envolveu o estudo teórico-experimental de ligação viga-pilar com consolo metálico embutido (não aparente), mas também envolveu a assistência técnica para projeto e produção, em conjunto com uma empresa de pré-fabricados para aplicação da tecnologia em uma obra na cidade de São Carlos. O consolo metálico embutido consiste num perfil metálico retangular preenchido com graute e embutido posteriormente no pilar, cuja tecnologia foi muito disseminada no Reino Unido. Para o estudo teórico, os critérios de projeto foram baseados em ELLIOTT (2002), mas os equacionamentos para o cálculo foram baseados nos manuais PCI (2010) e FIB (2003;2011). O estudo experimental teve como referências os estudos de GORGUN (1998) e O'FLANERY (1998). A escolha da ligação levou em conta aspectos de projeto e de produção que fossem favoráveis para aplicação no Brasil. Neste contexto, apresenta-se uma aplicação desta tecnologia na obra do Instituto INOVA no Parque Eco Tecnológico Dahma, onde ocorreu a integração da pesquisa com as etapas de projeto, produção e montagem, desenvolvidas pela USICON Construções Pré-Fabricadas.*

*Palavras-Chave: Ligação viga-pilar. Consolo metálico embutido. Pesquisa-Projeto-Produção. Concreto pré-moldado.*

## THEORETICAL-EXPERIMENTAL STUDY OF BEAM-COLUMN CONNECTION WITH HIDDEN STEEL CORBEL: DEVELOPMENT IN RESEARCH, DESIGN AND PRODUCTION

### Abstract

*This paper presents an experience of integration of research-design-production that occurred during a MSc research on beam-column connection for precast concrete structures that was carried out at NETPre-UFSCar. The research carried out by BACHEGA (2013) comprised a theoretical-experimental study of a beam-column connection using embedded steel billet (hidden corbel), but also it involved the technical assistance for design and production in conjunction with a precast company for the application of the technology in a new building in São Carlos-SP. The steel billet comprises of a hollow profile filled with grout and embedded into the precast column after the demolding, which has been extensively applied in the UK. For the theoretical study, the criteria design was based on ELLIOTT (2002), but the analytical models were based on the design manuals in PCI (2010) and FIB (2008). The experimental study was based on GORGUN (1998) and O'FLANNERY (1998). For the connection selection, both aspects of design optimization and production rationalization have been considered in terms of application of this technology in Brazil. In this context, the paper presents the application of this technology in the new building of the INOVA Institute (Parque Eco-Tecnológico Dahma) in São Carlos, showing the integration of this research with the design and the production phases in partnership with USICON Precast Constructions.*

*Keywords: Beam-column connection. Hidden steel corbel. Research-design-production. Precast concrete.*

<sup>1</sup> Mestre em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos. Email: luisbachega@ufscar.br.

<sup>2</sup> Mestre em Construção Civil, USICON Construções Pré-Fabricadas. Email: jeremias@usicon.com.br.

<sup>3</sup> Professor Doutor, Universidade Federal de São Carlos. Email: marcelof@ufscar.br.

## 1 INTRODUÇÃO

Os estudos teóricos acadêmicos realizados na área da engenharia possuem maior tendência de serem aplicados na produção em escala industrial, pois, muitas vezes estes estudos são realizados para melhorar os vários processos industriais diminuindo seu tempo de duração, seus custos, simplificando e tornando práticas operações que estejam inseridas nesses processos. No campo da Construção Industrializada de Concreto, os estudos realizados em universidades estão inclusos em muitas áreas como: planejamento de fábricas, melhorias nos projetos de edifícios e de elementos, estabilidade da estrutura, materiais, processos de produção, logística de fabricação e montagem, cálculo de elementos, ligações e inovação de processos e elementos. O processo de aplicação do conhecimento logo após o término destes estudos não é incomum, porém, muitas vezes a efetivação do conhecimento recém adquirido não é imediata porque as empresas ou entidades que escolhem testar novas técnicas de produção ou de projeto necessitam de mais tempo para adequação, assimilação e, portanto, adquirir o conhecimento por completo.

Este artigo apresenta alguns dos resultados da pesquisa de mestrado realizada em BACHEGA (2013), desenvolvida no NETPre-UFSCar, onde se realizou um estudo teórico-experimental de ligação viga-pilar com consolo metálico embutido, o qual consiste de um perfil metálico preenchido com graute e embutido posteriormente no pilar. Na estrutura final, o consolo fica ainda embutido na parte inferior da extremidade da viga, onde o consolo fica escondido (não aparente) na estrutura pré-moldada. Nesta pesquisa, além do estudo teórico, foram realizados ensaios de consolos isolados e um ensaio de protótipo em escala real com um pilar central com 02 vigas de 6 m. Este estudo contou com a colaboração da USICON Construções Pré-Fabricadas que doou os elementos (pilar, tarugo, vigas e elemento de apoio) para os ensaios. Já na fase de conclusão da pesquisa de mestrado surgiu a possibilidade de aplicação deste consolo embutido em uma obra executada pela USICON para a nova sede do Instituto Inova no Parque Eco-Tecnológico Damha na cidade de São Carlos.

A parceria universidade-empresa foi proveitosa para o entendimento de alguns aspectos do processo e da produção e, principalmente, detecção de interferências que esta nova ligação causaria em fôrmas e elementos. É importante ressaltar que o objetivo principal da parceria foi estudar a ligação entendendo seu comportamento estrutural, suas restrições quanto ao projeto e seu impacto e viabilidade no setor da Construção Industrializada, tornando a aplicação da ligação uma possível consequência do estudo já concretizado. Todavia, a experiência adquirida durante o estudo foi tal que foi possível a aplicação da ligação antes de sua concretização, pois, o estudo se iniciou já com os elementos para ensaio armazenados em laboratório, ou seja, os ensaios e as análises dos resultados foram feitas em tempo suficiente para que a aplicação da ligação estivesse disponível.

## 2 PESQUISA

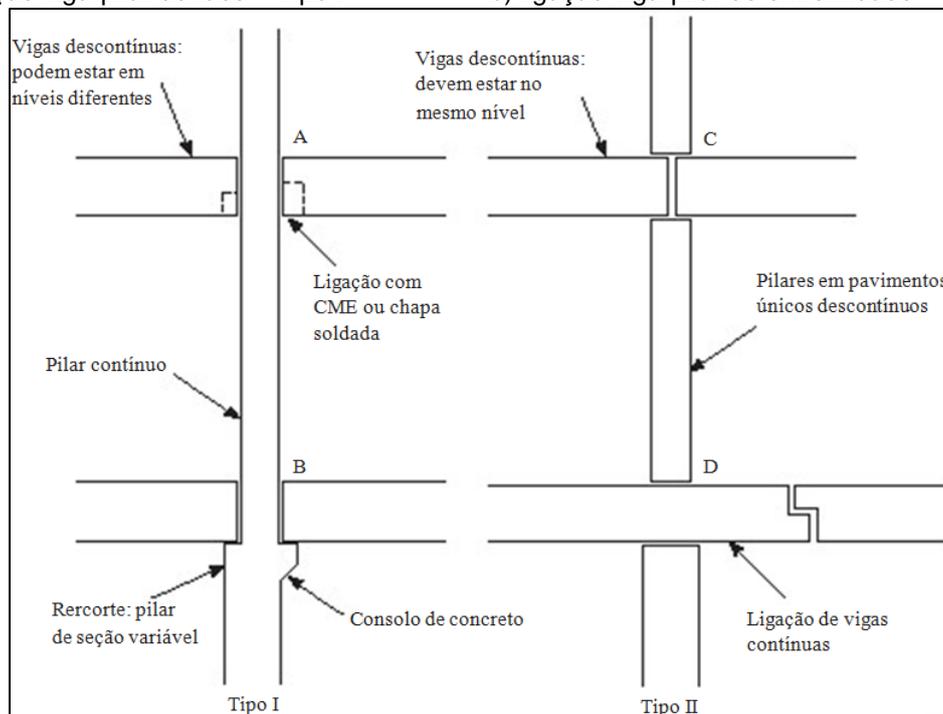
As ligações viga-pilar que podem existir em uma estrutura pré-moldada de concreto estão nas faces (Tipo I) e nas extremidades (Tipo II) dos pilares (Figura 1a e 1b). A ligação estudada foi uma ligação viga-pilar com Consolo Metálico Embutido (CME) do Tipo I – A (Figura 1c). Existem 4 (quatro) principais tipos desta ligação segundo ELLIOTT (2002):



a) ligação viga-pilar de face – Tipo I



b) ligação viga-pilar de extremidade – Tipo II

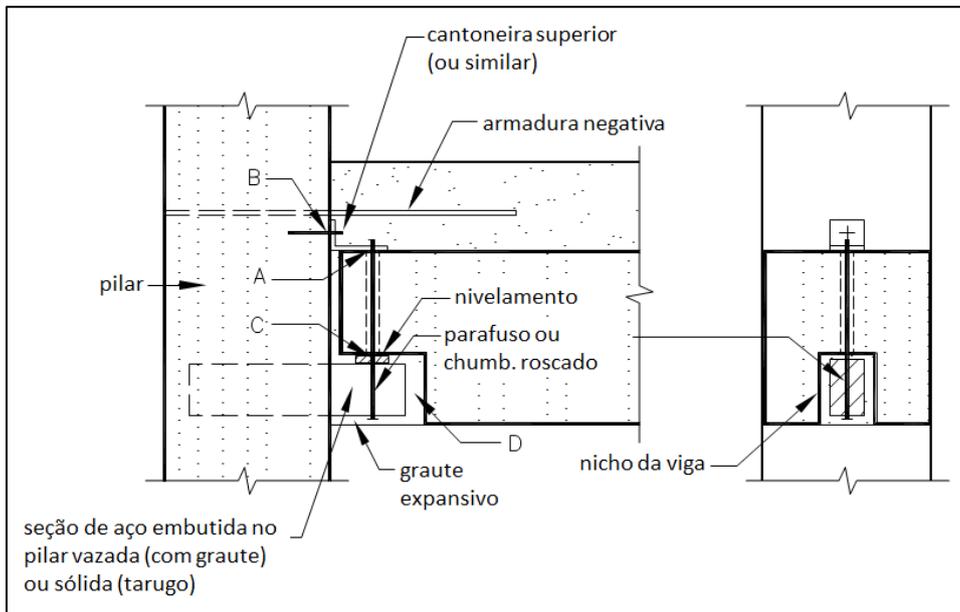


c) classificação das ligações viga-pilar

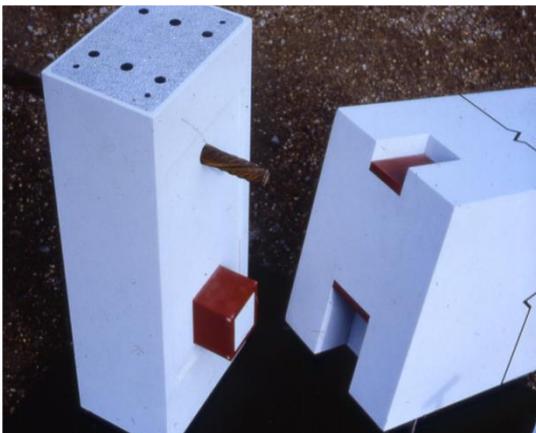
Figura 1 – Tipos de ligações viga-pilar (ELLIOTT, 2002).

## 2.1 Seção laminada ou soldada

Normalmente estas seções são quadradas ou retangulares, maciças ou ocas e necessitam de uma ligação temporária para a estabilidade da viga durante a montagem (antes da solidarização da ligação). Esta estabilidade temporária pode ser dada por diversos tipos de mecanismos como barras soldadas e cantoneiras parafusadas. Segundo FIB (2011), um Consolo Metálico Embutido retangular vazado de 200 mm de altura x 100 mm de largura x 10 mm de espessura (ou seção quadrada maciça de 100 mm x 100 mm) consegue chegar a uma carga de projeto de 500 kN, considerando o consolo totalmente ancorado no pilar por estribos concentrados e conectado a uma viga de 500 mm de altura . O modelo desta ligação é representado na Figura 2.



a) Esquema da ligação - A: interface chumbador/cantoneira; B: interface pilar/cantoneira; C: interface chumbador/chapa de apoio; e D: interface do nicho (graute expansivo).



b) Detalhes da ligação no pilar e na viga

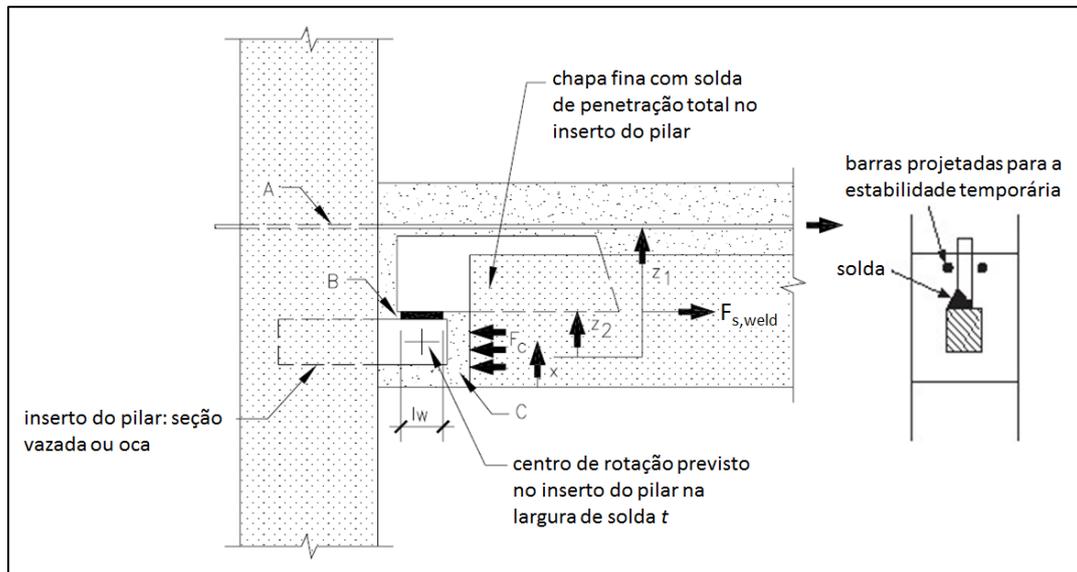


c) Consolo embutido no pilar

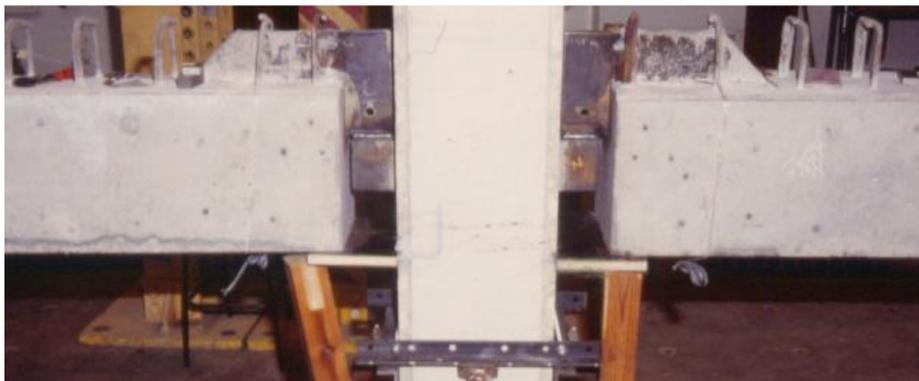
Figura 2 – Modelo de ligação viga-pilar com Consolo Metálico Embutido de seção laminada/soldada (ENGSTRÖM, 2008 e ELLIOTT, 2007).

## 2.2 Chapa tipo faca

Utiliza uma chapa fina soldada ao conector do pilar (Figura 3) chegando facilmente a uma ligação resistente de 500 kN. Também possui vários mecanismos de estabilidade temporária, o mais usual é soldar barras ancoradas no pilar na chapa fina que faz parte da viga. Necessita de escoramento temporário para que a região da solda entre o conector e a chapa seja grauteada, solidarizando a ligação.



a) Esquema da ligação - A: armadura negativa; B: interface conector do pilar/chapa fina (solda); e C: interface do nicho (graute expansivo).

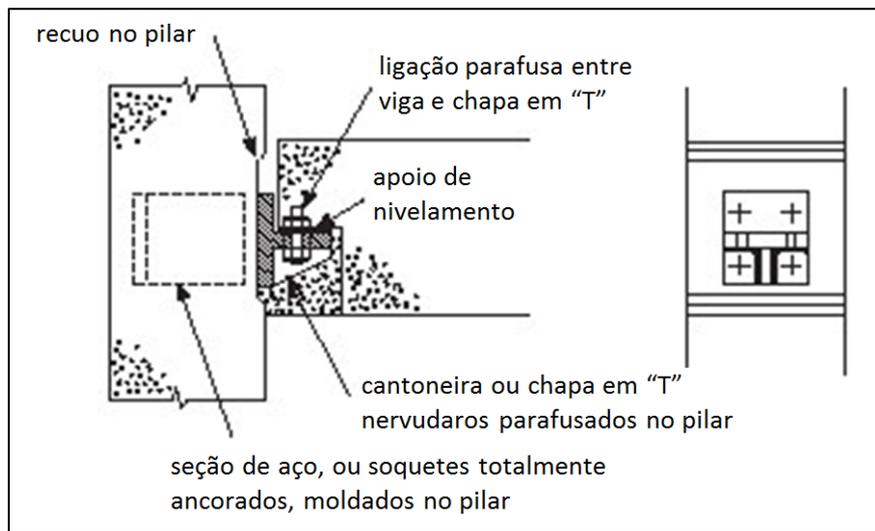


b) Viga montada

Figura 3 – Modelo de ligação viga-pilar com Consolo Metálico Embutido de chapa tipo faca (ELLIOTT, 2002;2007 e FIB, 2003).

## 2.3 Parafusado

Um Consolo Metálico Embutido formado por chapas grossas soldadas entre si, resultando em uma peça em formato “T”, é fixado no inserto do pilar por meio de parafusos de alta capacidade de carga (Figura 4). Uma ligação mais cara, porém, considerada muito segura. O consolo pode suportar cargas de até 600 kN utilizando-se seis parafusos de 24 mm com tensão de escoamento de 600 N/mm<sup>2</sup>.



a) Esquema da ligação



b) Consolo parafusado

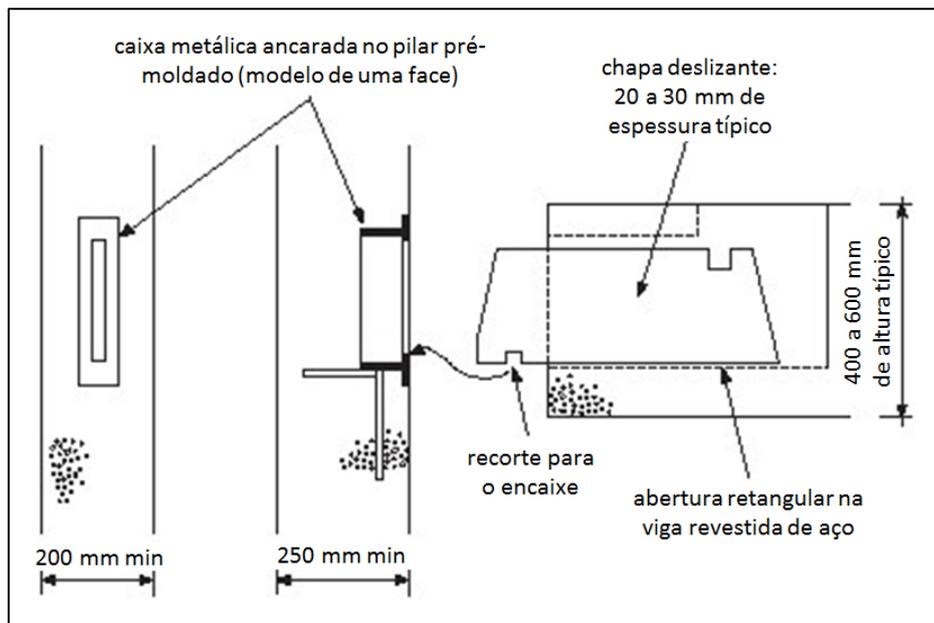


c) Viga montada

Figura 4 – Modelo de ligação viga-pilar com Consolo Metálico Embutido parafusado (ELLIOTT, 2002;2007).

## 2.4 Chapa deslizante

Originada na Noruega, consiste no encaixe de uma chapa deslizante (vinda da viga) na caixa metálica presente no pilar (Figura 5). Com armadura negativa resiste até 400 kN de carga de projeto. Esta chapa é empurrada através de uma abertura na viga até o encaixe. Fácil execução, mas requer restrição temporária a torção.



a) Esquema da ligação



b) Chapa na posição inicial



c) Chapa na posição final



d) Viga montada

Figura 5 – Modelo de ligação viga-pilar com Consolo Metálico Embutido de chapa deslizante (ELLIOTT, 2002;2007).

## 2.5 Escolha da ligação

Para o estudo foi selecionado um dos quatro tipos de ligação viga-pilar com Consolo Metálico Embutido que foram apresentados conforme os seguintes fatores:

- **Custo:** o Consolo Metálico Embutido possui formas, dimensões e materiais diferenciados para atender os critérios de projeto. Normalmente no Brasil a mão-de-obra custa, proporcionalmente, mais barato que os materiais em comparação com países como Estados Unidos e Europa. Preocupou-se em selecionar a tipologia que minimizasse os custos com material;
- **Aparência:** muitas obras pré-moldadas no país são utilizadas sem acabamento, ou melhor, apenas com pintura sobre o elemento de concreto. A escolha da ligação preocupou-se com a forma e aparência após solidarização;
- **Processo:** algumas ligações requerem domínio pleno da execução para garantir a qualidade e segurança da estrutura. Detalhes executivos podem gerar patentes e, portanto, a não disseminação do conhecimento por causa dos direitos intelectuais. O processo precisa estar apto para ser absorvido no mercado brasileiro de estruturas pré-fabricadas.
- **Dimensionamento:** o cálculo da ligação deve estar consolidado para que seja possível a coleta de informações e a aplicação.

- **Flexibilidade:** projetos de estruturas pré-moldadas no Brasil demandam flexibilidade na planta e nos recursos técnicos utilizados. O investimento da aplicação inédita deve estar concentrado em diversas soluções, sua restrição de utilização deve ser eliminada ao máximo.

A ligação de seção laminada/soldada foi a escolhida. Apresenta considerável facilidade na execução, possui flexibilidade nas dimensões dos perfis e de suas espessuras (consolo sólido ou vazado) e o detalhe do dente da viga não precisa necessariamente ser modificado. O custo dos perfis pode encarecer a ligação, porém, sua praticidade e estética e seu processo de produção (em seu domínio pleno) podem contribuir para baixar o custo final do produto. Esta tipologia de ligação foi denominada como Tarugo Metálico.

## 2.6 Breve revisão bibliográfica

MARCAKIS (1979) teve como objetivo desenvolver um modelo analítico mais fiel para o cálculo da ligação com base em um programa experimental de 21 ensaios do consolo metálico embutido, variando os modelos quanto ao carregamento, cobrimento do tarugo, armadura adicional, forma do perfil metálico e tipo de carregamento no consolo. O autor concluiu que a largura de apoio efetiva do tarugo é maior que a largura do perfil metálico (cerca de duas vezes); que a armadura adicional aumenta a capacidade da ligação; é importante enrijecer o perfil metálico contra flambagem e confinar, por meio de estribos, as regiões acima e abaixo do perfil.

GÖRGÜN (1997) analisou o comportamento à flexão de ligações viga-pilar e seus efeitos no comportamento do pórtico de concreto pré-moldado. O autor realizou ensaios em escala real de várias tipologias de ligação viga-pilar (seções sólidas e vazadas para o tarugo, alguns incluindo laje alveolar) e construiu curvas momento-rotação para analisar a semi-rigidez da ligação para estruturas semi-rígidas. O autor concluiu que o efeito da laje e das barras laterais elevou o momento último resistente em 215%, a rotação em 46% e a rigidez em 105% comparado com as ligações sem laje. GÖRGÜN (1997) ressaltou também que a curva momento-rotação da ligação deve cruzar a curva beam-line antes de chegar ao momento último, assim, a ligação possui capacidade rotacional suficiente para ser utilizada. A resistência a flexão de ligações viga-pilar em estruturas pré-moldadas de concreto depende da tipologia da ligação e onde ela se localiza no pórtico. Ligações duplas alcançam a capacidade total porque a armadura negativa está totalmente ancorada nas lajes, enquanto que as ligações simples são limitadas pela própria resistência já que a armadura negativa não está totalmente ancorada.

O objetivo principal de O'FLANNERY (1998) foi corrigir deficiências nos modelos analíticos existentes para o cálculo da ligação com tarugo metálico (modelo estadunidense e inglês) propondo dois outros métodos de cálculo que consideravam diferentes distribuições de tensão sob e sobre o perfil metálico no concreto do pilar. Por meio de ensaios de pilar isolado, o autor retificou alguns detalhes típicos de execução para cada variação tornando o processo industrial o mais prático e econômico possível (de acordo com suas análises). As principais conclusões do autor mostraram que a armadura adicional diminui o giro do perfil metálico em relação ao pilar e que os estribos concentrados acima e abaixo do tarugo evitam fissuras laterais (as primeiras a aparecerem).

## 2.7 Modelos analíticos

Todas as contribuições para o refinamento do modelo analítico foram resumidas em dois manuais de recomendação:

- PCI (2010);
- FIB (2011).

Para o dimensionamento da ligação viga-pilar com tarugo metálico foram utilizadas as formulações estadunidenses PCI (2010), sistema de unidade Imperial, e europeia FIB (2011), sistema de unidade Internacional. O Brasil utiliza o Sistema Internacional (SI) de medidas e, portanto, todos os resultados obtidos das formulações estadunidenses foram convertidos.

Em ambos os métodos, a falha da ligação é prevista no concreto do pilar ou no perfil metálico embutido. A força máxima resistente de cálculo do concreto vale  $V_{Rdc}$ . A falha no billet pode

ocorrer devido a ruptura do perfil ao cisalhamento ou à flexão. O valor da força cortante resistente de cálculo do perfil vale  $V_{Rd,cis.}$  e  $V_{Rd,flex.}$  para o cisalhamento e para a flexão, respectivamente. Se houver armadura adicional, soma-se ao  $V_{Rdc}$  o valor da força cortante  $V_{Rd,ad.}$  proporcionado pelas barras soldadas ao consolo metálico resultando na força cortante resistente de cálculo total  $V_{Rdc,total}$  para o concreto do pilar. O menor valor de força cortante resistente de cálculo define a resistência da ligação.

### 2.7.1 Modelo PCI (2010)

O modelo analítico considerado por PCI (2010), última publicação de seu manual, possui as características representadas na Figura 6.

A força cortante resistente de cálculo para o concreto vale:

$$V_{Rdc} = (0,85f_{cd}b_p e L_E) / (1 + 3,6 e / L_E) \quad (1)$$

Onde  $e = a + L_E / 2$

A armadura adicional do perfil (barras soldadas a ele) acrescenta uma força cortante resistente no concreto de:

$$V_{Rd,ad.} = (2A_s f_y) / [1 + ((6e / L_E) / (4,8s / L_E) - 1)] \quad (2)$$

Desde que as barras estejam ancoradas acima e abaixo do perfil metálico, pode-se duplicar a área da seção transversal  $A_s$  para  $2A_s$ , segundo PCI (2010). Aplicando o coeficiente de segurança  $\phi = 0,75$  tem-se:

$$\phi V_n = 0,75(V_{Rdc} + V_{Rd,ad.}) \quad (3)$$

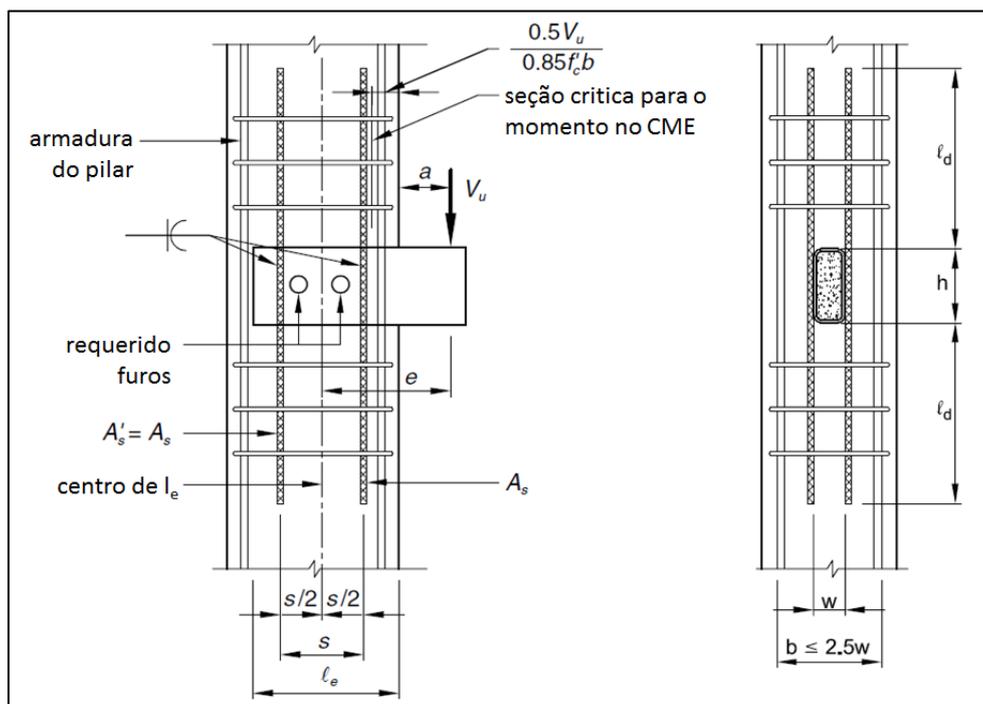


Figura 6 – Detalhamento do tarugo no concreto (PCI, 2010).

E para o perfil metálico vale:

$$V_{Rd,cis.} = \phi(0,6F_y)ht \quad (4)$$

$$V_{Rd, fle.} = (\phi Z_p F_y) / (a + 0,5 V_U / (0,85 f_{ck} b_{pe})) \quad (5)$$

Com  $\phi = 0,90$ . Para o módulo de deformação plástica do aço  $Z_p$  o PCI (2010) recomenda a seguinte formulação para perfis retangulares vazados:

$$Z_p = (bd^2 - b_1 d_1^2) / 4 \quad (6)$$

O módulo plástico é multiplicado pelo fator de forma  $S_f$ :

$$Z_p \rightarrow Z_p / S_f \quad (7)$$

onde,

$$S_f = (3d/2) [(bd^2 - b_1 d_1^2) / (bd^3 - b_1 d_1^3)] \quad (8)$$

### 2.7.2 Método FIB (2011)

O modelo analítico considerado por FIB (2011) possui as características representadas na Figura 7.

A força cortante resistente de cálculo para o concreto vale:

$$V_{Rdc} = 0,85 v f_{cd} b_p x \quad (9)$$

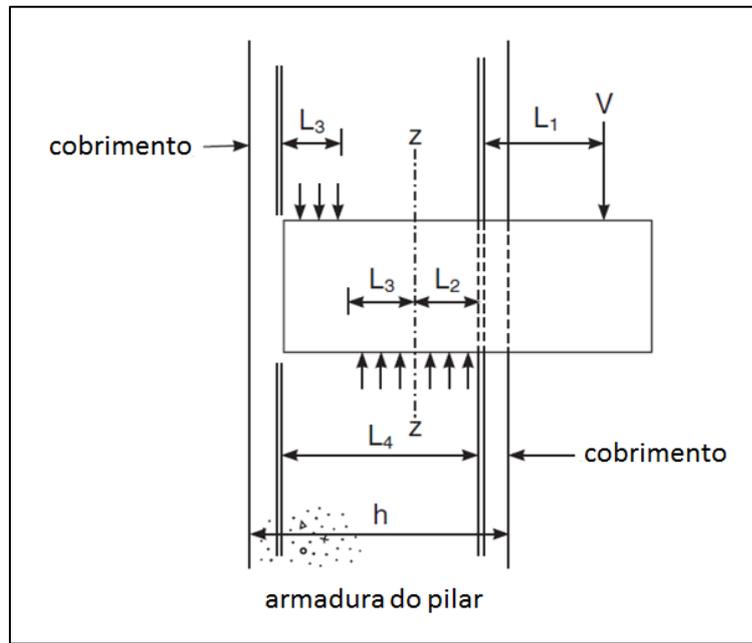
Onde  $v = 1 - (f_{ck, graute} / 250)$

e para o perfil metálico vale:

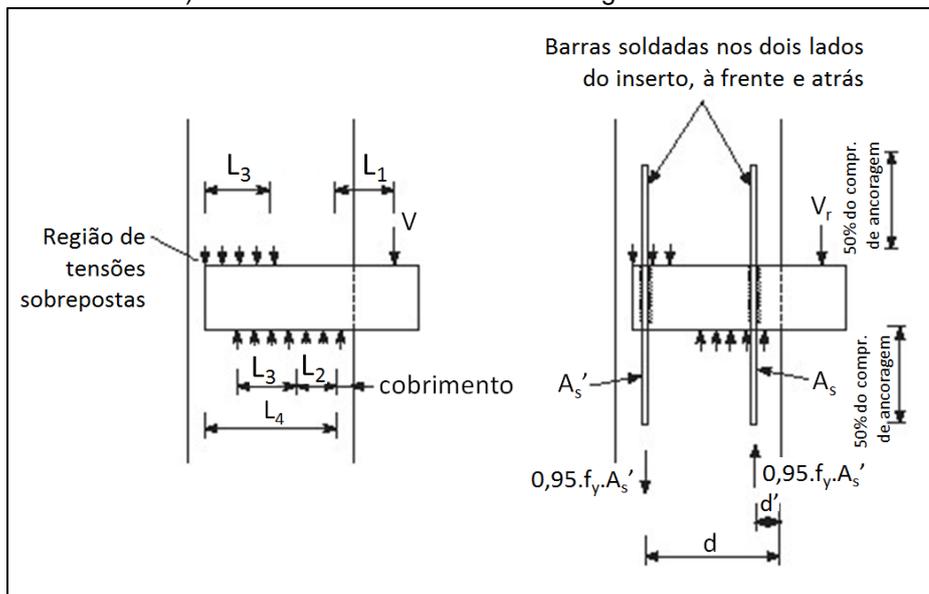
$$V_{Rd, cis.} = 0,6 F_y h t \quad (10)$$

e

$$V_{Rd, fle.} = (S_{xx} F_y) / (L_1 + 0,5 L_2) \quad (11)$$



a) Modelo de funcionamento do tarugo no concreto



b) Armadura adicional quando há sobreposição de tensões no concreto

Figura 7 – Detalhamento do tarugo no concreto (FIB, 2011).

onde,

$$L_1 = a + \text{cobr.} \quad (12)$$

$$L_2 \rightarrow 0,25L_2^2 + (0,5L_4 + L_1)L_2 - 0,2475L_4^2 = 0 \quad (13)$$

$$L_4 = H_2 - 2\text{cobr.} \quad (14)$$

$L_2$  é aceito quando  $L_2 < L_{2,\text{billet}}$ . Encontra-se o valor de  $L_{2,\text{billet}}$  equilibrando o momento resistente  $M_R$  do perfil metálico com o momento atuante  $M_{ZZ}$ .

$$M_R = S_{XX}F_y \quad (15)$$

$$M_{ZZ} = 0,8f_{ck}b_pL_2(L_1 + 0,5L_2) \quad (16)$$

Para encontrar o valor de  $L_3$  assumido no modelo teórico utiliza-se a “regra dos 90%” o qual evita a sobreposição de tensões abaixo do tarugo.

$$L_2 + 2L_3 \leq 0,90L_4 \quad (17)$$

O módulo plástico do aço  $S_{xx}$  foi calculado do mesmo modo que  $Z_p$ .

Para a contribuição da força cortante resistente de cálculo da armadura adicional no concreto do pilar, temos:

$$V_{Rd,ad.} = [2A_s 0,95f_y (d - d')] / (d + L_1 - \text{cobr.}) \quad (18)$$

Onde  $(d - d')$  é igual a distância entre as barras que compõem a armadura adicional.

### 3 PROJETO E PRODUÇÃO

A proposta foi proporcionar a aplicação da ligação viga-pilar com Consolo Metálico Embutido, utilizando o tarugo metálico, para uma obra típica executada no Brasil.

A aplicação ocorreu na obra do Instituto Inova no Parque Eco Tecnológico Damha, na cidade de São Carlos/SP, cujos pilares possuíram seção circular. Para a produção destes pilares em formas metálicas modificou-se o detalhamento do consolo metálico embutindo-o após desforma: um nicho foi deixado no pilar para a colocação posterior do perfil metálico com graute.

Na Figura 8 encontra-se o detalhe da ligação no pilar circular, e na Figura 9 a montagem da obra.



a) Nicho do pilar



b) Grauteamento do perfil metálico

Figura 8 – Aplicação do tarugo embutido em pilar circular

A pesquisa-projeto-produção realizada nesta parceria universidade-empresa conseguiu estudar soluções que viabilizassem a concepção da ligação viga-pilar com tarugo. Os ensaios realizados por esta pesquisa utilizaram pilares com tarugo metálico concretado juntamente com o pilar, mas a aplicação da ligação na obra teve os consolos embutidos após a desforma dos pilares. Vale ainda ressaltar que os pilares da obra foram circulares e mesmo assim foi possível a aplicação.

O processo de produção dos pilares circulares determinado para a ligação não interferiu nas formas metálicas que foram utilizadas para a moldagem. Com a utilização do nicho foi possível evitar recortes na forma aumentando a velocidade de produção do pilar e até de liberação dele para a obra, já que o consolo pode ser padronizado e obter um rápido processo de grauteamento.



a) Montagem dos pilares circulares



b) Montagem das vigas



c) Viga solidarizada: ligação grauteada

Figura 9 – Montagem da obra com tarugo metálico.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A parceria universidade-empresa trouxe para o estudo não só as condições básicas para a realização de ensaios em laboratório como também contribuiu para maior experiência e mais familiaridade do objeto de estudo (ligação viga-pilar com tarugo metálico) em sua aplicação em obras.

Todas as observações consideradas na pesquisa acadêmica teórica, nos ensaios e na aplicação em obra serão utilizadas em um trabalho futuro como continuação deste estudo. Seria interessante que este novo estudo, como modificações e sugestões para o detalhamento desta tipologia de ligação, tivesse também uma parceria universidade-empresa para que, além de viabilizar os estudos experimentais, houvesse um conhecimento mais aprimorado com os processos de elaboração de projetos e de execução.

## 5 REFERÊNCIAS

- BACHEGA, L. A. (2013). **Estudo teórico-experimental de ligação viga-pilar com tarugo metálico**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.
- ELLIOTT, K. S. (2002). **Precast Concrete Structures**. 1. ed. Oxford: Butterworth Heinemann.
- ELLIOTT, K. S. (2007). **The Design and Construction of Precast Concrete Structures: Joints and connections**. Dublin: Próprio autor.
- ENGSTRÖM, B. (2008). **Structural connections for precast concrete buildings** – Lecture 5: Transfer of bending and torsional moment. São Carlos: Próprio autor.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). (2003). **Structural Connections for Precast Concrete Buildings: Guide to Good Practice**. Commission C6: Prefabrication: Task Group TG 6.2: Connections.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). (2011). **Planning and Design Handbook on Precast Building Structures**. Commission on Prefabrication: TaskGroup TG 6.12.
- GÖRGÜN, H. (1997). **Semi-rigid Behaviour of Connections in Precast Concrete Structures**. Tese (Doutorado). Universidade de *Nottingham*. *Nottingham*.
- MARCAKIS, K. (1979). **Precast Concrete Connections with Embedded Steel Members**. Dissertação (Mestrado). Universidade de *McGill*. Montreal.
- O'FLANNERY, L. J. (1998). **Strength of Precast Concrete Beam to Column Connections using Embedded Wide Steel Billets**. Tese (Doutorado). Universidade de *Dublin*. *Dublin*.
- PRECAST / PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTION (PCI). (2010). **PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete**. 7. ed. Chicago.