



CONTRIBUIÇÃO DAS LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS PARA A OTIMIZAÇÃO DE GALPÕES PRÉ-MOLDADOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

CONTRIBUTION OF THE SEMIRRIGID CONNECTIONS TO THE OPTIMIZATION OF PRE-MOLDED GALPONS: A LITERATURE REVIEW

CONTRIBUCIÓN DE LAS LIGACIONES SEMIRRÍGIDAS PARA LA OTIMIZACIÓN DE GALPONES PRÉ-MOLDADOS

Eduardo Coleone Ferrari¹, João Francisco Otrente¹, Jose Eduardo Quaresma¹

<https://doi.org/10.47820/recima21.v6i1.7045>

PUBLICADO: 11/2025

RESUMO

Cada dia mais a construção civil se utiliza de estruturas pré-moldadas. Elas têm seus pontos positivos, como rapidez de execução e qualidade controlada. Este estudo teve por objetivo investigar e apresentar o potencial inexplorado das ligações semirrígidas na concepção estrutural de galpões pré-moldados de concreto. Como método, foi realizada uma revisão de literatura utilizando as bases de dados Google Acadêmico, Scielo e repositórios de universidades. Concluiu-se que, em galpões pré-fabricados, as ligações semirrígidas entre viga e pilar são mais vantajosas do que as ligações convencionais, pois proporcionam maior rigidez, reduzem a movimentação da estrutura e diminuem riscos de falhas. Ao utilizar solda, parafusos ou chumbadores, a união entre os elementos estruturais torna-se mais eficiente, permitindo ainda a redução da quantidade de aço e da resistência do concreto, o que diminui custos.

PALAVRAS-CHAVE: Ligações semirrígidas. Galpões pré-moldados. Otimização. Contribuição.

ABSTRACT

Civil construction increasingly uses precast structures, which offer advantages such as faster execution and controlled quality. This study aimed to investigate and present the unexplored potential of semi-rigid connections in the structural design of precast concrete warehouses. The method consisted of a literature review using Google Scholar, Scielo and university repositories. The study concluded that, in prefabricated warehouses, semi-rigid beam–column connections are more advantageous than conventional ones, as they provide greater rigidity, reduce structural movement and decrease the risk of failures. When welds, bolts or anchors are used, the union between structural elements becomes more efficient, allowing a reduction in the amount of steel and in the concrete strength, which lowers construction costs.

KEYWORDS: *Semi-rigid connections. Precast warehouses. Optimization. Contribution.*

RESUMEN

La construcción civil utiliza cada vez más estructuras prefabricadas, que presentan ventajas como rapidez de ejecución y calidad controlada. Este estudio tuvo como objetivo investigar y presentar el potencial no explorado de las conexiones semirrígidas en el diseño estructural de galpones prefabricados de concreto. Como método, se realizó una revisión bibliográfica utilizando Google Académico, Scielo y repositorios universitarios. Se concluyó que, en galpones prefabricados, las conexiones semirrígidas entre viga y pilar son más ventajosas que las conexiones convencionales, ya que proporcionan mayor rigidez, reducen el movimiento estructural y disminuyen el riesgo de fallas. Cuando se utilizan soldaduras, pernos o anclajes, la unión entre los elementos estructurales

¹ Universidade de Araraquara – UNIARA.



se vuelve más eficiente, permitiendo además la reducción de la cantidad de acero y de la resistencia del concreto, lo que reduce los costos de la obra.

PALABRAS CLAVE: Conexiones semirrígidas. Galpones prefabricados. Optimización. Contribución.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções construtivas mais rápidas, econômicas e sustentáveis tem impulsionado o uso de estruturas pré-moldadas de concreto no setor da construção. Essas estruturas representam uma abordagem industrializada na construção civil, caracterizada pela produção de elementos estruturais fora do local definitivo de uso, sob condições controladas de qualidade. Esses componentes são posteriormente transportados e montados no canteiro de obras, proporcionando maior eficiência e padronização ao processo construtivo.

Estruturas pré-fabricadas tem seus pontos positivos, como rapidez na execução, qualidade controlada, redução de resíduos, segurança no canteiro de obras e grande sustentabilidade. Seu uso, segundo Tomim (2019), está correlacionado a uma forma de construir com economia, ofertando durabilidade segura e agilidade de execução.

No entanto, apresenta alguns pontos negativos como necessidade de um projeto bem detalhado, logística para transporte e armazenamento dos materiais nos canteiros, requer equipamentos específicos e conta com uma grande limitação arquitetônica, ainda mais quando se refere às ligações estruturais pré-moldadas, que por ter grande influência na segurança da edificação, dificulta a projeção e a execução do pretendido, restringindo a substituição dos métodos construtivos convencionais pelo sistema pré-moldado (Tomim, 2019).

As estruturas são constituídas principalmente por elementos como pilares, vigas, terças e painéis que são montados no canteiro por meio de ligações pré-estabelecidas. De acordo com Miotto (2002 *apud* TOMIM, 2019), essas ligações entre estruturas pré-moldadas, no geral, são compostas por articulações e ocasionam em estruturas mais solicitadas a flexão e com pouca redistribuição de esforços. Elas são regiões de comportamento complexo, onde acontece concentração de tensões que podem ou não mobilizar deslocamento e esforços advindos dos elementos ligados por elas, o que faz com que haja uma redistribuição destes esforços e deslocamentos ao longo da estrutura, interferindo no comportamento do sistema todo.

Conforme comenta Otrente (2023), essas ligações viga-pilar são idealizadas nos modelos de cálculo como articuladas ou totalmente rígidas, simplificando a análise estrutural. Contudo, na realidade, a maioria das ligações apresenta um comportamento intermediário, classificado como semirrígido. Ferreira (2010) comenta que, em edifícios de múltiplos pavimentos, a consideração da semirrigidez demonstrou-se uma estratégia eficaz, proporcionando não apenas um modelo de cálculo mais próximo do comportamento real, mas também resultando em significativas

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



economias no consumo de armadura, melhor controle sobre estabilidade global da estrutura (deslocabilidade lateral), otimização no dimensionamento dos pilares e melhoria da redistribuição dos esforços.

Apesar dos benefícios amplamente reconhecidos em edifícios, a aplicação e a exploração do potencial das ligações semirrígidas em galpões pré-moldados de concreto ainda é uma área pouco explorada, prevalecendo a idealização de ligações articuladas (rotuladas), o que acarreta um dimensionamento muito conservador resultando em projetos superdimensionados.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo investigar e apresentar o potencial inexplorado das ligações semirrígidas na concepção estrutural de galpões pré-moldados de concreto. Para tal, foi realizada uma revisão de literatura utilizando as bases de dados Google Acadêmico, Scielo e repositórios de universidades.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta os conceitos sobre estruturas pré-moldadas compostas por elementos produzidos em ambiente controlado e posteriormente montados no local da obra. Entre suas principais vantagens, destacam-se a padronização dos componentes, controle de qualidade dos componentes, redução do tempo de execução e menor impacto ambiental quando comparado às estruturas moldadas *in loco* (Cavalcante, 2017).

2.1. Conceito sobre estruturas pré-moldadas

De acordo com Barbeiro (2018), com os avanços no setor da construção civil, as estruturas pré-moldadas de concreto começaram a se expandir no setor. No Brasil, isso aconteceu no início da década de 50 e, devido à industrialização, cresceu nos próximos anos, o que permitiu que as indústrias brasileiras do ramo se tornassem capazes de ofertar estas estruturas.

Chaves (1979 *apud* Araújo; Moraes, 2014) relata que a estrutura do prédio é um conjunto de peças que formam um quadro suficientemente rígido e resistente que consiga suportar todos os esforços advindos do peso dos elementos constituintes da edificação e o das cargas acidentais. Dentre estes elementos estruturais, estão as lajes, as vigas e os pilares, ou a união deles.

As estruturas pré-moldadas podem ser utilizadas desde edificações de pequeno porte, até de grande porte, como é o caso dos grandes galpões (hospitais, edifícios residenciais, dentre outros), onde os conceitos são semelhantes, devido à padronização do processo de produção (Barbeiro, 2018).

Essas estruturas pré-moldadas têm suas regiões de ligação que possuem comportamento singular, com concentração de tensões, onde as deformações e os deslocamentos podem não ser



desprezados, mesmo para ações de serviço. Conforme relata Ferreira (1999 *apud* Barbeiro, 2018, p. 3), “a ligação pode ser definida como mais um elemento intermediário que faz a ponte entre dois elementos estruturais, como no caso da viga e do pilar”.

As ligações, segundo Tomim (2019), são fundamentais para as edificações, independente de qual tipo de material ou estrutura é usado. Seu propósito é restringir o movimento e proporcionar estabilidade à estrutura ou parte dela, dessas edificações. Em casos de estruturas pré-moldadas, é preciso considerar, além de seu estado final, uma condição transitória correlacionada às fases de desmoldagem, transporte, armazenamento e montagem, pois, caso sejam realizadas de forma inadequadas, essas fases podem apresentar situações desfavoráveis quando comparadas a situações definitivas.

Conforme relata Ferreira (1999 *apud* Barbeiro, 2018), a ligação destas estruturas está diretamente correlacionada com a resistência, flexibilidade e rigidez delas. Ela é dividida em três categorias, de acordo com sua rigidez, sendo respectivamente da com menor rigidez à com maior, nomeadas “ligação articulada”, “ligação semirrígida” e “ligação rígida ou engastada”.

Abaixo consta uma definição mais detalhada para o comportamento das ligações do ponto da mecânica das estruturas:

- I. Ligação articulada: Apresenta incapacidade de resistir ou mobilizar momentos fletores. Não há restrição quanto à rotação. Também é conhecida pelo termo ligação “rotulada” mediante ao seu comportamento de rótula supracitado;
- II. Ligação rígida: Apresenta elevada capacidade de transmitir e resistir a todos os esforços solicitantes. Também é conhecida pelo comportamento monolítico (engaste), situação está, em que se mobiliza o momento de engastamento perfeito. Há restrição quanto à rotação;
- III. Ligação semirrígida: Trata-se do comportamento intermediário entre o rígido e o articulado, ou seja, a ligação pode mobilizar uma parcela do momento de engastamento perfeito e restringir parcialmente à rotação da viga com o pilar.

A Figura 1 ilustra a resposta mecânica para cada ligação classificada anteriormente. Trata-se da relação momento-rotação, em que para um determinado momento mobilizado na ligação existe uma rotação correspondente.

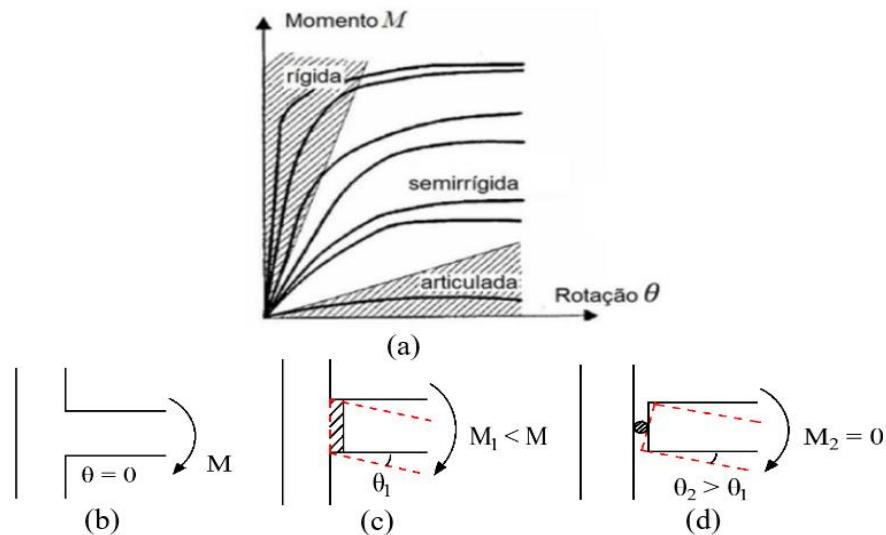


Figura 1. Classificação quanto à rigidez rotacional: a) Diagrama momento-curvatura; b) Ligação rígida; c) Ligação semirrígida; d) Ligação articulada

Fonte: Adaptado de FIB (2008)

De acordo com Otrente (2024), as ligações viga-pilar são elementos críticos em estruturas pré-moldadas que influenciam diretamente a estabilidade global da estrutura; a distribuição de esforços; a resistência a cargas horizontais, como vento e sismos; e a capacidade de dissipação de energia. Sua correta modelagem e execução determinam a segurança da estrutura, principalmente em regiões com solicitação sísmica ou com ventos fortes.

Segundo Tomim (2019), as ligações viga-pilar são classificadas como articuladas (Figura 2), também chamadas de rotuladas, elas transmitem apenas esforços verticais, normalmente, por meio de apoio simples ou encaixe com chumbadores. No caso do apoio simples, utiliza-se Neoprene padrão para suportar os esforços horizontais e o único meio de contato entre viga-pilar. No modelo de encaixe com chumbador, é colocado um pino de aço que, posteriormente, é grauteado, para suportar os esforços horizontais e o Neoprene, para ser usado apenas como um apoio para a montagem e como uma vedação para a aplicação do graute.

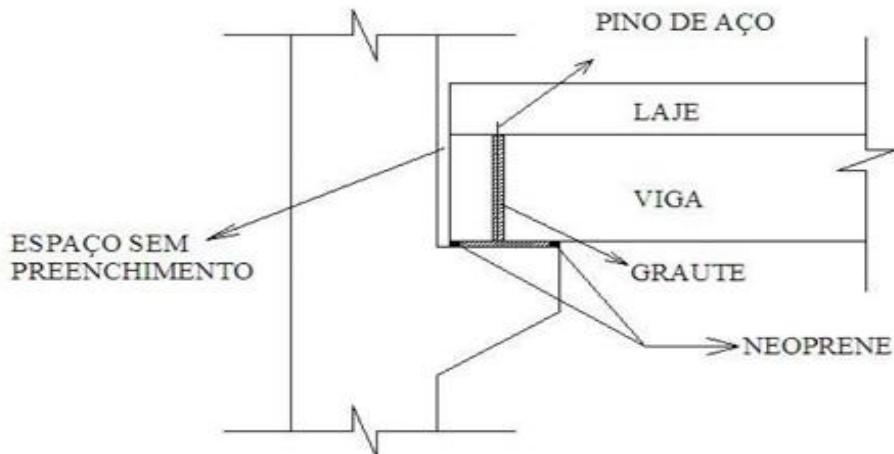


Figura 2. Modelo de ligação viga-pilar articulada de Neoprene com graute
 Fonte: Manual Munte de Pré-fabricados de concreto (2004 *apud* BARBEIRO, 2018)

Conforme relata Barbeiro (2018), a principal diferença entre o uso de Neoprene padrão e o Neoprene com graute é que, no primeiro caso, não se pode considerar o efeito de pino, assim, o Neoprene tem que ser resistente aos esforços horizontais, pois é o único aparelho de apoio. No segundo caso, os esforços horizontais são aplicados na ligação entre o conjunto viga-console e o graute usado no preenchimento do furo da viga. Neste caso, o Neoprene é usado como um aparelho de apoio apenas na montagem, preenchimento e cura do graute, que, depois, passa a ser o apoio definitivo da viga.

Em relação às ligações semirrígidas, Kataoka *et al.*, (2012) relatam que elas são ligações em estruturas metálicas que vem se tornando comum na área de pré-fabricados. Elas apresentam “comportamento intermediário entre o rígido e o articulado, ou seja, a ligação viga-pilar pode mobilizar uma parcela do momento de engastamento perfeito e restringir parcialmente a rotação da viga com o pilar” (Otrente, 2024, p.3).

De acordo com Barbeiro (2018, p. 6), para a ligação ser definida como semirrígida, é imprescindível que ela apresente resistência à rotação, de uma maneira que exista um binário referente ao momento em questão. As ligações semirrígidas “são caracterizadas por resistir a uma parcela do momento fletor que engastamento entre os elementos que a compõem e tem seu fator de restrição a rotação (α) entre 0,15 e 0,85”.

Sobre a ligação semirrígida com formação pelos pinos ou binário formado pelos pinos (Figura 3), Barbeiro (2018) declara que ela tem baixa eficiência, pois apresenta baixo fator de restrição à rotação (α) e se incide no uso de um ou mais pinos, que, corretamente ancorados, exercem a função de tração e, enquanto parte do console, exercem a função de compressão, o que forma o binário necessário para resistir ao momento fletor.

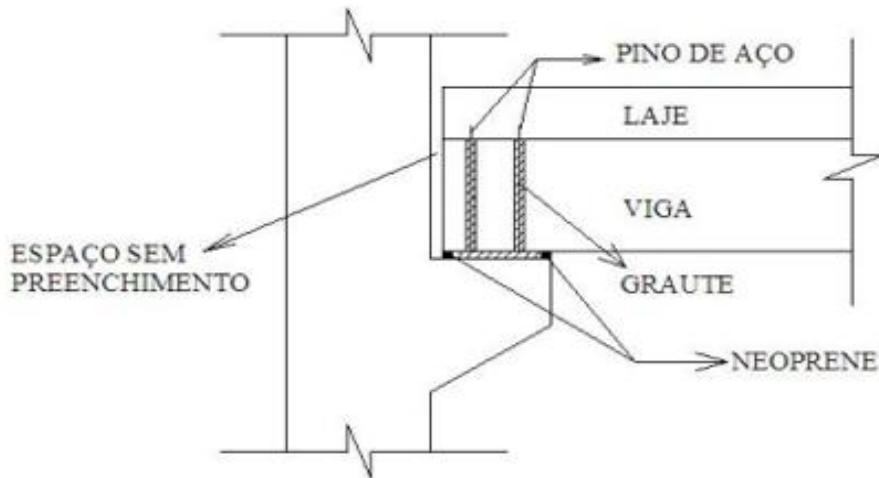


Figura 3. Modelo de ligação viga-pilar semirrígida com formação de binário pelos pinos
 Fonte: Manual Munte de Pré-fabricados de concreto (2004 *apud* BARBEIRO, 2018)

Já sobre a ligação semirrígida com concretagem vertical simples (Figura 4), Barbeiro (2018) relata que está ligação se define pela completa concretagem vertical entre as vigas e os pilares ou entre as vigas e seus respectivos consoles de apoio.

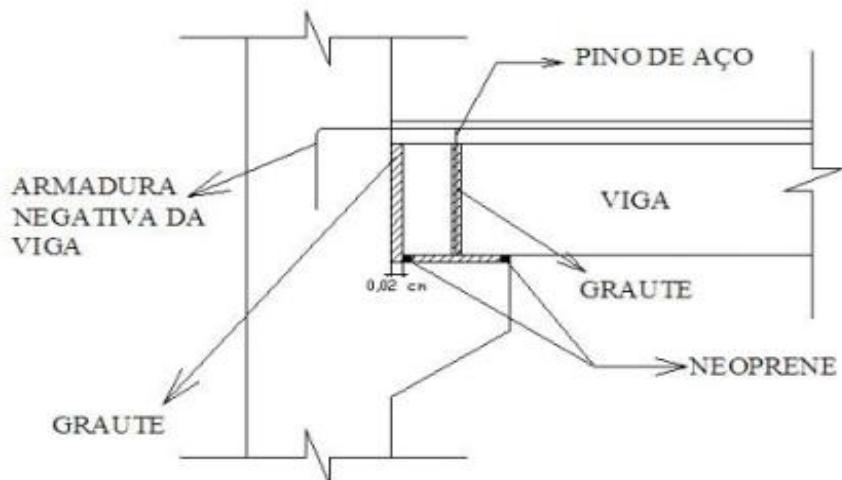


Figura 4. Modelo de ligação viga-pilar semirrígida com concretagem vertical simples
 Fonte: Manual Munte de Pré-fabricados de concreto (2004 *apud* BARBEIRO, 2018)

Neste tipo de ligação, além do Neoprene ser padrão ou com graute com efeito de pino, como na ligação articulada, uma fração relevante dele é transmitida na vinculação viga-pilar, devido ao preenchimento dos espaços vazados com o graute (Barbeiro, 2018).

Para efetuar a concretagem vertical, as vigas devem conter uma folga de no mínimo 2 cm do pilar e ter uma armadura negativa formando uma união com pilar. Essa armadura pode ser feita através de luvas simples ou passantes embutidas no pilar, também conhecido como sistema de Rudloff, ou com furos



passantes no mesmo. Após a montagem dos elementos e instalação da armadura negativa, a ligação deve ser devidamente grauteada, assim resultando uma melhor interação entre os componentes da ligação (Barbeiro, 2018, p.7).

A ligação semirrígida com concretagem vertical e solda é muito parecida com a ligação semirrígida com concretagem vertical simples, tendo como diferença de que, neste tipo de ligação, há o acréscimo de uma chapa metálica colocada na parte inferior da viga, sendo soldada na chapa metálica alocada no console de apoio do pilar. O contato entre elas substitui o Neoprene e suas finalidades, tanto no que diz respeito ao apoio, quanto à transmissão dos esforços. “É uma ligação aprimorada e mais próxima do engastamento, tendo seu fator de restrição a rotação (α) de aproximadamente 0,85” (Barbeiro, 2018, p. 8).

Por fim, há as ligações rígidas, também conhecidas como engastadas. De acordo com Barbeiro (2018), este tipo de ligação se caracteriza pelo seu fator de restrição à rotação (α) maior que 0,85, o que possibilita considerá-la como uma estrutura moldada *in loco*. Ela transmite momentos fletores e esforços cortantes sofridos pela viga para o pilar, exigindo maior detalhamento e controle.

Para obter uma ligação rígida, realiza-se a concretagem do nó existente entre o pilar e a viga, por meio dos arranques existentes em seus elementos. Seu uso se dá quando se torna necessário diminuir a deformação lateral da estrutura, resultante dos esforços horizontais, o que proporciona uma melhor distribuição dos esforços e, por consequência, melhora a estabilidade global da estrutura (Barbeiro, 2018).

Segundo Tomim (2019), a estabilidade estrutural da edificação fica a cargo dos pilares engastados na fundação, do grau de rigidez da ligação viga-pilar.

2.2. Principais pesquisas realizadas

Sabe-se que o estudo das ligações viga-pilar iniciou nas estruturas metálicas por volta de 1917, entretanto Elliott *et al.* (1998) indica uma linha do tempo entre 1960 e 1970 para o início dos estudos em estruturas pré-moldadas de concreto no âmbito do comportamento das ligações articuladas ou rígidas. Segundo abordam Chastre e Lúcio (2012), embora exista na literatura técnica um grande número de trabalhos com ensaios de ligações viga-pilar em estruturas pré-moldadas, ainda são poucos os trabalhos que visam a semirrigidez dessas ligações. Tal fato está atrelado ao maior interesse nas ligações em zonas sísmicas, nos países como EUA, Japão, Nova Zelândia e Itália.

A partir de uma releitura do trabalho de Hadade (2016), foi possível estabelecer alguns pontos marcantes no que diz respeito às iniciativas/programas que abordaram as pesquisas das ligações. Em 1986 criou-se o PCI SFRAD (*Specially Funded Research and Development*), cujo Programa PCI-1/4 (*Moment Resistant Connections*) permitiu analisar as ligações entre elementos pré-moldados mais utilizados nos EUA, sob aspectos de resistência, rigidez e ductilidade.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Nesse programa foram realizados diversos ensaios de ligações viga-pilar submetidas a carregamentos gravitacionais, laterais e cíclicos.

Na sequência, em 1990 foi criado o programa PRESSS-PCI (*Precast Structural Seismic System*), o qual envolveu universidades dos EUA e Japão por 10 anos. O programa foi direcionado ao desenvolvimento de ligações especiais, resistentes e dúcteis em sistemas pré-moldados para zonas sísmicas. O projeto abordou questões como: definições e diretrizes básicas, projetos, ensaios de ligações e ensaios de estruturas de edifícios. A Figura 5 ilustra um edifício em escala real ensaiado no programa em questão.



Figura 5. Ensaio em escala real de estruturas pré-moldadas de concreto: a) Estrutura em esqueleto ensaiada durante o projeto PCI-PRESSS; b) Metodologia de projeto sísmico do diafragma testada na Universidade da Califórnia.

Fonte: Adaptado de Ferreira, Elliott e Hasan (2010)

O edifício anterior era composto por quatro diferentes sistemas de pórticos estruturais dúcteis em uma direção e um sistema de paredes estruturais articuladas na outra direção (ortogonal). Foram utilizadas ligações híbridas desenvolvidas dentro do programa PRESSS. O comportamento da estrutura testada foi satisfatório, de modo a concluir que independente da atuação sísmica ou não, é possível desenvolver pórticos pré-moldados de concreto semirrígidos não contraventados. Os resultados e recomendações dos testes realizados no programa PRESSS foram aderidos ao ACI-318 daquele período.

Ainda no ano de 1990, foi iniciado na França o programa *“Investigation of the behavior of semi-rigid connections”* através do centro de pesquisa da indústria do pré-moldado – CERIB (*Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton*). Seu objetivo foi avaliar a semirrigidez de ligações viga-pilar, viga-viga e pilar-fundação mais utilizadas pela indústria francesa, com ênfase nas ligações entre elementos estruturais de sistemas pré-moldadas em esqueleto.

Dando continuidade ao programa experimental francês, Dardare e Comair (1992) ensaiaram uma ligação viga-pilar muito empregada na França, a qual era composta de vigas apoiadas em uma almofada de graute presente no topo do pilar, e uma capa de concreto que promovia a solidarização da armadura de continuidade (negativa). Chefdebien (1998) estudou a mesma ligação variando os seguintes parâmetros: propriedades geométricas, taxa de continuidade e propriedades mecânicas. Além disso, o autor também realizou ensaios com ligação viga-pilar contendo: armadura de continuidade passante no pilar, capa de concreto, consolo trapezoidal, chumbadores e preenchimento dos chumbadores com concreto e graute. A Figura 6 ilustra as ligações viga-pilar estudadas pelos autores mencionados.

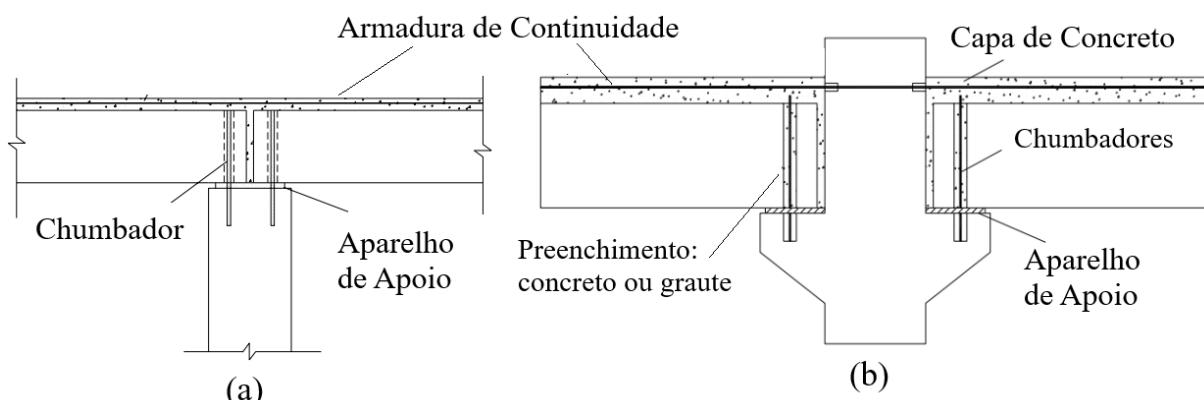


Figura 6. Ligações viga-pilar ensaiadas segundo o programa experimental CERIB: a) Ligações viga-pilar estudadas por Dardare e Comair (1992) e Chefdebien (1998); b) Ligações viga-pilar estudadas por Chefdebien (1998)
 Fonte: Adaptado de Catoia (2007)

Em 1991 foi criado o programa COST C1, que era uma divisão do COST (*European cooperation in the field of scientific and technical research*). Esse programa foi coordenado pela União Europeia que contou com a participação de 23 países e várias universidades, cujos objetivos foram: aumento do banco de dados de ensaios sobre o comportamento de ligações, empregar modelagem computacional para extrapolar resultados experimentais para um número maior de geometrias e carregamentos, padronização nas medições de rigidez na forma de curvas momento-rotação. Concluiu-se que obter expressões racionais para o comportamento das ligações é algo difícil, devido ao comportamento semirrígido não ocorrer em posição nodal única.

Como parte do programa de pesquisa COST C1, as ligações semirrígidas foram investigadas analiticamente e experimentalmente na Universidade de Nottingham (Reino Unido), sob a supervisão do Prof. Dr. Kim Elliott. Os principais resultados do programa podem ser encontrados nos anais das conferências realizadas em 1992, 1994, 1996 e 1998 bem como no relatório final COST C1 (1999). A Figura 7 ilustra algumas peças ensaiadas que contribuíram com o programa.

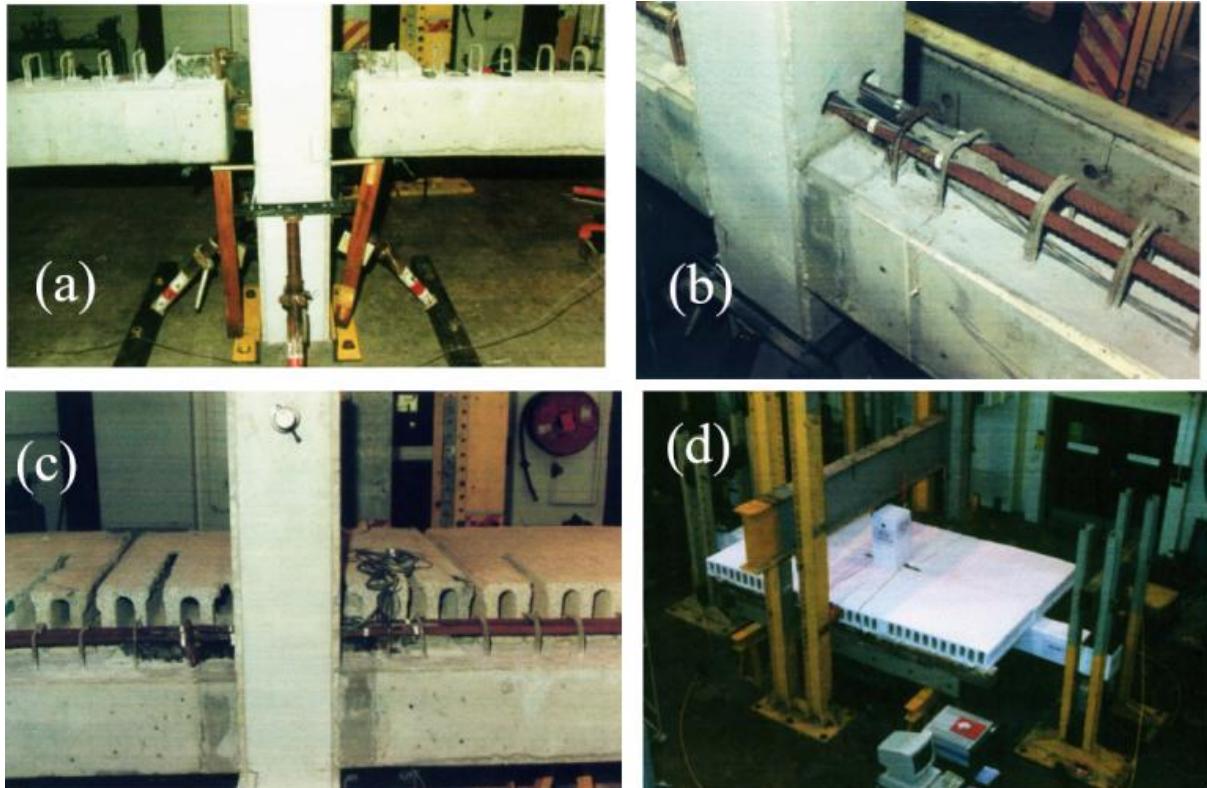


Figura 7. Ligação viga-pilar ensaiada segundo o programa experimental COST C1: a) Conexão de placas soldadas na região da ligação; b) Armadura de continuidade com extensômetros; c) Montagem do sub-pórtico; d) Esquema final de montagem no laboratório

Fonte: Adaptado de Görgün (1997)

No Brasil, a pesquisa sobre ligações semirrígidas em estruturas pré-moldadas de concreto teve início na Universidade de São Paulo – SET/EESC/USP, sob supervisão do Prof. Dr. Mounir Khalil El Debs, com abordagens analíticas e experimentais. Neste contexto, pode-se citar o trabalho de Ferreira (1993), que desenvolveu e organizou o equacionamento analítico para obter a deformabilidade de ligações viga-pilar pré-fabricados a partir da observação dos mecanismos básicos de deformação dos componentes envolvidos na região da ligação. Já em Ferreira (1999), foram estudadas duas tipologias de ligações de modo a analisar o comportamento frente a torção, flexão e cisalhamento. A partir dos resultados experimentais, foi possível a calibração das expressões anteriormente apresentadas pelo mesmo autor em 1993. A Figura 8 ilustra as tipologias de ligações estudadas pelo autor.

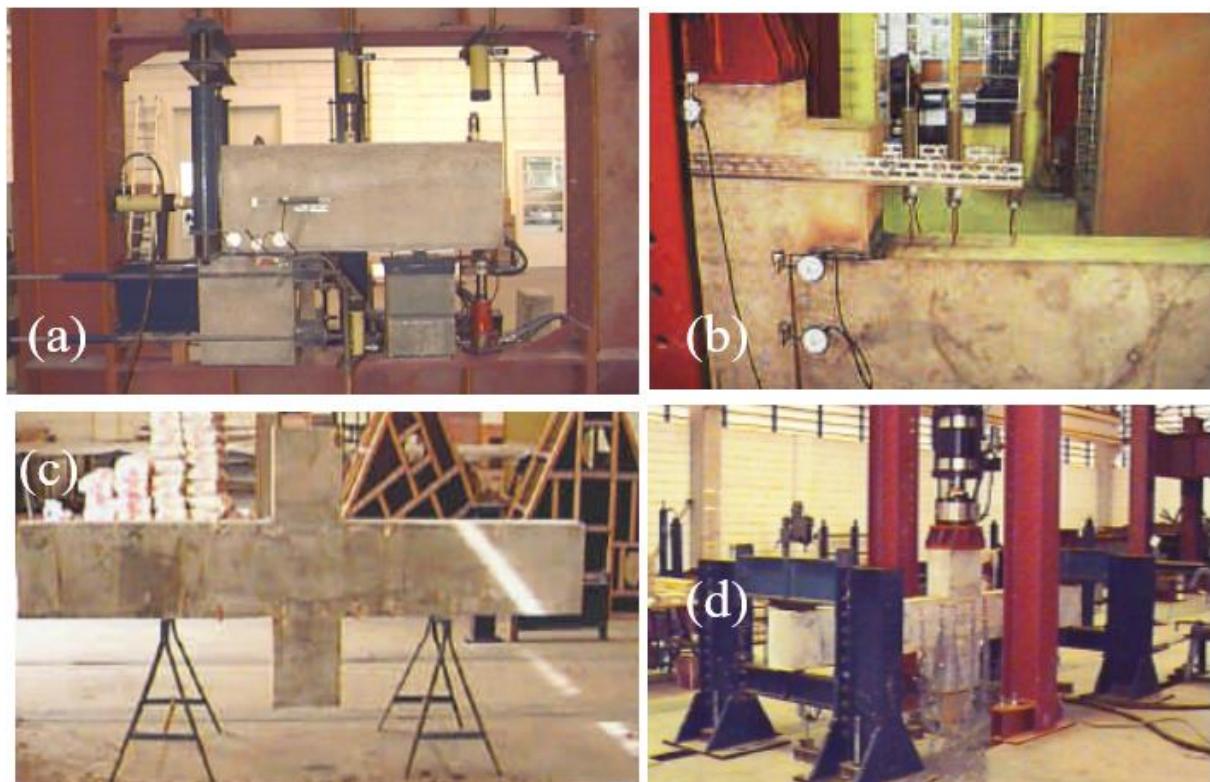


Figura 8. Protótipos de ligações viga-pilar ensaiadas: a) Ligação com almofada de elastômero e chumbador; b) Ligação com chapas soldadas; c) Modelo monolítico após desmoldagem; d) Disposição do modelo monolítico no pórtico de reação

Fonte: Adaptado de Ferreira (1999)

Dando continuidade, Soares (1998) realizou um trabalho experimental e numérico de modo a investigar a deformabilidade a momento fletor da ligação viga-pilar executada através de consolo e chumbador, tipologia esta, muito empregada em galpões pré-moldados de concreto. A Figura 9 ilustra a disposição dos elementos durante o ensaio.



Figura 9. Esquema geral de ensaio para ligação viga-pilar estudada

Fonte: Soares (1998)



A partir dos resultados obtidos pela autora, a metodologia de análise empregada na deformabilidade se mostrou consistente e o estudo numérico provou que a análise linear de ligações em elementos pré-moldados de concreto não representa o comportamento da ligação viga-pilar em serviço. Durante a simulação, diversos parâmetros foram avaliados, como: vão da viga, seções transversais das vigas e pilares e carregamentos. Com isso, a ligação em estudo chegou a mobilizar momentos de extremidade da ordem de 88% em serviço e 81% para os carregamentos últimos.

Em Miotto (2002) foram estudadas duas tipologias de ligações viga-pilar, a primeira reflete na continuidade do trabalho de Soares (1998), enquanto a segunda tipologia trata-se de uma ligação muito empregada em estruturas de edifícios com múltiplos pavimentos. Com os resultados experimentais foram propostos modelos analíticos e análise via métodos dos elementos finitos, no qual foi possível obter curvas momento-rotação.

Assim, concluiu-se que a primeira ligação estudada mobilizou um momento da ordem de 90% do equivalente a uma ligação monolítica, enquanto a segunda ligação garantiu boa transferência de momento fletor. Ao considerar a semirrigidez dessa ligação na análise estrutural a partir dos modelos numéricos realizados, há uma redução significativa no momento na base dos pilares mais solicitados, o que permitiu uma redução na armadura dos pilares e nas dimensões da fundação.

Além desses pontos, Miotto (2002) comenta que no caso da ligação somente composta por chumbador e almofada de apoio, houve um perda gradual da rigidez da ligação após a plastificação do chumbador. Com relação a acomodação da ligação, a autora constatou que a utilização da almofada de apoio diminui tal efeito, o que acaba repercutindo nos gráficos de momento-rotação. A Figura 10 ilustra as tais ligações.

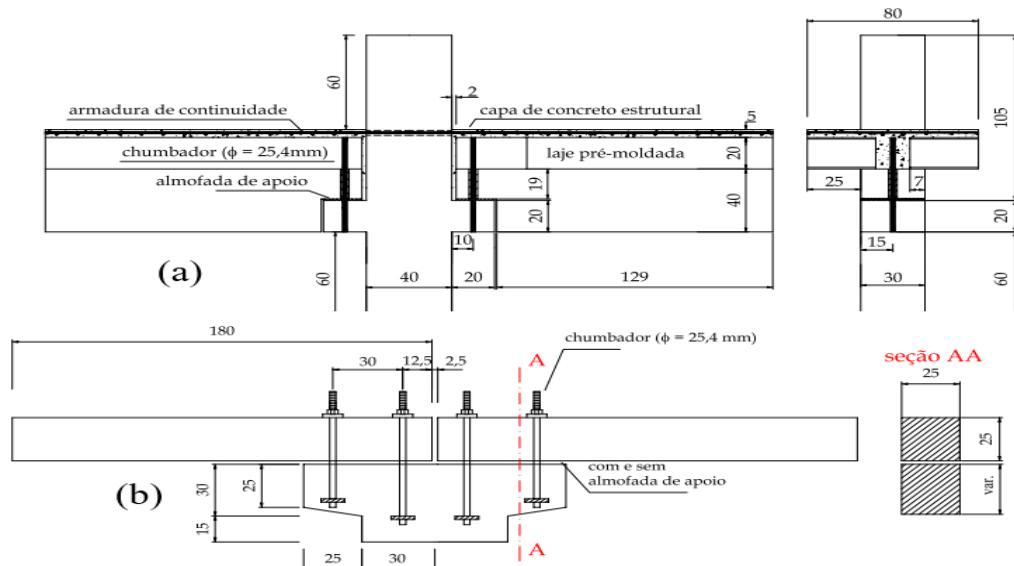


Figura 10. Protótipos de ligações viga-pilar ensaiadas: a) Esquema em elevação e seção transversal da ligação viga-pilar com continuidade da armadura; b) Esquema em elevação e seção transversal da ligação viga-pilar contendo chumbador, almofada e viga

Fonte: Adaptado de Miotto (2002)

Outro trabalho importante que deu sequência na mesma vertente de estudo foi o de Baldissera (2006), em que visou na análise experimental da mesma ligação estudada por Miotto (2002) retratada na Figura 10 (a). No entanto, com a utilização de chumbadores inclinados fixados na viga por meio de porcas e arruelas. Ao realizar seu programa experimental, Baldissera (2006) obteve um aumento superior a 2,5 vezes no momento de plastificação e 2 vezes na rigidez quando comparado aos resultados de Miotto (2002). A Figura 11 ilustra uma ligação viga-pilar com armadura de continuidade e chumbadores inclinados.

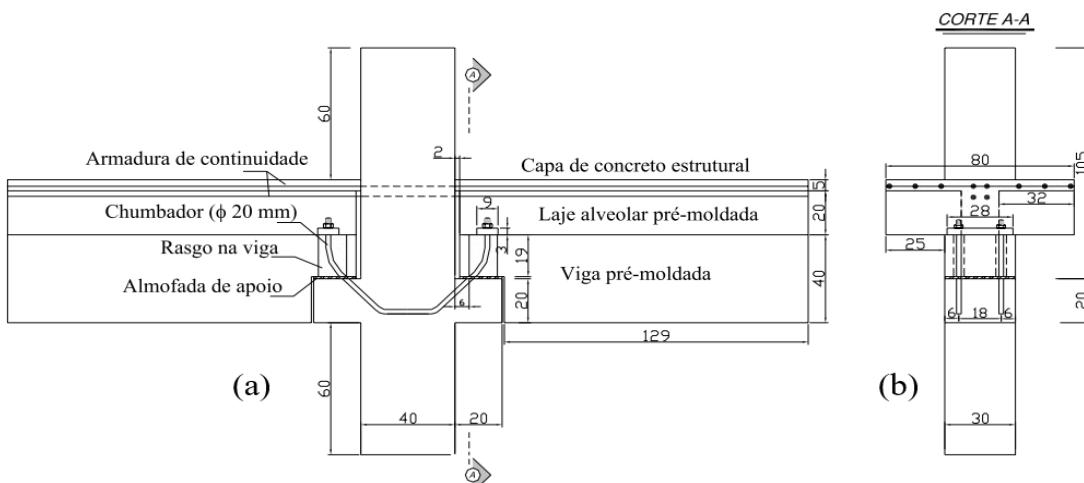


Figura 11. Ligação viga-pilar com chumbadores inclinados: a) Esquema em elevação; b) Seção transversal na região da ligação

Fonte: Adaptado de Baldissera (2006)

Existem diversos trabalhos que também foram realizados na mesma instituição com o enfoque em análises experimentais, analíticas e numéricas. Em Mota (2009), há diversas contribuições para o projeto de estruturas pré-moldadas de concreto, sendo: automatização na obtenção da rigidez da ligação com base em mecanismos resistentes, efeitos da não linearidade física e geométrica na estabilidade global e efeitos dependentes do tempo. Ainda no âmbito analítico, Marín (2009) contribuiu para a análise da estabilidade em estruturas pré-moldadas de concreto em que as ligações apresentavam continuidade na armadura, entre suas contribuições destaca-se, avaliação de parâmetros de projeto no tocante a redução da rigidez dos elementos estruturais em função da não linearidade física. Além disso, o autor também se preocupou em avaliar a influência de: efeitos reológicos do concreto, armadura ativa nas vigas, combinações E.L.U/E.L.S, utilização de seção composta, ligação semirrígida pilar-fundação etc.

Aguiar (2010) elaborou uma pesquisa voltada diretamente para a resistência e rigidez da ligação viga-pilar a momento fletor positivo contendo armadura superior contínua, em que contou com modelagens numéricas, métodos de ensaio e propostas analíticas, a fim de prever o comportamento com a presença de chumbadores grauteados inclinados e perpendiculares. Na sequência podemos citar os trabalhos de Soares (2011) e Bellucio (2016) que contribuíram respectivamente para a análise dos efeitos dependentes do tempo em vigas pré-moldadas de concreto armado e protendido e ao desenvolvimento de ligações viga-pilar com concreto de alto desempenho. A Figura 12 ilustra as ligações estudadas por Bellucio (2016).

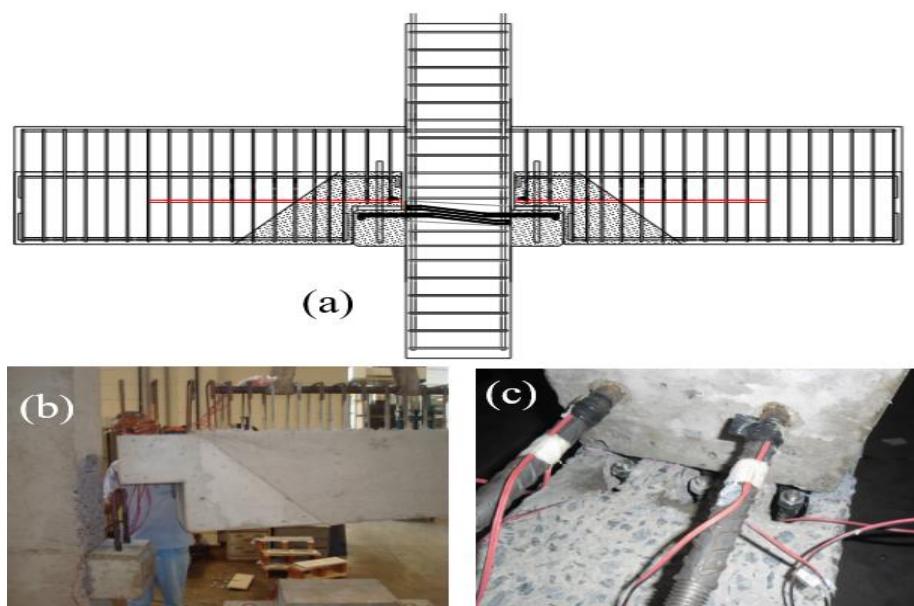


Figura 12. Ligação viga-pilar contendo dente composto de concreto com fibras: a) Disposição das armaduras do modelo; b) Posicionamento da viga; c) Detalhe do transpasse das barras

Fonte: Adaptado de Bellucio (2016)

Ainda no âmbito dos programas brasileiros que se dedicaram a estudar ligações semirrígidas, destaca-se a Universidade Federal de São-Carlos – UFSCar. Nos anos de 2004-2007 houve a realização de um programa especial de pesquisa intitulado “Comportamento de Estruturas Pré-Moldadas de Múltiplos Pavimentos com ligações Semirrígidas”, sob a coordenação do Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira, patrocinado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. Ainda, houve um convênio no ano de 2005, com a Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto – ABICIC, o qual resultou na construção de um laboratório para estudo do concreto pré-moldado, conhecido como NETPre – Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto.

Dentre os trabalhos experimentais realizados no NETPre, Kataoka (2007) visou estudar a caracterização do comportamento da ligação laje-viga-pilar com armadura de continuidade passante dentro do pilar e lateralmente na capa da laje. Foram ensaiados 2 modelos, sendo o primeiro com 100% de sua armadura de continuidade passando pelo pilar, já o segundo, apenas 50% da armadura passou no interior do pilar e o restante foi disposto nas laterais do pilar contribuindo para o aumento da rigidez à flexão em serviço além de controlar o estado de fissuração. A Figura 13 ilustra os modelos ensaiados pela autora, bem como a disposição das armaduras de continuidade.

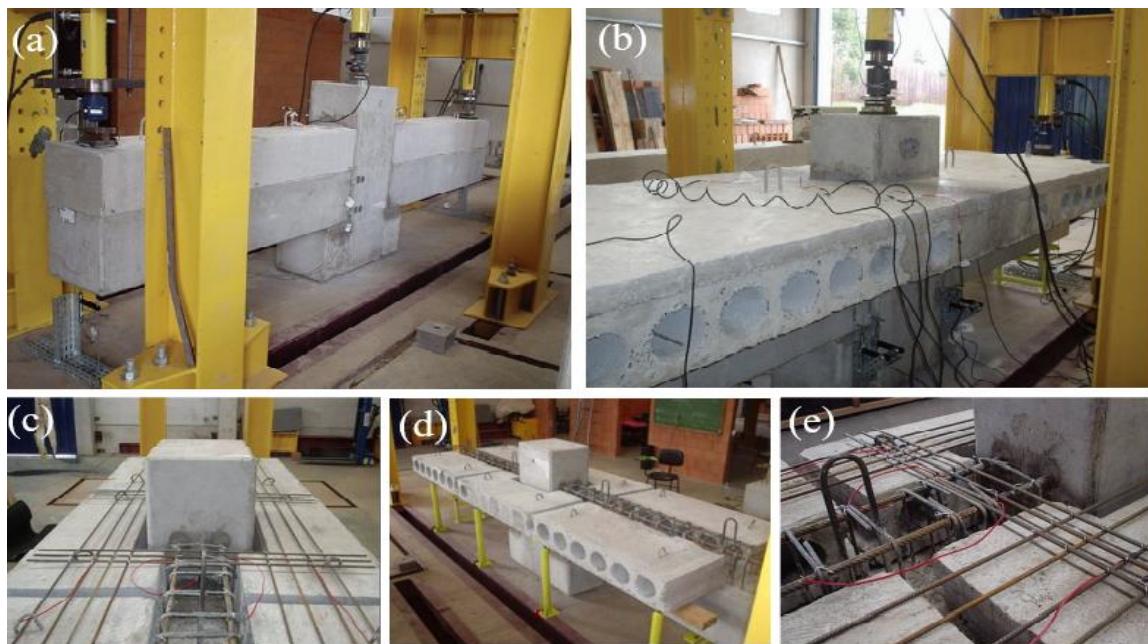


Figura 13. Ensaio realizado no laboratório NETPre: a) Modelo 1 sem laje alveolar; b) Modelo 2 com laje alveolar; c) Posicionamento das armaduras de costura na capa da laje alveolar

Fonte: Adaptado de Kataoka (2007)

Na sequência das pesquisas experimentais, Souza (2006) e Catoia (2007) verificaram o comportamento de ligações semirrígidas com uso de luvas rosqueadas e armadura ancorada em pilares de extremidade. No primeiro, o autor constatou que o comportamento das vigas pré-moldadas de concreto armado foi influenciado pelo desempenho da rigidez à flexão das suas ligações viga-pilar. Outro ponto importante, é a complexidade oriunda da interdependência das não linearidades (fissuração da viga e relação momento-rotação nas ligações).

Já nos modelos estudados em Catoia (2007), notou-se um bom desempenho para a aplicação do tipo de ligação em pórtico, devido à capacidade de restrição à rotação da ligação semirrígida em E.L.U, que quando comparada a rotação de uma extremidade livre apresentou um valor da ordem de 60% - 70%. Com este trabalho foi possível avaliar o engastamento parcial para os momentos negativos mobilizados pelas ligações e integrar análises teóricas a partir da metodologia experimental empregada. A validação de métodos analíticos trata-se de uma prática fundamental para fornecer equacionamentos consistentes que permite aos engenheiros o comportamento do elemento a ser dimensionado. A Figura 14 ilustra os 2 modelos de ligação estuda por Catoia (2007), sendo a primeira com vinculação apenas apoiada e a segunda com semirrigidez promovida pela ligação viga-pilar.

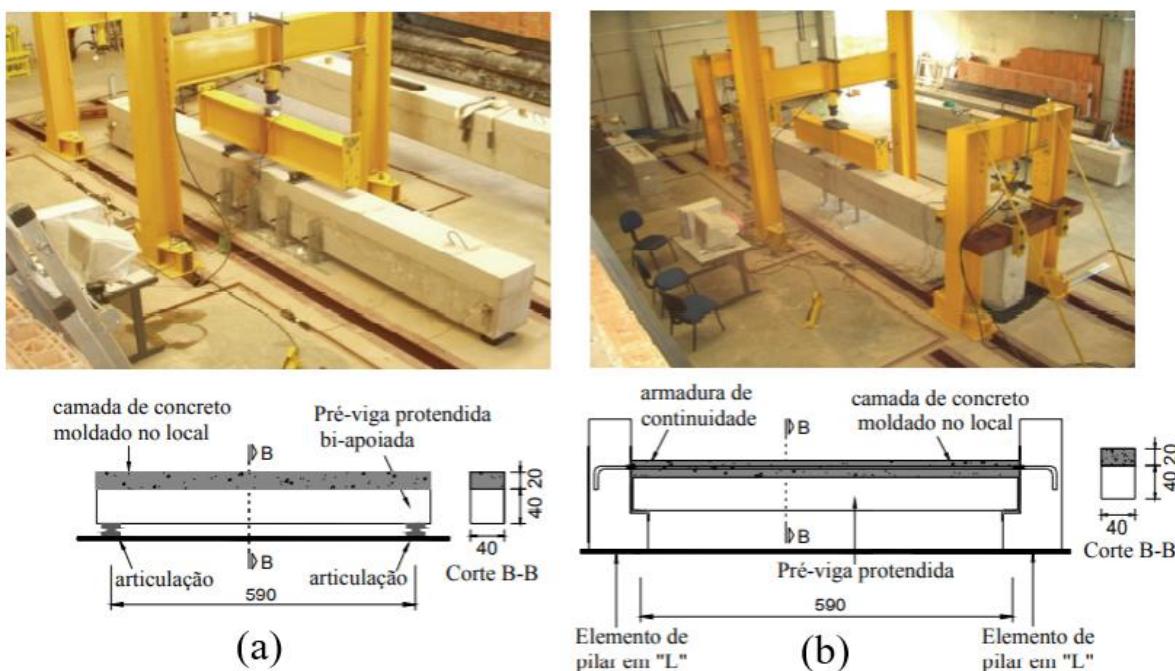


Figura 14. Ensaio realizado no laboratório NETPre: a) Ensaio de viga bi-apoiada protendida; b) Ensaio de vigas bi-apoiada protendida com ligações semirrígidas
 Fonte: Adaptado de Catoia (2007)

Além desses trabalhos, outras pesquisas foram frutos desse programa, os quais também realizaram abordagens experimental, numérica e analítica como é o caso de Jeremias (2007), Ferreira *et al.* (2007), Bertolocci (2010) e Bachega (2013).

De modo geral, a partir dos resultados que são obtidos nas pesquisas experimentais é possível calcular a rigidez secante da ligação, a qual reflete na semirrigidez da ligação viga-pilar. Então, o comportamento semirrígido de uma ligação é representado pela rigidez secante a curva momento-rotação, dentro do limite da fase elástica ou plástica da armadura tracionada a depender da filosofia de projeto adotada no tocante a deformação da armadura longitudinal.

A filosofia de projeto dependerá da região em que a estrutura estará contida, ou seja, regiões sísmicas ou não sísmicas. Para o primeiro caso, trata-se do critério plástico, o qual pode ser traduzido como a capacidade de deformação plástica em E.L.U (desempenho dúctil) não contemplando a fase de pré-escoamento da armadura. Já para a segunda situação, as ligações devem ser dimensionadas para resistir aos momentos elásticos, limitando a deformação ao início do escoamento da armadura. A Figura 15 ilustra a metodologia de cálculo para obtenção da reta secante em regiões sísmicas e não sísmicas.

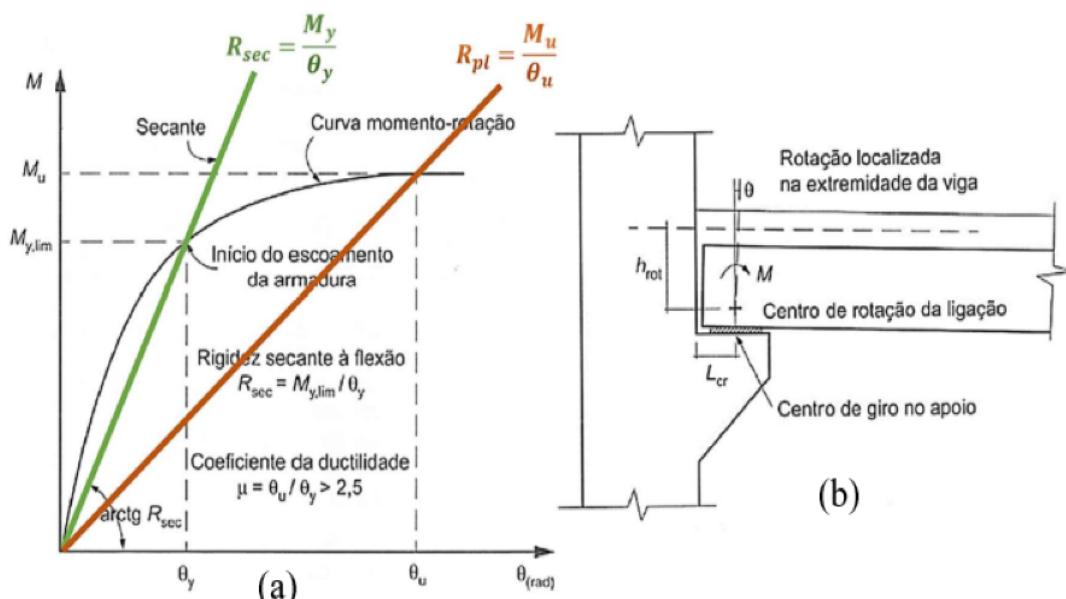


Figura 15. Curva momento-rotação de uma ligação viga-pilar: a) Retas para obtenção da rigidez secante em zonas sísmicas e não sísmicas; b) Ligação viga-pilar com continuidade da armadura superior

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9062 (2017)

A partir da figura anterior e se tratando de uma estrutura de concreto, fica claro que a resposta da rotação para um dado momento na ligação não é linear. Nesse sentido, a ligação apresenta uma não linearidade física em virtude da não linearidade dos materiais que a compõem.



Com isso, existe a necessidade de que os modelos matemáticos que retratam o comportamento das ligações em estruturas pré-moldadas de concreto apresentem essa resposta, seja por meio de um equacionamento mais robusto ou através de coeficientes de ajuste, temas estes que serão discutidos ainda nesse capítulo.

Sobre essa resposta não linear, Barros (2018) comenta que após o aparecimento da fissuração se inicia a não linearidade da curva momento-rotação, que é acentuada com a propagação e estabilização de fissuras, especialmente no caso de ocorrência de fissuras verticais e diagonais combinadas. O alongamento das barras no trecho fissurado mostra um aumento de forma significativa devido ao somatório de escorregamentos localizados entre armadura e regiões de concreto fissuradas. A partir disso, o mecanismo por alongamento é responsável pela liberação de rotações, ocasionando a diminuição da rigidez da ligação na descontinuidade da curvatura na extremidade da viga pré-moldada.

Em Sawasaki (2010) foi realizado um programa experimental para o estudo do comportamento de ligações viga-pilar tipicamente utilizadas em galpões pré-moldados de concreto. Os modelos ensaiados apresentavam escala reduzida 1:2 submetidos a momento fletor negativo/positivo com as seguintes características físicas:

- I. Modelo 1: Chumbadores de aço CA-25 com 12,50 mm e almofada de compósito de argamassa (150x150x10 mm) e 40 cm de largura para o pilar;
- II. Modelo 2: Chumbadores de aço CA-25 com 12,50 mm e almofada de compósito de policloropreno (150x150x10 mm) e 40 cm de largura para o pilar;
- III. Modelo 3: Chumbadores de aço CA-50 com 12,50 mm e almofada de compósito de argamassa (150x150x10 mm) e 40 cm de largura para o pilar;
- IV. Modelo 4: Chumbadores de aço CA-50 com 12,50 mm e almofada de compósito de argamassa (150x150x10 mm) e 60 cm de largura para o pilar.

A Figura 16 ilustra as dimensões das peças que foram ensaiadas.

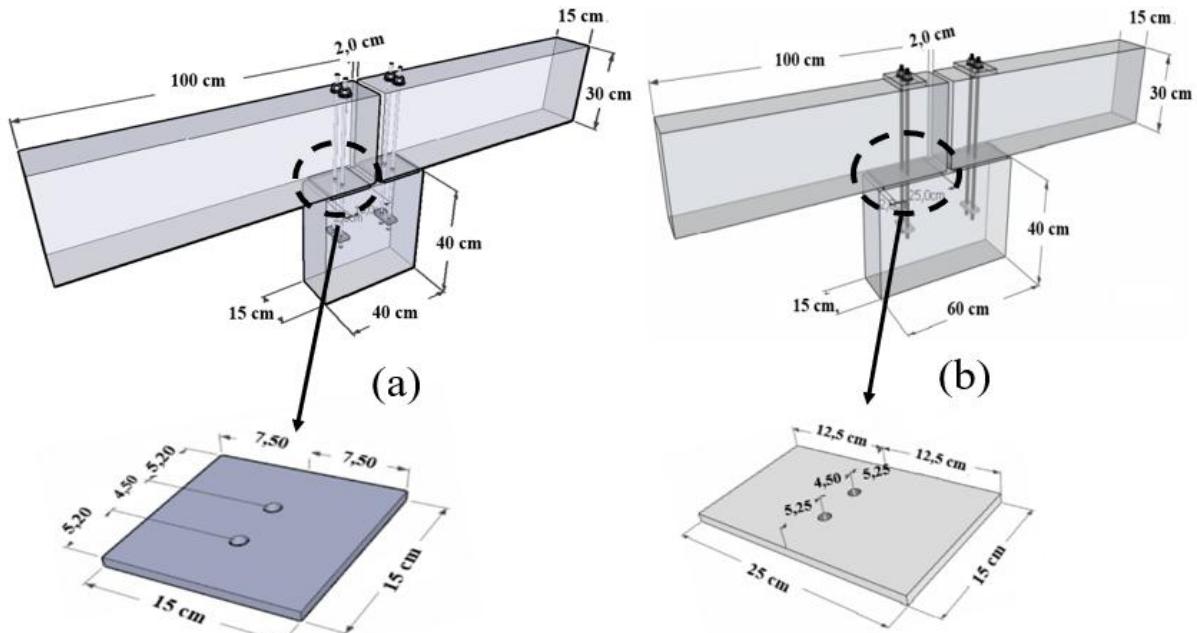


Figura 16. Modelo de ligação viga-pilar ensaiada: a) Dimensões dos modelos 1, 2 e 3; b) Dimensões do modelo 4

Fonte: Adaptado de Sawasaki (2010)

Após os ensaios, foi obtida a rigidez secante da ligação bem como o momento último e com esses valores foram realizadas comparações com soluções analíticas propostas pelos autores. Para o modelo 4, se apresenta a vinculação mais representativa, houve uma divergência significativa entre o valor experimental e analítico. A Figura 17 ilustra o arranjo das peças durante o ensaio.

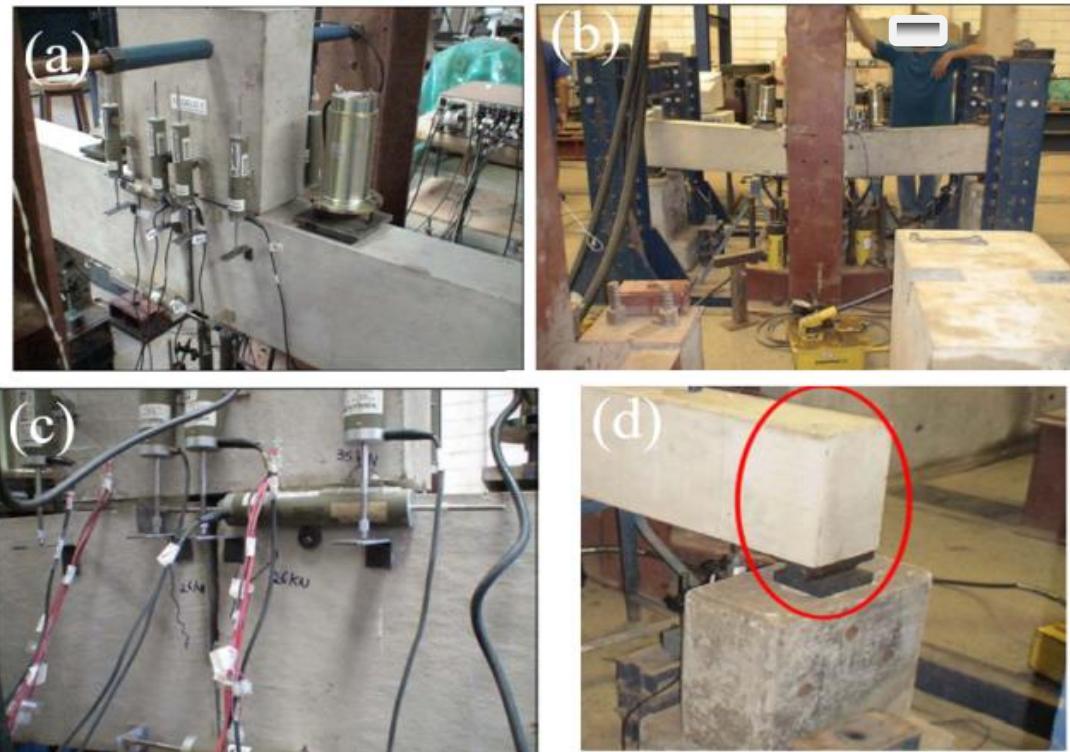


Figura 17. Arranjo dos modelos de ligação ensaiadas: a) Modelo 1; b) Modelo 2; c) Modelo 3; d) Modelo 4.

Fonte: Adaptado de Sawasaki (2010)

O autor também realizou simulações em um pórtico plano considerando a semirrigidez de uma ligação típica, em que se obteve uma redução de até 21,8% do momento fletor na base dos pilares para galpão pré-moldado contendo 4 chumbadores. Já com relação aos deslocamentos horizontal, houve uma redução de até 32,8%.

No mais, percebe-se que uma gama de estudos envolvendo o comportamento de ligações viga-pilar é voltada para edifícios de múltiplos pavimentos, enquanto para os galpões pré-moldados de concreto ainda há uma carência de estudos no Brasil. Após uma releitura de Otrente (2023), foi possível identificar uma tendência de aplicação de ligação parafusadas em estruturas pré-moldadas de concreto devido à sua facilidade de aplicação e pela ausência de concreto na efetivação da ligação, sendo assim intituladas de ligação secas.

Com o intuito de propor um novo sistema de ligação parafusado de alta resistência, Ma *et al.* (2019) estudaram o desempenho mecânico de uma ligação seca por meio de um experimento pseudo-estático. As peças ensaiadas são retiradas de um pórtico da Figura 2.60 (a) sem vigas secundárias e com altura de piso de 4,20 m, contendo um pilar de 8,4 m de vão e seção transversal de 75 cm x 75 cm com concreto de classe C80. A viga apresenta seção transversal de 40 cm x 75 cm e concreto de classe C40. Já com relação aos parafusos, empregou-se 8 unidades

de alta resistência com 30 mm de diâmetro e grau 8.8. A Figura 18 ilustra o pórtico bem como a ligação semirrígida em estudo.

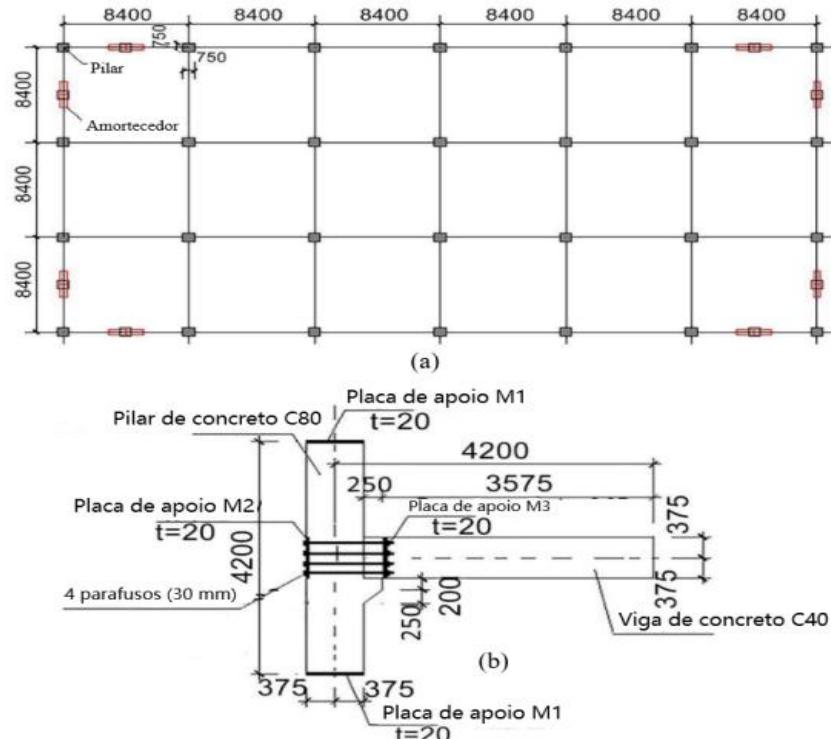


Figura 18. Galpão pr-emoldado de concreto analisado: a) Modulação da estrutura;
 b) Esquema da ligação viga-pilar
 Fonte: Adaptado de Ma *et al.* (2019)

O método de duplo controle carga-deslocamento foi adotado no ensaio, de acordo com o Código de Ensaios Sísmicos para Edificações JGJ/T101 (2015). Na fase inicial de carregamento, as deformações não se alteraram significativamente, ao passo que a primeira fissura (0,1 mm) apareceu na extremidade da viga devido ao carregamento de + 30 kN (sentido de aplicação para baixo). O controle da carga foi de 5 kN e ciclado uma vez, com carga de pico final de + 82 kN com deslocamento correspondente de + 78 mm, enquanto a carga final apresentou magnitude de + 72 kN e deslocamento de + 134 mm. Durante o ensaio não houve fissuras no pilar e após o escoamento da viga pré-moldada de concreto, o valor da tensão nos parafusos ligados de alta resistência não atinge a resistência ao escoamento. A Figura 19 ilustra o panorama de fissuração da ligação após o ensaio, bem como a comparação dos resultados obtidos com a simulação numérica realizado no programa ANSYS.

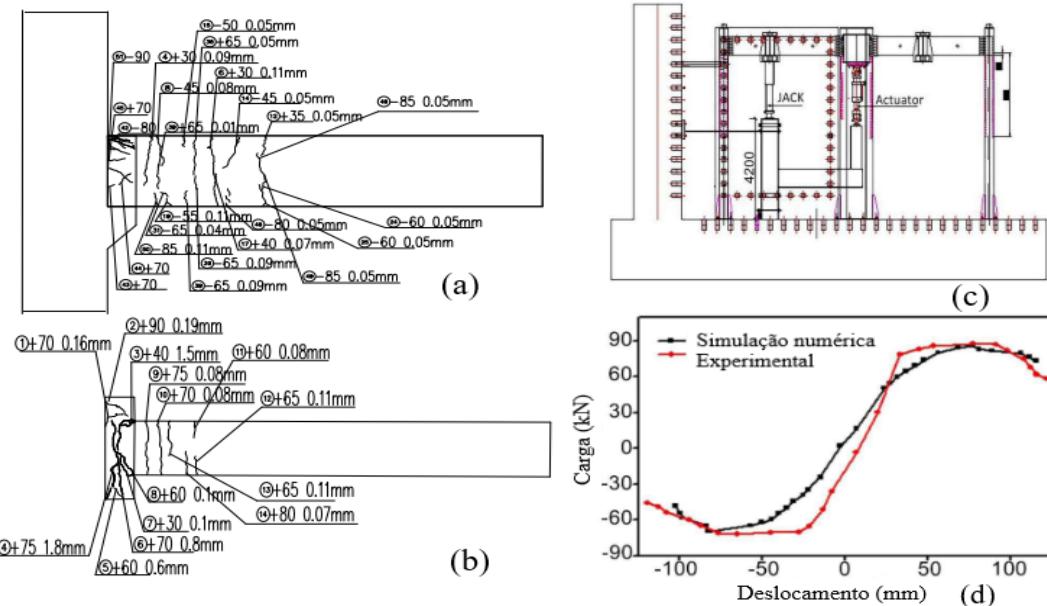


Figura 19. Panorama de fissuração após o ensaio: a) Diagrama de distribuição de fissuras na lateral da viga; b) Diagrama de distribuição de fissuras no topo da viga; c) Esquema do ensaio; d) Evolução dos deslocamentos com a carga aplicada.

Fonte: Adaptado de Ma *et al.* (2019)

A partir dos resultados obtidos, Ma *et al.*, (2019) concluem que a ligação estudada apresenta alta rigidez de rotação e uma quantidade razoável de ductilidade. Outro ponto importante é que devido à alta resistência dos parafusos e ao fato de que a interseção viga-pilar de concreto é facilmente extrudada sob maior carga, a extremidade da viga de concreto é passível de ruína primeiro antes que os parafusos falhem. Ainda, os autores comentam que a ligação é estruturalmente resistente a sismos devido a absorção de energia sob ação de baixa carga cíclica repetida.

Outros autores também realizaram estudos voltados para o comportamento das ligações viga-pilar parafusadas (Dry Connection) em pórticos pré-moldados de concreto submetidas a ações cíclicas, como é o caso de Zhang *et al.*, (2022), Jung *et al.*, (2023), Liu, Liu e Yu (2023), Chang, Zhang e Gu (2023). No entanto, poucos estudos se voltam para a melhoria da deslocabilidade de traves deslocáveis em concreto pré-moldado (galpões) em zonas não sísmicas.

Essa defasagem resulta na incerteza do comportamento das ligações típicas empregadas em galpões, de modo que o projetista acaba desconsiderando uma possível capacidade de mobilização de esforços e melhoria no efeito global da estrutura, uma vez que não se conhece a real contribuição da rigidez dessas ligações. Na sequência, será evidenciada qual a prática de projeto no Brasil para a consideração da rigidez em ligações viga-pilar pré-moldadas de concreto, segundo as normativas vigentes.

2.3. Projeto de ligações semirrígidas no Brasil

No Brasil, o conceito de rigidez secante visa traduzir a não linearidade associada ao comportamento das ligações semirrígidas em serviço. Conforme concluíram Ferreira e Elliott (2002), a rigidez para a seção da peça fissurada é muito bem representada pela reta secante no trecho entre o momento de fissuração e o momento anterior ao escoamento da armadura de continuidade ($M_r \leq M \leq M_{y,lim}$).

Do ponto de vista da mecânica das estruturas, as ligações semirrígidas atuam como molas rotacionais nas extremidades das vigas pré-moldadas. Esse efeito, de rotação parcial da extremidade, tem influência em diversos aspectos nos elementos estruturais e no edifício em um âmbito global. De modo geral, o fato dessa ligação mobilizar uma quantidade de momento de engastamento perfeito, entende-se como efeito imediato na redistribuição elástica dos esforços solicitantes, além de aumentar a flexibilidade da estrutura. A Figura 20 ilustra alguns desses aspectos.

EFEITOS DAS LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS

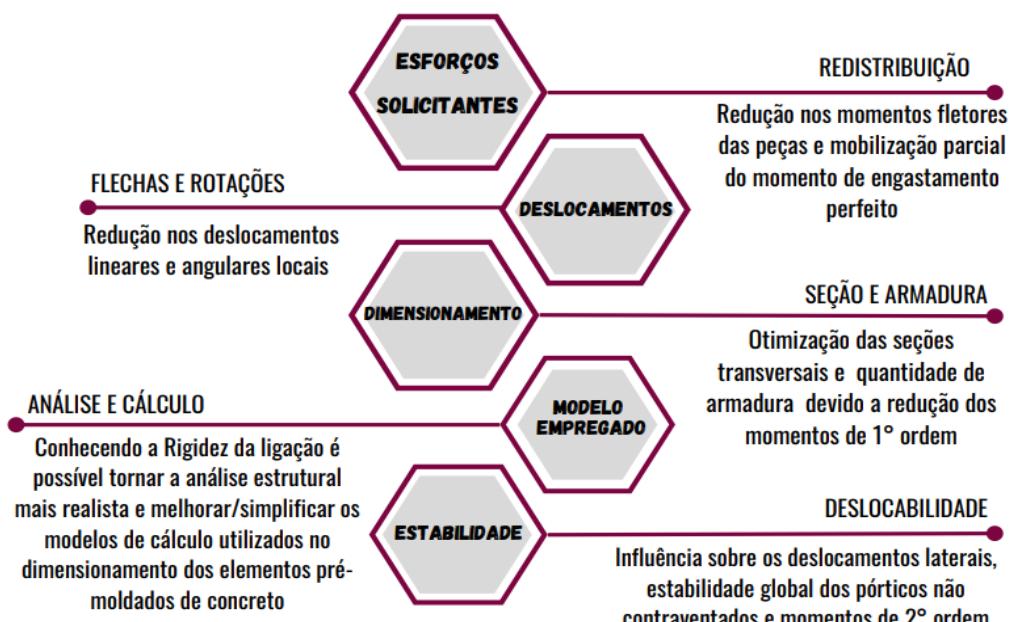


Figura 20. Aspectos influenciados pela semirrigidez promovida pela ligação

Fonte: Otrente (2024)

Alguns autores se dedicaram a estudar modelos analíticos para o cálculo da rigidez de ligações viga-pilar em concreto pré-moldado. É importante destacar a necessidade de modelos que representem adequadamente a rigidez das ligações, de modo a conduzir a um dimensionamento adequado das peças perante a real distribuição de esforços na estrutura e

representar uma análise da estabilidade global mais fidedigna. Elliott *et al.*, (2003) apresentaram uma abordagem teórica na tentativa de descrever o comportamento semirrígida via Equação 1.

$$R_{rot} = \frac{M_{lig}}{\theta_{lig}} \quad 1)$$

Onde:

M_{lig} – Representa o momento resistente da ligação;

θ_{lig} – Representa a rotação relativa da ligação devido ao momento M_{lig} .

Nesta análise, considera-se que a rotação relativa inclui todos os efeitos de não linearidade que contribuem com a rotação total da ligação. Além disso, também se considera que todos os componentes da ligação atingem seu limite de escoamento ou ruptura. No caso das armaduras de continuidade, considera-se que a armadura tenha escoado para uma tensão normal da ordem de ($f_{yk} \cdot A_s$) para o cálculo da rigidez secante da ligação.

Segundo Chastre e Lúcio (2012), outro aspecto importante para a modelagem da configuração deformada de uma ligação viga-pilar pré-moldada é a presença e a geometria dos consolos de concreto, o que influencia na posição do centro de rotação (C.R) na extremidade da viga e, consequentemente, afeta o modelo biela-tirante e os mecanismos básicos de deformação dentro da zona da ligação na extremidade da viga. A Figura 21 ilustra a influência do consolo na posição do C.R.

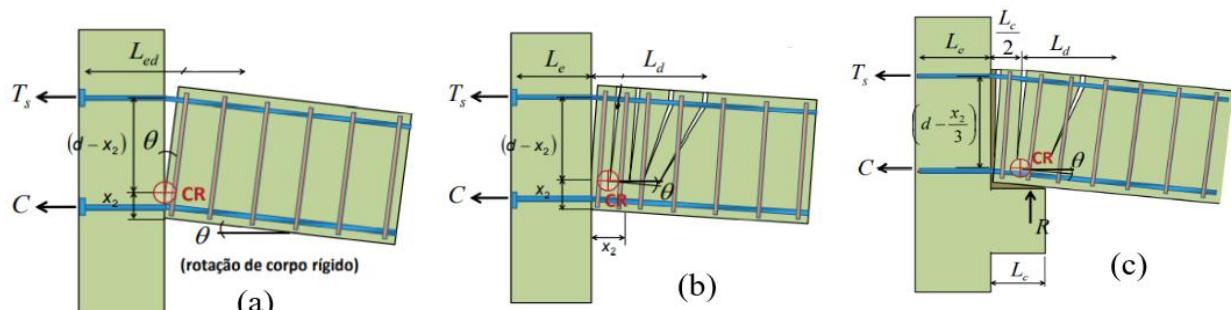


Figura 21. Idealizações para mecanismos de deformações: a) Fissura discreta na interface; b) Zona de transição com espalhamento de fissuras verticais e diagonais; c) Presença de consolo na região da ligação

Fonte: Adaptado de Ferreira (2010)

A parcela da rotação na interface viga-pilar está associada ao mecanismo de deformação das armaduras de continuidade, o qual depende das condições de ancoragem, o que podem ser influenciadas pelo diâmetro da armadura, da resistência à tração do concreto e das condições de

confinamento da armadura. Elliott *et al.*, (2003) complementam que a rotação final é proveniente de três parcelas, sendo:

- I. Rotação na interface viga-pilar devido a abertura da junta na ligação;
- II. Deformação rotacional da viga na região da ligação, devido à curvatura da viga ao longo de um comprimento de rótula plástica;
- III. Deformação rotacional do pilar na região da ligação devido à curvatura do pilar.

Como foi possível perceber, existe diversos parâmetros que afetam no comportamento da ligação, sendo necessários estes estarem contemplados nos modelos analíticos. Assim, existe uma preocupação muito grande com relação a calibração dessas expressões de modo a computador os efeitos observados e mensurados durante os testes experimentais. Nesse ínterim, Ferreira (2001) propõem um equacionamento para a rotação relativa entre a viga e o pilar determinada no início do escoamento da armadura, tal expressão leva em consideração diversos parâmetros, como: módulo de elasticidade do aço/concreto, altura útil, momento de escoamento, inércia, comprimento de embutimento e comprimento das rótulas plásticas. A Figura 22 ilustra o comprimento de embutimento para diferentes arranjos e solicitações de momento fletor.

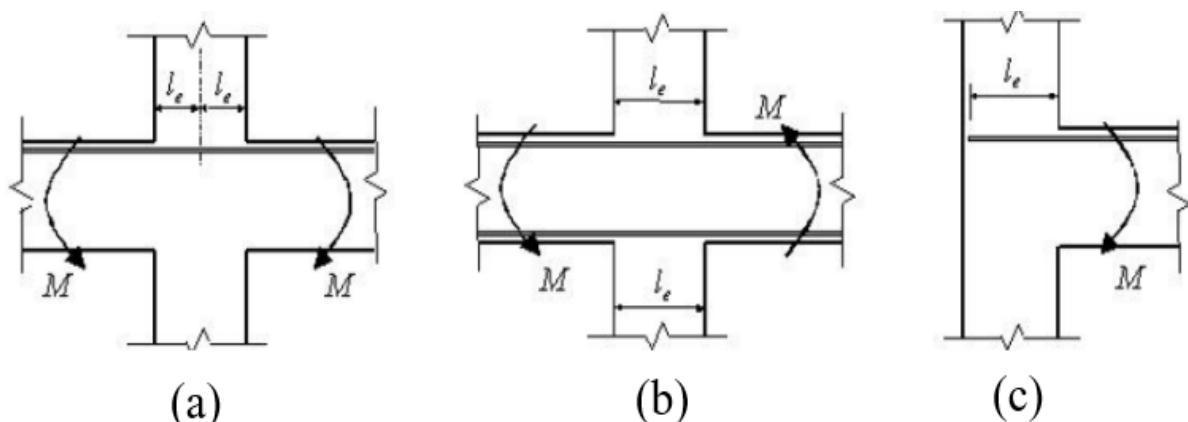


Figura 22. Comprimento de embutimento: a) Ligação central com momentos fletores negativos; b) Ligação central com momentos fletores alternados; c) Ligação de canto com momento fletor negativo

Fonte: Adaptado de Ferreira, El Debs e Elliott (2003)

Em Ferreira, El Debs e Elliott (2002), consta um procedimento de cálculo para uma viga com ligações semirrígidas considerando o E.L.U e posteriormente uma avaliação para o E.L.S. A marcha de cálculo para esse procedimento pode ser encontrada também em Souza (2006).

A normativa brasileira ABNT NBR 9062 (2017) emprega a Equação 2 para o cálculo da rigidez secante à flexão negativa em ligações viga-pilar com armadura de continuidade no local, considerando o limite da tensão nesta armadura igual a $\sigma_s \leq f_{yk}$.

$$R_{sec} = k \cdot \left(\frac{A_s \cdot E_s \cdot d^2}{L_{ed}} \right) \quad 2)$$

Onde:

k – Representa o coeficiente de ajustamento da rigidez secante conforme a Tabela 2.4;

L_{ed} – Representa o comprimento efetivo de deformação por alongamento da armadura de continuidade conforme a Tabela 1;

d – Representa a altura útil da seção resistente na ligação negativa;

E_s – Representa o módulo de elasticidade do aço;

A_s – Representa a quantidade de armadura de continuidade negativa, respeitando o limite M_y conforme o item 5.1.2.9 da ABNT NBR 9062 (2017).

Tabela 1. Valores normativos para os parâmetros k e L_{ed}

Tipologia	1	2	3	4	5	6
k	0,75	1,00	0,75	-	0,85	0,75
L_{ed}	$25 \cdot \phi + L_a$	$20 \cdot \phi + L_a$	$30 \cdot \phi + L_a$	-	$30 \cdot \phi + L_a$	$25 \cdot \phi$ (bainha grauteada) $30 \cdot \phi$ (luvas rosqueadas)

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9062 (2017)

A Figura 23 ilustra o comprimento efetivo de deformação da armadura, bem como a distância da face do pilar até o centro de rotação no consolo (La).

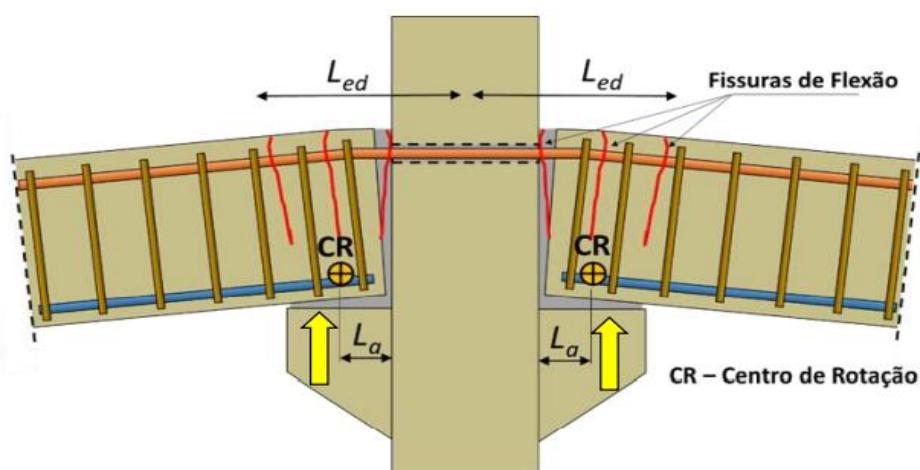


Figura 23. Mecanismo de deformação da ligação viga-pilar
 Fonte: Ferreira (2022)

A normativa em questão apresenta algumas tipologias de ligações, no qual pode-se aplicar a expressão analítica proposta. A Figura 24 ilustra as 6 tipologias presentes.

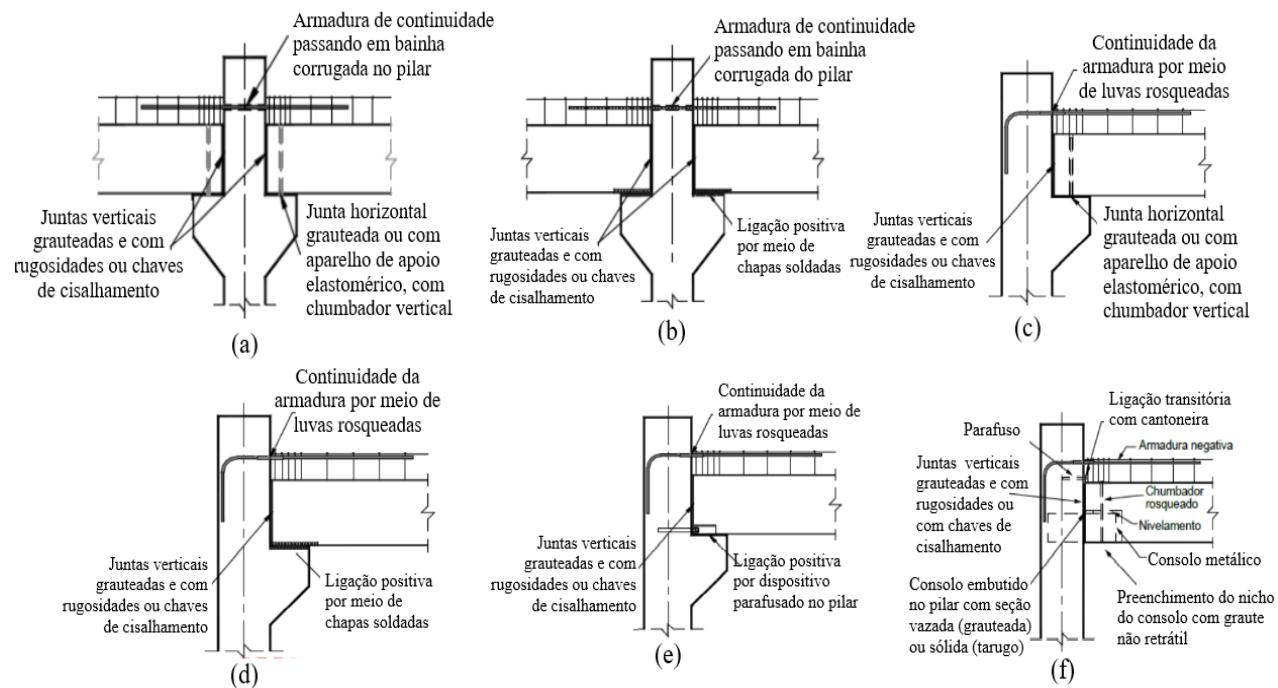


Figura 24. Comprimento de embedimento: a) Tipologia 1; b) Tipologia 2; c) Tipologia 3; d) Tipologia 4; e) Tipologia 5; f) Tipologia 6.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9062 (2017)

A expressão analítica presente nesta norma é fruto da proposta simplificada de Ferreira (2014), já o comprimento de deformação da armadura foi obtido em Ferreira, Elliott e Hasan (2010). Outros autores também se dedicaram a calibrar essas expressões/parâmetros de normas, como é caso de Hadade (2016), Hadade *et al.*, (2017) e Barros (2018).

Outro ponto importante quando se estuda ligações semirrígidas em elementos pré-moldados é a análise estrutural, que de maneira bem sistemática seria implantar o efeito da rigidez da ligação via mola rotacional, de modo a conduzir uma flexibilização dessa região e apurar seus efeitos na distribuição dos esforços solicitantes e nos deslocamentos da estrutura. Acontece que, a realização dessa análise via processo analítico ou manual pode muitas vezes inviabilizar o projeto no tocante ao tempo, então recorre-se aos programas computacionais.

2.4. Normas técnicas brasileiras aplicáveis em estruturas pré-fabricadas de concreto

As principais normas brasileiras que regem o projeto de estruturas pré-moldadas de concreto são:



- ABNT NBR 9062:2017 — Trata especificamente do projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado;
- ABNT NBR 6118:2014 — Estabelece os critérios de segurança, estados limites e durabilidade para estruturas de concreto em geral;
- ABNT NBR 16475:2017 – Painéis de parede de concreto pré-moldado – Requisitos e procedimentos
- ABNT NBR 6120:2019 — Define as ações (cargas) consideradas no projeto das edificações.
- ABNT NBR 6123:2023 – Forças devidas ao vento em edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Em relação à NBR 9062:2017, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2017), quando se refere a concreto pré-moldado, a estabilidade global é algo que deve ser garantido e, para isso, pode-se utilizar de sistemas estruturais isolados ou combinados entre si, como é o caso das estruturas estabilizadas por meio da ação de pilares engastados na fundação, que podem ser associados a vigas articuladas.

A NBR 6118:2014 dispõe, além das especificações já referenciadas, da classificação dos requisitos de qualidade de uma estrutura de concreto, correlacionando-a à “capacidade resistente”, que consiste, de forma básica, na segurança à ruptura; ao “desempenho em serviço”, que consiste na capacidade da estrutura em se manter, por toda sua vida útil, em condições plenas de uso, não podendo apresentar danos que podem comprometer parcial ou totalmente sua funcionalidade; e à “durabilidade”, que tem relação à capacidade da estrutura em resistir às influências ambientais documentadas pelo projetista estrutural, na elaboração do projeto. “Para atender aos requisitos de qualidade impostos às estruturas de concreto, o projeto deve atender a todos os requisitos estabelecidos nesta Norma e em outras complementares e específicas, conforme o caso” (ABNT, 2014, p. 14).

Por meio da NBR 16475:2017, a ABNT (2017) estabelece os requisitos e procedimentos que devem ser atendidos no projeto de produção de painéis de parede de concreto pré-moldados. Eles são classificados de acordo a forma de sua seção transversal; quanto ao seu uso; quanto ao acabamento; e quanto ao comportamento estrutural.

As ações definidas pela NBR 6120:2019 (ABNT, 2019) são classificadas como permanentes e variáveis, sendo que a primeira tem peso próprio da estrutura e peso específico dos materiais de construção para cada caso, devendo elas serem definidas, no projeto, de forma rigorosa. Já as ações variáveis demandam de estruturas que suportam as cargas variáveis a que a estrutura está sujeita, como plataformas e passarelas que recebem variadas cargas.



A NBR 6123:2023 (ABNT, 2023) elenca as forças que podem abalar as edificações, expondo os coeficientes aerodinâmicos que possibilita dar mais estabilidade à edificação.

Como observado, essas normas estabelecem parâmetros de dimensionamento, modelos estruturais admissíveis e métodos de verificação de resistência e serviço da construção civil, relevantes para adequadas ligações de viga-pilar.

3. DESENVOLVIMENTO

A fim de evidenciar a influência que uma ligação semirrígida pode promover ao engastamento da viga no pilar, será determinada a rigidez da ligação de uma viga pré-moldada de concreto de um galpão industrial. O cálculo será para cada uma das tipologias presentes na norma ABNT NBR 9062 (2017), amplamente utilizada em estruturas de múltiplos pavimentos, no entanto, não há nenhuma indicação de que essas ligações não podem ser utilizadas em galpões, apenas que deve existir a solidarização da armadura de continuidade com a presença de capa moldada no local.

Considerando uma viga pré-moldada de concreto com vão efetivo de 10 m (L_{ef}) e seção transversal retangular de (40x100) cm, $d = 95\text{cm}$, $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$, $E_s = 210 \text{ GPa}$, 4 barras de 16 mm para armadura de continuidade ($A_{s,ef} = 8\text{cm}^2$). Determina-se a rigidez dessa ligação para cada tipologia da norma e o quanto essa ligação consegue engastar a viga no pilar, para tal são utilizadas as seguintes expressões de projeto:

$$E_{cs} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) \cdot \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

$$E_{cs} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{40}{80} \right) \cdot 1,0 \cdot 5600 \cdot \sqrt{40} \cong 31875,76 \text{ MPa} = 3187,576 \text{ kN/cm}^2 \quad (4)$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{40 \cdot 100^3}{12} \cong 3333333,33 \text{ cm}^4 \quad (5)$$

$$(EI)_{sec} = \alpha_{NLF} \cdot E_{cs} \cdot I_c = 0,50 \cdot 3187,576 \cdot 3333333,33 \cong 5312626661,00 \text{ kN.cm}^2 \quad (6)$$

$$R_{sec} = k \cdot \left(\frac{A_{s,ef} \cdot E_s \cdot d^2}{L_{ef}} \right) \quad (7)$$

$$\alpha_R = \left[1 + \frac{3 \cdot (E \cdot I)_{sec}}{R_{sec} \cdot L_{ef}} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\gamma_{EP} = \left(\frac{3 \cdot \alpha_R}{2 + \alpha_R} \right) \quad (9)$$



Quadro 1. Cálculo da rigidez da ligação viga-pilar

Tip.	k	Led (cm)	Rsec (kN.cm/rad)	E _{cs} (kN/cm ²)	I _c (cm ⁴)	α _{NLF}	EI _{sec} (kN.cm ²)	α _R	γ _{EP} (%)
1	0,75	55	20675454,55	3187,576	3333333,33	0,50	5312626661,00	0,56	66,05
2	1,00	47	32259574,47	3187,576	3333333,33	0,50	5312626661,00	0,67	75,22
3	0,75	63	18050000,00	3187,576	3333333,33	0,50	5312626661,00	0,53	62,95
4				3187,576	3333333,33	0,50	5312626661,00	0,85	89,47
5	0,85	63	20456666,67	3187,576	3333333,33	0,50	5312626661,00	0,56	65,82
6 A	0,75	55	20675454,55	3187,576	3333333,33	0,50	5312626661,00	0,56	66,05
6 B	0,75	63	18050000,00	3187,576	3333333,33	0,50	5312626661,00	0,53	62,95

A: Refere-se à tipologia com a presença de bainha grauteada
B: Refere-se à tipologia com a presença de luvas rosqueadas

Fonte: Autor, 2025

A partir dos resultados do quadro acima, é possível notar que a utilização de solda nas ligações promove uma engastamento maior, no entanto, sua execução pode ser mais complexa do que uma ligação parafusada devido à qualidade da execução da solda. Outro ponto interessante a se notar é a ordem de grandeza do engastamento promovido por uma ligação parafusada (tipologia 5) com a tipologia 3, trata-se de valores próximos e com engastamentos maiores que 50%.

O comportamento de uma ligação viga-pilar precisa ser observado, já que a redistribuição de esforços na estrutura, em função da sua deformabilidade, pode torná-la semirrígida ou rígida. No caso de galpões, a ligação viga-pilar essencialmente é semirrígida, pois proporciona momentos fletores negativos menores do que nas ligações rígidas, bem como momentos fletores positivos menores, se comparada às ligações flexíveis, o que pode gerar uma excelente ligação viga-pilar e permitir rotações suficientes (Santos, 2010).

As vantagens correlacionadas a este tipo de ligação estrutural, em galpões, correlacionam-se à redução da rigidez, o que diminui os esforços, se comparado à ligação rígida, tornando a estrutura mais leve e menos tendenciosa a falhas por flexão. Porém, Santos (2010) relaciona uma acertada escolha do chumbador à uma adequada ligação viga-pilar, fazendo com que o comportamento dela semirrígida seja visto como rígido, o que faz entender que a ligação semirrígida pode também ser vista como rígida, dependendo de seu comportamento.



CONSIDERAÇÕES

Diante das informações coletadas para elaboração deste trabalho, conclui-se que, para galpões pré-fabricados, é mais viável o uso de ligações semirrígidas na ligação viga-pilar, podendo ser por meio de solda ou uso de parafusos e chumbadores.

A ligação convencional utiliza apenas um ferro-guia para unir o pilar e a viga, o que, por várias influências, pode flexionar com mais facilidade a estrutura do galpão, afetando-a. Quando esta ligação é realizada por meio de solda ou parafusos e chumbadores, a viga e o pilar se tornam mais unidos, reduzindo possíveis problemas na estrutura, quase zerando as possibilidades de sua movimentação. Com a ligação semirrígida, é possível reduzir a taxa de aço presente nos pilares e diminuir a resistência do concreto, o que reduz custos da obra.

As normas técnicas ainda não apresentam muitas informações sobre estes tipos de ligações, bem como são poucos os estudos que aprofundam conhecimentos acerca da temática, o que faz entender que é preciso mais estudos e maior atenção sobre a contribuição das ligações semirrígidas na otimização de galpões pré-moldados, já que estão sendo utilizadas cada vez mais na construção civil.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16475**: Painéis de parede de concreto pré-moldado – requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/838121603/NBR-16475-de-03-2017-Paine-is-de-parede-de-concreto-pre-moldado-Requisitos-e-procedimentos>. Acesso em: 15 ago. 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estrutura de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/0By2PgJCTfCF7dGVRU2VYcDQyYzg/view?resourcekey=0-w0GBZSe3shuG5oNradBGJQ>. Acesso em: 15 ago. 2025.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/862858766/ABNT-NBR-6120-2019-Versao-Corrigida-2019>. Acesso em: 15 ago. 2025.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/700133286/NBR-6123-2023-VENTO>. Acesso em: 15 ago. 2025.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-do-rio-grande-do-sul/estruturas-pre-moldadas-concreto/nbr-09062-2017-projeto-e-execucao-de-estruturas-de-concreto-pre-moldado/23210507>. Acesso em: 15 ago. 2025.

AGUIAR, E. A. B. **Comportamento de chumbadores grauteados de ligações viga-pilar parcialmente resistentes a momento fletor**. 2010. 244f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



ARAÚJO, A. L. T. **Sistema de gestão da qualidade na construção civil: estudo da inspeção da execução de pilares, vigas e lajes em concreto armado.** 2014. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8297>. Acesso em: 20 set. 2025.

BACHEGA, L. A. **Estudo teórico-experimental de ligação viga-pilar com consolo metálico embutido em estruturas pré-moldadas de concreto.** 2013. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

BALDISSERA, A. **Estudo experimental de uma ligação viga-pilar de concreto pré-moldado parcialmente resistente a momento fletor.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BARBEIRO, V.H. **Análise da ligação viga-pilar em estruturas de concreto pré-moldado.** Araraquara: Universidade de Araraquara – UNIARA, 2018.

BARROS, L S.P. **Verificação do comportamento de ligações viga-pilar com continuidade de armadura negativa por meio de luvas rosqueadas.** 2018. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

BELLUCIO, E. K. **Comportamento de chumbadores embutidos em concreto com fibras de aço para ligações viga-pilar de concreto pré-moldado.** 2016. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

CATOIA, B. **Comportamento de Vigas Protendidas Pré-Moldadas com Ligações Semi-Rígidas.** 2007. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

CAVALCANTI, R. M. P. Estruturas pré-moldadas de concreto: aplicações e vantagens. **Revista Construção Civil em Foco**, v. 8, n. 2, p. 45–52, 2017.

CHANG, R.; ZHANG, N.; GU, Q. A Review on Mechanical and Structural Performances of Precast Concrete Buildings. **Buildings**, v. 13, n. 7, 2023.

CHASTRE, C.; LÚCIO, V. **Estruturas Pré-moldadas no Mundo - Aplicações e Comportamento Estrutural.** Guarulhos: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012. v. 1.

CHEFDEBIEN, A. **Precast concrete beam to column head connections.** Control of the semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections, International Conference. Proceedings Cost C1. **Anais** [...] Liege, Belgium: 1998.

COMAIR, F.; DARDARE, J. **Model testing of precast semi-rigid beam-column connections.** Workshop on semi-rigid behavior of civil engineering structural connections. Proceedings Cost C1. **Anais** [...] Strasbourg, France: 1992.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETON. **Bulletin 43 - Structural Connections for Precast Concrete Buildings.** Stuttgart: Bulletin FIB, 2008.

FERREIRA, M. A. Analytical Design Procedure for Semi-Rigid Connections in precast Concrete Structures. **Internal Research Report. School of Civil Engineering, University of Nottingham**,



n. May, p. 80, 2001.

FERREIRA, M. A. **Estudo de deformabilidades de ligações para análise linear em pórticos planos de elementos pré-moldados.** 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

FERREIRA, M. A. et al. **Validation of analytical methods for the analysis of the flexural behaviour of precast beams with semi-rigid connections.** Concrete Structures - Stimulators of Development, Proceedings of the fib Symposium Dubrovnik 2007. **Anais [...] Dubrovnik:** 2007.

FERREIRA, M. A. **Ligações semirrígidas e seus efeitos na análise da estabilidade de estruturas pré-moldadas com múltiplos pavimentos em regiões não sísmicas.** São Carlos: UFSCar: Departamento de Engenharia Civil. Notas de Aula, 2022.

FERREIRA, M. A. Multi-Storey Precast Concrete Framed Structures with Semi-Rigid Connections. **Post-Doctoral Research Report**, 2010.

FERREIRA, M. A.; EL DEBS, M. K.; ELLIOTT, K. S. Determinação Teórico-Experimental da Relação Momento-Rotação e Ligações Viga-Pilar de Estruturas Pré-Moldadas de Concreto. V Simpósio EPUSP sobre estrutura de concreto. **Anais [...] 2003**

FERREIRA, M. A.; ELLIOTT, K. S. Strength-stiffness requirement approach for semirigid connections in precast concrete structures. **Research Report**, p. 21, 2002.

FERREIRA, M. A.; ELLIOTT, K. S.; HASAN, S. A. Precast Concrete Framed Structures with Semi-Rigid Connections. **State-of-Art Research Report Precast**, n. July, p. 1–47, 2010.

GOMES, J. M. C. **Estudo das cargas acidentais da NBR 6120:1980 – cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/1d4f9ba5-7cf0-442f-957dc6a0f11ba3d6/content>. Acesso em: 24 set. 2024.

HADADE, M. A. S. **Comportamento de ligações viga-pilar típicas com continuidade de armadura negativa em estruturas pré-fabricadas.** 2016. 230f. Tese (Doutorado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

HADADE, M. Á. S. et al. Moment-Rotation Response of Beam-Column Connections in Precast Concrete Structures. **Solid State Phenomena**, v. 259, p. 269–274, 2017.

JEREMIAS JÚNIOR, A. C. **Análise da estabilidade de estruturas pré-moldadas de concreto: influência das ligações semi-rígidas.** 2007. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

JUNG, D. et al. Seismic performance of a ductile rod exterior connection system for precast concrete industrial buildings. **PCI Journal**, v. 68, n. 1, p. 25–47, 2023.

KATAOKA, M. N. **Estudo da continuidade em ligações laje-viga-pilar em estruturas pré-moldadas de concreto.** 2007. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.



KATAOKA, M. N. *et al.* Estudo do comportamento de ligações viga-pilar em estruturas pré-moldadas de concreto: análise experimental. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v. 5, n. 6, dez. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/sXYKxycy8XFrdrN5wqdYkqXh/?lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2025.

LIU, J.; LIU, Y.; YU, D. Experimental and Numerical Studies on the Seismic Performance of New Assembled Concrete Frame Beam-Column Joints. **Buildings**, v. 13, n. 2, 2023.

MA, W. *et al.* Mechanical Properties of New Dry-Type Beam-Column Bolt Connection Joint. **Sustainability**, v. 11, n. 12, p. 3348, 2019.

MARÍN, M. C. **Contribuição à análise da estabilidade global de estruturas em concreto pré-moldado de múltiplos pavimentos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MIOTTO, A. M. **Ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado**: análise com ênfase na deformabilidade ao momento fletor. 2002. 263f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MOTA, J. E. **Contribuição ao projeto de estruturas multi-piso reticuladas em concreto pré-moldado**. 2009. 246f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

OTRENTE, J. F. **Contribuição no projeto de galpões pré-moldados de concreto com base no desempenho das ligações viga-pilar**. 2023. Qualificação de Doutorado – Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

OTRENTE, J. F. **Ligações viga-pilar semi-rígidas e seus efeitos na análise de pórticos planos pré-moldados de concreto**. Relatório parcial. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2024.

SANTOS, A. P. **Análise estrutural de galpões atirantados de concreto pré-moldados**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em:

http://sistemas.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2010ME_AndreiltondePaulaSantos.pdf. Acesso em: 14 nov. 2025.

SAWASAKI, F. Y. **Estudo teórico-experimental de ligação viga-pilar com almofada de argamassa e chumbador para estruturas de concreto pré-moldado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SOARES, L. F. S. **Efeitos dependentes do tempo em vigas pré-moldadas compostas com lajes alveolares e vinculações semi-rígidas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SOUZA, A. S. DE. **Comportamento de elementos pré-moldados de concreto com ligações semi-rígidas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

TOMIM, K. C. **Análise de ligações semirrígidas em estruturas pré-moldadas de concreto**. [S. I.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://revistatecie.creapr.org.br/index.php/revista/article/view/364/345>. Acesso em: 15 set. 2025.



REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

CONTRIBUIÇÃO DAS LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS PARA A OTIMIZAÇÃO DE
GALPÕES PRÉ-MOLDADOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA
Eduardo Coleone Ferrari, Jose Eduardo Quaresma

ZHANG, R. *et al.* Experimental study on a new type of precast beam-column joint. **Journal of Building Engineering**, v. 51, n. February, p. 104252, jul. 2022.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.