

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO (UEMA)  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MARIO SERGIO CAVALCANTE SANTOS**

**TIPOLOGIA DE LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DE  
CONCRETO.**

**SÃO LUIS-MA  
2018**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO (UEMA)**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

MARIO SERGIO CAVALCANTE SANTOS

**Tipologia de Ligações entre Elementos Pré-Fabricados de Concreto**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Profa. Dra. Maria Ângela Simões Hadade

**SÃO LUIS-MA**  
**2018**

**TIPOLOGIA DE LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DE  
CONCRETO.**

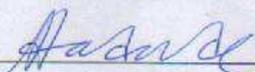
**MARIO SERGIO CAVALCANTE SANTOS**

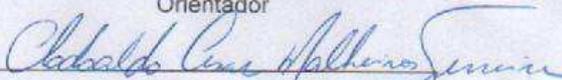
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi defendido e julgado pela banca  
examinadora para obtenção do título de Engenheiro Civil.

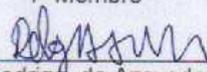
São Luis-MA, dezembro de 2018.

Prof. Msc. Ailton Egydio Petinelli  
Coordenadora de TCC

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria Ângela Simões Hadade  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Clodoaldo Cesar Malheiros  
1º Membro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rodrigo de Azevedo Neves  
2º Membro

Santos, Mário Sérgio Cavalcante.

Tipologia de ligação entre elementos pré-fabricados de concreto / Mário Sérgio Cavalcante Santos. – São Luís, 2018.

...86 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Profa. Dra. Maria Ângela Simões Hadade.

1.Pré-fabricado. 2.Tipologia. 3.Ligações. I.Título

C.D.I.: 624 012 4

**Elaborado por Giselle Frazão Tavares- CRB 13/665**

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço a Deus acima de tudo pela vida que tenho e por ter me dado forças principalmente nas horas difíceis da vida e para seguir o meu caminho.

Aos meus pais e meu irmão, que sempre me apoiaram e incentivaram tanto nos estudos como em minha vida profissional.

Aos meus pastores: Pr. Dangelo Cassius, Pr. Berg Sobrinho, Pr. Marques e meus irmãos na Fé, pelo companheirismo, ajuda e incentivo durante os anos de vida com Cristo.

Aos meus amigos de classe, pelo companheirismo, ajuda e incentivo durante os anos de vida acadêmica.

Agradeço em especial a professora Sra. Maria Ângela Simões Hadade, pela atenção, incentivo e apoio para a finalização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho é um estudo sobre a tipologia das ligações entre elementos construtivos em concreto pré-fabricado. As ligações, nesse tipo de estrutura, constituem a parte mais importante de um projeto, influenciando no comportamento global da estrutura e também nos serviços complementares de montagem realizados nos canteiros de obras. Seu correto entendimento é parte fundamental para qualidade final da estrutura. Foi realizada um acompanhamento didático da classificação das ligações quanto a sua vinculação, mecanismos de transferência de esforços, esforços transmitidos, componentes de ligações até as desejadas tipologias mais frequentes de ligações entre os elementos pré-fabricado dentro de sistemas estruturais tipo esqueleto com exceção quando se fala da ligação viga- laje neste presente trabalho. Dessas tipologias de ligação dá-se destaque a duas: a ligação fundação – pilar por meio de cálice e a ligação viga –pilar com armadura de continuidade negativa dando referência a esta última ligação sendo frequentemente utilizada nos canteiros de obra. Além de uma introdução teórica aos seus componentes, formas de classificação e funcionamento. Dentro da ampla gama de tipologias de ligação acessada, foram escolhidos cinco tipos de componentes principais utilizadas nas ligações entre elementos de concreto pré-fabricados, que são: juntas com e sem argamassa, aparelhos de apoio de elastômeros, consolos, dentes Gerber, chumbadores sujeitos à Força transversal e Cálices. Com uso de teoria embasada nas principais normas brasileiras (NBR 6118 (2014) e NBR 9062 (2017)) ligadas ao assunto, assim como trabalhos acadêmicos diversos, foram apresentadas as metodologias de explicação a respeito do devido trabalho. Concluiu-se assim a utilidade didática do estudo realizado, trazendo para dentro da sala aula a importância desse estudo voltado para esses elementos estruturais tão difundidos no dia a dia no campo profissional do engenheiro civil.

**Palavras-chave:** Pré-fabricado. Tipologia.Ligações.

## ABSTRACT

This work is a study about the typology of the connections between constructive elements in prefabricated concrete. The connections, in this type of structure, constitute the most important part of a project, influencing the overall behavior of the structure and in the complementary services of assembly carried out in the construction sites. Your correct understanding is a fundamental part of the final quality of the structure. There was a didactic follow-up of the classification of links in terms of their linkage, transfer mechanisms, transmitted efforts, linking components to the desired most frequent types of links between prefabricated elements within skeletal structural systems, except when speaks of the viga- laje connection in this present work. Of these types of connection, two stand out: the foundation-abutment connection by means of a chalice and the pillar-beam connection with negative continuity reinforcement, giving reference to this last connection being frequently used in the construction sites. In addition to a theoretical introduction to its components, forms of classification and operation. Within the wide range of connection types, five main types of components were used in the connections between prefabricated concrete elements: joints with and without mortar, elastomeric support devices, consoles, Gerber teeth, and anchors transverse force. Chalices. With the use of theory based on the main Brazilian norms (NBR 6118 (2014) and NBR 9062 (2017)) related to the subject, as well as several academic papers, the explanatory methodologies regarding due work were presented. It was concluded the didactic utility of the study carried out, bringing into the classroom the importance of this study focused on these structural elements so widespread in everyday life in the professional field of the civil engineer.

**Keywords:** Prefabricated. Typology. Links.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-1-</b> Produção do elemento pré-fabricado [Ferreira 2008] .....	19
<b>Figura 2-1-</b> Deformabilidade causada pelo momento fletor. EL Debs,2008.....	28
<b>Figura 2-2-</b> Relação momento-rotação pilar-viga.....	29
<b>Figura 2-3-</b> Fator de restrição à rotação. NBR 9062(2017).....	30
<b>Figura 2-4-</b> Variação dos elementos fletores de viga em função da Deformabilidade ao momento fletor das ligações nos apoios.....	33
<b>Figura 2-5-</b> Ligação por encaixe [FIB (2014) ].....	36
<b>Figura 2-6-</b> Barras transversal conectando barras em laço [FIB (2014)] .....	37
<b>Figura 2-7-</b> Transferência de força cortante através do efeito de pino [FIB (2014)].....	38
<b>Figura 2-8-</b> Transferência de forças de cisalhamento por atrito. [ FIB (2014) ].....	39
<b>Figura 2-9-</b> Superfície rugosa em lajes alveolares [ Ferreira (2008) ].....	39
<b>Figura 2-10-</b> Transferência de forças de chave de cisalhamento. EL Debs ,2008 .....	40
<b>Figura 2-11-</b> Paredes de concreto ligadas pelas chaves de cisalhamento.....	41
<b>Figura 2-12-</b> Exemplo de ligações viga-pilar com chapa soldada [ Ferreira (2008) ].....	41
<b>Figura 2-13-</b> Superfície de contato irregulares nos apoios [FIB (2014) ] .....	42
<b>Figura 2-14-</b> Condições de carregamento em almofada com elastômero. [FIB (2014)].....	43
<b>Figura 2-15-</b> Tensão transversais de tração nas juntas de compressão [FIB(2014)].....	44
<b>Figura 2-16-</b> Ligação de tração com armadura de espera em nichos preenchidos com concreto [FIB (2014) ] .....	45
<b>Figura 2-17-</b> Tensões de cisalhamento em juntas de lajes alveolares [Ferreira (2014)].....	46
<b>Figura 2-18-</b> Transferencia de cisalhamento por meio de estribos e atrito [Ferreira (2008) ] .....	47
<b>Figura 2-19-</b> Transferencia de cisalhamento por efeito de pino [Ferreira (2014) ].....	47
<b>Figura 2-20-</b> Modelo de biela e tirante. EL Debs 2008.....	48
<b>Figura 2-21-</b> Modelo de atrito- cisalhamento. EL Debs. EL Debs (2014) .....	49

<b>Figura 2-22-</b> Regiões D (áreas sombreadas) com distribuição de deformações não lineares por descontinuidade geométricas ou estéticas. Campo (1996) .....	50
<b>Figura 2-23-</b> Juntas Feita por meio de Graute .....	51
<b>Figura 2-24-</b> Tensões de cisalhamento devido ao modulo de elasticidade de argamassa ser menor que o concreto .....	53
<b>Figura 2-25-</b> Dimensões de almofada de elastômeros. EL DEBS (2014) .....	54
<b>Figura 2-26-</b> Posionamento das dimensões (a) e (b) em consolo típico Fonte: NBR 9062:2014.....	56
<b>Figura 2-27-</b> Ligação dente Gerber-consolo.....	57
<b>Figura 2-28-</b> Vigas com dentes Gerber .....	58
<b>Figura 2-29-</b> Exemplos de chumbadores sujeitos à ação vertical com confinamento. EL Debs (2014).....	58
<b>Figura 2-30-</b> Ligação pilar-fundação por meio de cálice: EL Debs ,2014 .....	61
<b>Figura 2-31-</b> Nomenclatura geométrica (a) e (b) EL Debs, 2014.....	62
<b>Figura 2-32-</b> Figura 2.34. Fonte: EL Debs (2014) .....	64
<b>Figura 2-33-</b> Componentes das paredes 3 e 4 do cálice .....	65
<b>Figura 2-34-</b> Ligação pilar x fundação por meio de chapa de base Fonte: Adaptado de ACKER ,2002.....	66
<b>Figura 2-35-</b> Ligações com chapa soldadas. Fonte: EL Debs.....	67
<b>Figura 2-36-</b> Ligações com tubo metálico. Fonte: EL Debs.....	68
<b>Figura 2-37-</b> Tipos de ligação viga-pilar. FONTE: FIB.....	69
<b>Figura 2-38-</b> T&K pré-fabricados- Estruturas em esqueleto (HADADE 2016) .....	70
<b>Figura 2-39-</b> Ligação viga-pilar articulada com almofada de elastômero sobre consolo. Ferreira (2008) .....	71
<b>Figura 2-40-</b> Ligação viga-pilar com almofada de elastômero consolo e chumbador Ferreira (2008) .....	71
<b>Figura 2-41-</b> Detalhe da solução com armadura de solidariedade COM BARRAS (FONTE: FERREIRA,2008) .....	72
<b>Figura 2-42-</b> Definição de junta e ligação. [FERREIRA (1993) .....	73
<b>Figura 2-43-</b> Ligações viga-pilar com armadura de continuidade passando em bainha corrugada no pilar central.....	74
<b>Figura 2-44-</b> Ligações viga-pilar com armadura de continuidade por meio de luvas rosqueadas.....	74

<b>Figura 2-45-</b> Comprimento efetivo de deformação da armadura de continuidade em ligações viga-pilar. Fonte: Hadade (2016) .....	78
<b>Figura 2-46-</b> Braços de alavanca do momento responsável pela rotação viga-pilar para três tipologias, para pilares centrais. Fonte: Hadade.....	80
<b>Figura 2-47-</b> Ligações viga-pilar com pilares de extremidade.....	80
<b>Figura 2-48-</b> Comprimento efeito da viga para o cálculo do fator de restrição. Fonte: NBR 9062,2017 .....	81
<b>Figura 2.49 -</b> Desenho de ligação viga-pilar. (ALBARRAN, 2008) .....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1- fator de restrição ( $\alpha_R$ ). Fonte: Ferreira.....	34
Tabela 2-2- Dados para obtenção da rigidez secante negativa para ligações viga-pilar típicas Fonte 9062, 2016.....	79
Tabela 2-3 Comparação entre rigidezes.Fonte 9062,2017.....	81

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Geral.....	15
1.1.2 específicos.....	15
1.2 justificativa.....	15
1.3 Metodologia de Pesquisa.....	16
1.4 Apresentação do Trabalho.....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1. Concreto Pré-Fabricado.....	18
2.1.1 Vantagens e Desvantagens do Uso de Pré-Moldados de Concreto.....	19
2.2 Ligações em Estruturas Pré-Moldadas de Concreto.....	23
2.3 Importâncias das Ligações em Estruturas Pré-Moldadas de Concreto	24
2.4 Rigidez e Deformabilidade à Flexão de uma Ligação.....	25
2.4.1 Rigidez à flexão tangente ou pontual.....	27
2.4.2 Rigidez Secante à Flexão.....	28
2.5 Fator de Restrição à Rotação ( $\alpha$ ).....	29
2.6 Classificação das Ligações Quanto a sua Vinculação.....	31
2.6.1 Ligação Rotulada.....	32
2.6.2 Ligação Semirrígida.....	32
2.6.3 Ligação Engastada.....	32
2.6.4 Mecanismos de Transferência de Esforços.....	35
2.6.4.1 Encaixes.....	36
2.6.4.2 Barras Dobradas.....	37
2.6.4.3 Ação de Pino.....	37
2.6.4.4 Aderência.....	38
2.6.4.5 Atrito.....	38
2.6.4.6 Chaves de Cisalhamento.....	40
2.6.4.7 Ligações Soldadas.....	42
2.6.4.9 Ligações Protentidas (Pós Tensão).....	43
2.7 Transferência de Forças nas Ligações.....	43
2.7.1 Transferência de Força de Compressão.....	43

2.7.2 Transferência de Força de Tração.....	44
2.7.3 Transferência de Forças de Cisalhamento.....	45
2.8 Modelos de Análises de Transferências de Esforços.....	47
2.9 Componentes das Ligações.....	51
2.9.1 Juntas Com e Sem Argamassas.....	51
2.9.2 Aparelhos de Apoio de Elastômetro.....	53
2.9.3 Consolos.....	55
2.9.4 Dente Gerber.....	57
2.9.5 Chumbadores Sujeitos à Força Transversal.....	58
2.10 Tipologia das Ligações.....	59
2.10.1 Ligações Pilar-Fundações.....	61
2.10.1.1 Ligação tipo cálice.....	60
2.10.1.2 Ligação com chapa metálica.....	65
2.10.2 Ligações Pilar-Pilar.....	66
2.10.3 Ligação Viga-Pilar.....	68
2.10.3.1 Ligação Viga-Pilar com Almofada de Apoio sobre Consolo.....	70
2.10.3.2 Ligação Viga-Pilar com Almofada de Elastômero Consolo e Chumbador.....	71
2.10.3.3 Ligação Viga-Pilar Semirrígida com Armadura de Continuidade....	72
2.12.3.3.1 Comprimento efetivo de deformação da Armadura de continuidade (Led), HADADE (2016) .....	76
2.10.4 Ligações Viga Laje.....	82
<b>3. CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
3.1 Considerações Finais.....	83
<b>4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Observa-se no atual momento, uma tendência de tornar as construções mais sustentáveis. Desta forma, as mais industrializadas vêm se tornando a escolha mais constante do mercado da construção civil, pelas suas características que, propiciam redução de desperdícios, obtenção de maior celeridade e garantia de maior qualidade das obras. Sem dúvida, o desenvolvimento tecnológico é o grande responsável pela modernização do setor das edificações, uma vez que oferecem mais alternativas ao processo construtivo. As melhorias relacionadas às estruturas pré-fabricadas passam, certamente, pelo mais amplo entendimento do comportamento das ligações entre seus elementos e o sucesso das suas aplicações está diretamente relacionado com o desempenho dessas ligações, as quais para os sistemas apertados são as principais responsáveis pela estabilidade global da construção. *Do ponto de vista do comportamento estrutural, a presença das ligações é a principal diferença entre uma estrutura de concreto pré-moldado e outra monolítica.*

A necessidade de se estabelecerem ligações entre os vários elementos componentes de uma estrutura pré-moldada é certamente o **principal entrave** a ser vencido para a elaboração de projetos envolvendo esta classe de sistema construtivo. Tais ligações devem ser concebidas levando-se em consideração requisitos indispensáveis como resistência e rigidez aos esforços solicitantes, durabilidade, ductilidade, resistência ao fogo e construtibilidade.

O desenvolvimento de critérios de projeto para o dimensionamento e detalhamento de ligações de estruturas enquadradas nessa categoria depende também de *mecanismos internos de deformação* da ligação, os quais interferem no desempenho do conjunto.

A necessidade de se entender cada vez mais o comportamento das ligações, em especial as ligações semirrígidas, é de fundamental importância para o desenvolvimento de um projeto estrutural econômico e que garanta a segurança na forma da estabilidade global do sistema.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo detalhado das soluções de ligações entre elementos pré-moldados dentro de um sistema construtivo aporticado que faz uso de lajes planas, vigas e pilares lineares apoiados sobre blocos de fundação

### **1.1.2 Específicos**

1. Realizar o estudo da classificação das ligações de uma estrutura pré-moldado de acordo com a sua vinculação.
2. Estudar as ligações através das decomposições dos seguintes componentes; juntas de argamassa, aparelhos de apoio de elastômeros, chumbadores sujeito à força transversal, consolos de concreto e dentes de concreto
3. Estudar e Analisar as transferências de esforços encontradas em cada tipo ligação citada no presente trabalho seja ela, fundação- pilar, pilar- viga, pilar-pilar e viga-laje.

## **1.2 justificativa**

O trabalho foi organizado de forma a construir-se uma ordem lógica de encadeamento de ideias para propiciar o cumprimento dos objetivos propostos.

A primeira seção apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do concreto pré-moldado. Como não poderia deixar de ser, inicialmente são analisados a diferença entre concreto pré-moldado e concreto pré-fabricado e as vantagens e desvantagens de se utilizar estruturas de concreto pré-fabricado.

São então abordadas as ligações estruturais com as explicações que possibilitam a classificação e divisão das ligações entre elementos estruturais. Fica, já neste ponto, bastante claro a importância do estudo de seus componentes e como são realizadas essas ligações entre as peças estruturais.

Classificar e dividir as ligações é fundamental, em termos econômicos, para as escolhas a serem feitas no detalhamento estrutural da edificação. É feita ainda uma breve explicação teórica sobre os principais modelos de análise de transferência de esforços empregados nas normas NBR 9062 (2006) e NBR 6118 (2014) e esforços localizados entre cada ligação dos elementos estruturais em análise nesse trabalho. O objetivo por trás disso é dar ao leitor a abordagem mais completa possível do desenvolvimento conceitual da teoria das ligações.

Posteriormente são descritos os tipos de ligações entre os elementos de concreto pré-moldado. Daí são exemplificados os tipos de estruturas a serem analisadas dentro do esquema construtivo laje-viga-pilar-fundação, metodologia construtiva esta desenvolvida modernamente por François Hennebique, com emprego do concreto armado. As lajes se apoiam sobre vigas. Estas, por sua vez, são suportadas pelos pilares que estão ligados aos sistemas de fundação. Em última análise, os sistemas de fundação lançam sua carga sobre o solo. Para realizar a ligação entre todos esses elementos é que são empregados os componentes de ligação feito assim estudo de como esse conjunto com as diferentes tipologias de ligações entre elas são realizadas. Seguindo o disposto na NBR 9062 (2006), essa é uma das formas de se garantir a estabilidade global do sistema estrutural, ou seja, usando estruturas em que a estabilidade é proporcionada pela ação de ligações de fundações, pilares, vigas e lajes resistindo a cada esforço localizada na união das peças estruturais em análise.

### **1.3 Metodologia de Pesquisa**

Através da investigação bibliográfica foram estudadas as tipologias de ligações entre elementos estruturais de concreto pré-moldado, gerando como material de estudo os seguintes itens: a classificação dessas ligações devido aos seus vínculos, componentes das ligações, modelos de transferência de esforços, estudos das forças transmitidas e os tipos de ligações de elementos pré-moldados estudados em sistemas estruturais tipo esqueleto mais frequentes em obras de concreto pré-moldados. Em um próximo passo foi desenvolvida mais a fundo a ligação viga-pilar semirrígida com armadura de continuidade.

O trabalho foi organizado de forma a construir-se uma ordem lógica de encadeamento de ideias para propiciar o cumprimento dos objetivos propostos. A primeira seção apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos sistemas construtivos em concreto pré-moldado. Como não poderia deixar de ser, inicialmente são analisados os constituintes básicos do concreto pré-moldado, o aço e o concreto. Estes são vistos tanto em suas características particulares, como materiais isolados, quanto em suas características gerais, como material homogêneo e solidarizado.

#### **1.4 Apresentação do Trabalho**

Fundamentada na metodologia de pesquisa o presente trabalho foi dividido em quatro capítulos.

*Capítulo 1* - Introdução: Consiste de uma introdução e justificativa que descrevem a respeito da importância do estudo das tipologias das ligações entre elementos pré-moldados, os objetivos, a metodologia empregada.

*Capítulo 2* - Revisão Bibliográfica: observou os principais estudos relacionados ao tema deste trabalho encontrados na literatura, dos quais foi extraída a fundamentação teórica necessária a esta pesquisa.

*Capítulo 3* – Conclusão e Considerações finais: Apresenta as conclusões do estudo realizado baseadas nas análises de textos acadêmicos, manuais e normas com o objetivo de gerar futuras pesquisas que possam expandir o conhecimento sobre o tema em questão.

*Capítulo 4* – REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: consiste na relação dos matérias acadêmicas, manuais, revistas e normas pesquisados ao longo do presente trabalho.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Aqui é apresentado o embasamento teórico para compreensão do concreto pré-fabricado. Não somente como um conjunto de elementos previamente moldados e posteriormente encaixados através de suas ligações, mas também a análise da classificação, transferência de esforços, e, bem como as diversas possibilidades estruturais que esses elementos podem formar dando origem as tipologias de ligação entre os elementos estruturais.

### **2.1. Concreto pré-fabricado**

Pré-moldarem se define como um processo de construção em que a obra, ou parte dela, é moldada fora do local definitivo de utilização. Já a pré-fabricação é um método industrial de construção em que elementos fabricados, em grandes séries, por métodos de produção em massa e sob condições rigorosas de controle de qualidade, são montados na obra (EL DEBS, 2000).

Outro importante conceito está na definição de industrialização na construção. Esse processo consiste no emprego, de forma racional e mecanizada, de materiais, meios de transporte e técnicas construtivas para se conseguir uma maior produtividade. Daí, pode-se dizer que a pré-moldarem aplicada à produção em grande escala resulta na pré-fabricação que, por sua vez, é uma forma de se buscar a industrialização da construção (EL DEBS, 2000).

A construção civil vem nos últimos tempos se modernizando e trazendo opções mais econômicas e práticas. A utilização de materiais pré-fabricados (figura 3.1) torna a construção muito mais ágil e é a realidade adotada em grande parte do mundo, principalmente nos países mais desenvolvidos, que constroem com qualidade e rapidez estruturas que algum tempo não eram possíveis.

Embora tratam-se de expressões similares, a grande diferença destes dois tipos de peças está na sua qualidade. De acordo com a NBR 9062, a definição de concreto pré-moldado é de um elemento produzido fora do qual definitivamente empregado. O controle de qualidade acerca desse concreto é menos rigoroso, devemos ser inspecionados por pessoal capacitado do próprio construtor ou proprietário.



*Figura 1.1 – Produção do elemento pré-fabricado. [Ferreira (2008)]*

### **2.1.1 Vantagens e Desvantagens do Uso de Pré-Moldados de Concreto**

Munte (2004), Albuquerque e El Debs (2005) afirmam que a industrialização dos processos executivos da construção civil e a utilização do concreto pré-moldado são uma forte tendência. O grande número de obras realizadas nos Estados Unidos e Europa atestam a viabilidade econômica, técnica e estética do sistema. Esses fatores estão atrelados as seguintes vantagens:

a) Rapidez na Execução - A agilidade e alta produtividade são obtidas abandonando-se processos artesanais e aumentando progressivamente a industrialização. Com isso, consegue-se reduzir o tempo da obra para um terço, fazendo com que a utilização de pré-moldados ganhe cada vez mais mercado em obras de edifícios de escritórios, hotéis e shopping centers, onde se necessita da construção rápida para que se comece a obter um retorno financeiro (MOREIRA FILHO, 2000);

b) Qualidade dos Materiais - O rigoroso controle na produção do concreto, com dosagens precisas, a montagem da armadura, a utilização de formas metálicas e a maior eficácia na mistura do concreto resultam em peças com maior precisão dimensional e qualidade. Além disso, pode-se obter peças com alta resistência

através do uso de concreto de alto desempenho e protensão em vigas e lajes (ACKER, 2002);

c) Durabilidade - Na indústria, obtém-se concretos com menor tempo de cura e alta resistência inicial. Ademais, em um processo mais controlado consegue-se reduzir o valor água/cimento, produzindo concretos menos permeáveis e, conseqüentemente, com maior durabilidade;

d) Redução do Desperdício - A análise prévia dos detalhes durante a produção das peças, reduzindo adaptações e improvisações em obra e a utilização de formas metálicas auxiliam na redução do desperdício, executando-se uma obra mais limpa e sustentável (GIL, 2000);

e) Redução no Uso de Formas, Escoramento e Estoques - Como as peças chegam prontas na obra, não há a necessidade do uso de formas de madeira e dispensa-se, na maioria dos casos, o uso de escoras durante a montagem. Além disso, o canteiro de obras não precisa ter áreas para estoque de matéria-prima, como cimento, brita e areia;

f) Menor Dependência das Condições Meteorológicas - Como parte da produção será realizada em fábrica, reduz-se o tempo de execução no canteiro de obras e a interação com a natureza, o que faz com que a produção não seja demasiadamente afetada por chuvas, dias de calor excessivo e outras condições adversas do clima (ACKER, 2002);

g) Redução no Risco de Acidentes - Com o uso de elementos pré-moldados reduz-se o número de operários em obra, local com grandes riscos de acidentes de trabalho. Além disso, Silva (2003) afirma que a implementação dos programas de segurança no trabalho ocorre de maneira mais fácil nas fábricas;

h) Flexibilidade Arquitetônica - Ao contrário do pensamento generalizado que a pré-fabricação está ligada a peças iguais e retas, hoje em dia há uma

diversidade de painéis, estruturas e acabamentos, com diferentes formas, texturas e cores (MOREIRA FILHO, 2000).

Entretanto, de acordo com Albuquerque e El Debs (2005) 70% das obras pré-moldadas, em média, não são concebidas originalmente para a utilização do sistema, e sim, adaptadas de uma solução para estruturas de concreto moldadas *in loco*. Isso demonstra pouco conhecimento do sistema e suas possibilidades, principalmente por parte daqueles que realizam os projetos iniciais. A falta de conhecimento e experiência para projeto e execução de obras em pré-moldados pode ser considerada, então, uma das desvantagens em relação ao uso do concreto convencional, moldado *in loco*.

Outras desvantagens do uso desse sistema podem ser citadas, como:

1. Maior Custo - De forma geral, o custo de uma obra em pré-moldado é maior do que a mesma obra em concreto convencional. Um exemplo dessa constatação pode ser verificado no estudo de caso realizado por Carneiro (2013). Para uma central de logística composta por galpões, o custo da edificação pré-fabricada é 43,23% maior que a moldada *in loco*, quando não se considera as perdas do sistema convencional; 10,18% maior considerando as perdas existentes e 7,48% maior levando-se em conta perdas e juros com empréstimos no sistema convencional. Mesmo quando os cálculos consideram as vantagens do concreto pré-moldado em valores monetários, seu custo final ainda é maior;

2. Transporte das Peças – El Debs (2000) afirma que dentre as desvantagens decorrentes da colocação das peças nos locais definitivos de utilização estão o custo e as limitações do transporte. O tamanho das peças é restringido pelo tipo de transporte a ser utilizado. Além disso, o transporte de peças prontas é mais caro e exige um maior cuidado que o transporte de matéria-prima para a execução tradicional. Esses fatores podem inviabilizar o uso de pré-moldados no caso da necessidade de um longo deslocamento até o canteiro de obra;

3. Esforços Solicitantes em Situações Transitórias - Muitas vezes, o carregamento crítico não é a situação permanente que ocorre durante a vida útil e sim o carregamento que ocorre durante as situações transitórias (ABDI, 2015). A NBR 9062 (2017) exige que a análise dos elementos seja realizada considerando-se todas as etapas pelas quais o elemento pode passar, sendo que as fases que frequentemente exigem verificação dos elementos são: a fabricação, o manuseio, o armazenamento, o transporte, a montagem e a construção. Portanto, durante o dimensionamento, todas as condições desfavoráveis devem ser levadas em conta, o que pode gerar um aumento na quantidade de aço utilizada na estrutura;

4. Logística no Canteiro - Apesar da necessidade de local para estocagem de material ser menor, precisa-se de um grande espaço no canteiro para o recebimento dos elementos. A carga, descarga e movimentação das peças deve ser realizada com grande cuidado e a escolha adequada dos equipamentos para manuseio das peças é fundamental para a correta montagem da estrutura;

5. Execução das Ligações e Juntas - De acordo com Silva (2003), deve-se tomar uma atenção especial na execução das ligações de elementos de CPM, pois descuidos de montagem podem gerar grandes desvios geométricos e folgas, onde torna-se frequente o aparecimento de manifestações patológicas;

6. Mão de Obra Especializada - A montagem das peças, execução as juntas e travamentos exigem um conhecimento diferente do necessário para a execução de concreto moldado *in loco*. De forma geral, não se encontra operários qualificados nessa área, o que gera a necessidade de treinamentos e fiscalização mais rígida.

7. Alto Investimento Inicial - No uso de peças pré-moldadas o investimento inicial, tanto financeiro quanto em planejamento e detalhamento dos projetos, é muito alto. Mais do que nas obras convencionais, quando escolhe-se trabalhar com CPM, um projeto bem planejado e bem elaborado é essencial (ABCIC, 2015), pois problemas em canteiro são ainda mais complicados de serem solucionados.

A decisão pelo uso de concreto moldado *in loco* ou concreto pré-moldado deve ser tomada levando-se em conta todas as vantagens e desvantagens supracitadas. Cada edificação tem suas particularidades e a escolha do sistema construtivo influenciará em todas as etapas do empreendimento.

## 2.2 Ligações entre elementos de Estruturas Pré-Moldadas de Concreto

A viabilidade da construção com recurso de elementos pré-moldados depende em grande parte das soluções das ligações entre eles. A impossibilidade de transportar e manusear elementos de grandes dimensões implica a divisão destes em elementos menores, criando a necessidade de elaborar ligações entre os elementos que permitam a transferência adequada das forças aplicadas na estrutura até às fundações.

Por estas razões quando se fala em pré-fabricação pensa-se nas ligações entre os elementos pré-fabricados e na influência que estas têm no comportamento da estrutura. Neste trabalho são identificados algumas das principais ligações existentes na pré-fabricação e apresentadas algumas particularidades tanto para os elementos pré-fabricados como para as suas ligações. Refere-se ainda alguma regulamentação específica para esta área bem como alguns dos mecanismos de resistência mais comuns em que se baseia o comportamento das ligações.

As estruturas pré-fabricadas estão sujeitas, de uma forma geral, ao mesmo tipo de ações que uma estrutura executada *“in loco”*, deste modo as características estruturais gerais a exigir a este tipo de estrutura são as mesmas que no caso de uma estrutura moldada *“in loco”*. No entanto existem aspectos pertinentes relacionados com as ligações entre elementos pré-fabricados ou entre estes é feito *“in loco”*. A concepção e dimensionamento das ligações, segundo o Precast and Prestressed Concrete Institute (PCI), tal como referido por FERREIRA, devem satisfazer às seguintes exigências estruturais:

– **Resistência Mecânica:** todas as ligações entre os elementos estruturais deverão resistir deforma apropriada aos efeitos das ações que se farão sentir durante o tempo de vida útil da estrutura; estes efeitos são resultantes tanto das ações correntes (características de qualquer estrutura) como dos estados de coação

resultantes das restrições às variações de volume que resultam de variações diferenciais de temperatura ou da retração dos concretos de diferentes idades;

– **Ductilidade:** em termos gerais pretende-se que a estrutura apresente capacidade para ter grandes deformações antes da rotura. No caso de peças pré-fabricadas esta ductilidade decorre tanto dos seus elementos como das suas ligações; como se tratam de estruturas de concreto armado, a ductilidade é superior quando a rotura resulta do comportamento do aço tracionado e não do concreto comprimido;

– **Durabilidade:** deve-se ter em atenção que todos os elementos da estrutura, em especial, as ligações, deverão apresentar características de durabilidade adequada de acordo com a exposição ambiental; em particular, a proteção contra a corrosão de elementos metálicos expostos deverá ser assegurada através do seu envolvimento em concreto (ou argamassa) ou através do tratamento anticorrosivo das superfícies expostas;

– **Resistência ao Fogo:** as estruturas pré-fabricadas deverão apresentar uma resistência ao fogo equivalente à das estruturas concretadas “*in loco*”; em alguns casos poderá ser necessário envolver os elementos metálicos aparentes, chapas metálicas, em concreto ou em outro material que reúna as características de isolamento requeridas (pintura anticorrosiva, galvanização, etc.); devem ser respeitadas as especificações para os materiais presentes nos regulamentos de segurança ao fogo;

– **Estabilidade e Equilíbrio:** estas exigências estruturais referem-se não só ao comportamento definitivo da estrutura, mas também ao comportamento provisório das diferentes fases de montagem (note-se que, durante as fases de montagem anteriores à conclusão das ligações, existe uma menor redundância estrutural).

Além de se pensar na produção das peças deve-se prever como será realizada a montagem da estrutura em obra. Diversos autores, como Silva (2003) e Munte (2004), consideram que as ligações são os pontos críticos das estruturas pré-

moldadas. A ABCIC (2015) afirma que o tipo de ligação está diretamente relacionado ao custo da estrutura e ligações mais complexas tendem a gerar um custo mais elevado. Além disso, ligações mais rígidas favorecem a economia, mas dificultam mudanças (MUNTE, 2004). Com isso, percebe-se que deve ser tomado um cuidado especial tanto no projeto quanto na execução das ligações entre peças pré-moldadas, de modo a impedir o aparecimento de manifestações patológicas nesses locais e evitar que a obra tenha seu custo elevado sem necessidade.

### **2.3 Importâncias das Ligações em Estruturas Pré-Moldadas de Concreto**

A NBR 9062:2003 define as ligações como dispositivos utilizados para compor um conjunto estrutural a partir de seus elementos, com a finalidade de transmitir os esforços solicitantes, em todas as fases de utilização, dentro das condições de projeto, mantendo as condições de durabilidade ao longo da vida útil da estrutura conforme definido o conceito de vida útil da NBR 6118.

De acordo com Ferreira (2003), as ligações entre os elementos pré-moldados de concreto são regiões de descontinuidade da estrutura, onde ocorrem concentrações das tensões, as quais podem ou não mobilizar os deslocamentos e os esforços decorrentes dos elementos nela ligados, fazendo com que haja uma redistribuição dos esforços ao longo de toda a estrutura, interferindo em seu comportamento. Sendo assim, o desempenho do sistema estrutural pré-moldado está diretamente ligado com o desempenho de suas ligações.

Catoia (2007) afirma que para a formação de um pórtico com elementos pré-moldados é extremamente importante que as ligações empregadas possuam um bom desempenho, pois disso vai depender o desempenho de toda a estrutura. Quando se tratar de ligações que resistam aos esforços de flexão, elas precisam possuir resistência, elevada rigidez, ductilidade, construtibilidade e durabilidade.

Segundo o PCI (2001), a resistência da estrutura não deve ser determinada pela capacidade da ligação, mas deixa claro que o mecanismo de ruína deve ocorrer nos elementos estruturais e não na ligação. Entretanto, o manual da FIB (2003), afirma que as ligações resistentes à flexão devem possuir falhas dúcteis e que a capacidade limite da ligação não seja governada pelo cisalhamento, por comprimentos curtos de solda ou por outros detalhes que possam levar à fragilidade.

Para Kataoka (2007), as ligações são classificadas de diferentes maneiras, dependendo do tipo dos elementos conectados ou do tipo de força principal a ser resistida (transmitida). Existem tipologias padronizadas de ligações estruturais que podem ser encontradas em manuais técnicos ou catálogos de fabricantes de elementos pré-moldados. Entretanto, a autora deixa claro que simplesmente olhar em catálogos e manuais não é o suficiente para detalhar uma ligação, pois o desempenho da mesma depende de outros fatores, tais como arranjo estrutural e principais esforços a serem transmitidos.

De acordo com El Debs (2000) as ligações são de fundamental importância tanto para a produção (execução de parte dos elementos adjacentes às ligações, montagem das ligações propriamente ditas) como para o comportamento da estrutura montada.

O manual da FIB (2003) deixa claro que as ligações em estruturas pré-moldadas devem atender a diferentes critérios de projeto e de desempenho. A função principal das ligações é a transferência das forças entre as interfaces dos elementos pré-moldados, de forma que os elementos pré-moldados interajam entre si como um único sistema estrutural. Tal interação pode ter diferentes propósitos:

A) Conectar elementos à estrutura de apoio;

B) Garantir o comportamento global pretendido para os subsistemas pré-moldados, como a ação de diafragma nos subsistemas de pisos, ação contraventamento em paredes compostas por elementos de painéis, etc.

C) Transferir forças do seu ponto de aplicação para um subsistema de estabilização, como um núcleo ou parede de contraventamento.

O projeto de ligações não se limita a uma questão de escolher um dispositivo de ligação apropriado, mas engloba a consideração da ligação como um todo, incluindo as juntas, os materiais para preenchimento de nichos e juntas, detalhamento das superfícies das interfaces e das zonas nas extremidades dos elementos pré-moldados, em regiões próximas às ligações. Estas zonas nas extremidades dos elementos promovem a transferência das forças dos dispositivos

de ligação para dentro dos elementos e devem ser detalhadas e armadas considerando as forças internas e as possíveis deformações. (FIB,2003).

## **2.4 Rigidez e Deformabilidade à Flexão de uma Ligação**

O estudo da rigidez e da Deformabilidade é de extrema importância para entendermos como as seções não fissuradas e as fissuradas se comportam dentro da ligação.

O presente trabalho traz em seu contexto duas classificações de rigidezes tanto para seções não fissuradas como seções fissuradas.

### **2.4.1 Rigidez à flexão tangente ou pontual**

A rigidez tangente à flexão ou inicial de uma ligação é a relação entre o momento resistido  $a$  em um determinado ponto e a rotação  $a$  ele associada, ou ainda o gradiente da curva momento-rotação para seções não fissuradas (FIGURA 2.1).

$$R_m = \frac{M}{\phi}$$

(2.1)

Sendo:

$R_m$ : Rigidez à flexão da ligação

$M$ : momento fletor interno à ligação

$\phi$  : rotação da ligação associada ao momento  $M$

A relação inversa da rigidez rotacional é denominada de Flexibilidade ou Deformabilidade ( $\lambda_m$ ), assim:

$$\lambda_m = \frac{\phi}{M}$$

(2.2)



FIGURA 2.1 – Deformabilidade causada pelo momento fletor. El Debs, 2008.

### 2.4.2 Rigidez Secante à Flexão

A rigidez secante ao momento fletor (figura 2.2a) de uma ligação por exemplo viga-pilar é definida pela relação momento- rotação (figura 2.2b), representada na Figura2.2 a seguir.

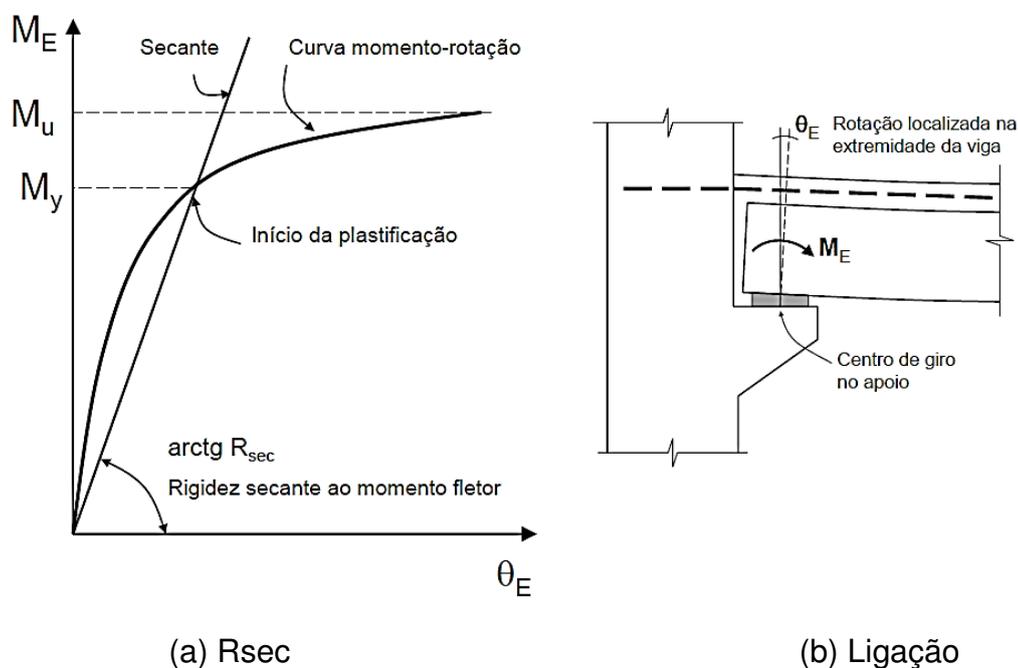


Figura 2.2 - Relação momento-rotação na ligação pilar-viga. NBR 9062 (2006).

Sendo:

$\theta_E$  é a rotação na ligação na extremidade da viga;

$M_u$  e  $M_y$  são, respectivamente, o momento último e de plastificação da ligação na

Extremidade da viga;

$M_E$  é o momento fletor mobilizado na extremidade da viga.

## 2.5 Fator de Restrição à Rotação ( $\alpha_r$ )

A partir da análise desse fator podemos classificar as nossas ligações quanto a rigidez rotacional e a resistência rotacional os dos critérios mais importantes nas ligações de elementos pré-moldados.

O fator de restrição à rotação ( $\alpha_r$ ) pode ser definido como a razão entre  $\theta_1$  (rotação da extremidade engastada de uma viga, a qual é apoiada na outra, devido a um momento unitário,  $(\frac{L}{3EI})$ ) e  $\theta_2$ , que é a rotação combinada do elemento (viga) e da ligação devida ao momento de extremidade ( $1/R$ ). Recentemente, o fator de restrição à rotação foi incorporado a norma NBR 9062 referente ao projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, que é determinado através da equação 2.2 e da figura 2.3.

$$\alpha_r = \frac{1}{1 + \frac{3(EI)_{sec}}{R_{sec} \cdot L_{ef}}} = \frac{\theta_1}{\theta_2}$$

(2.3)

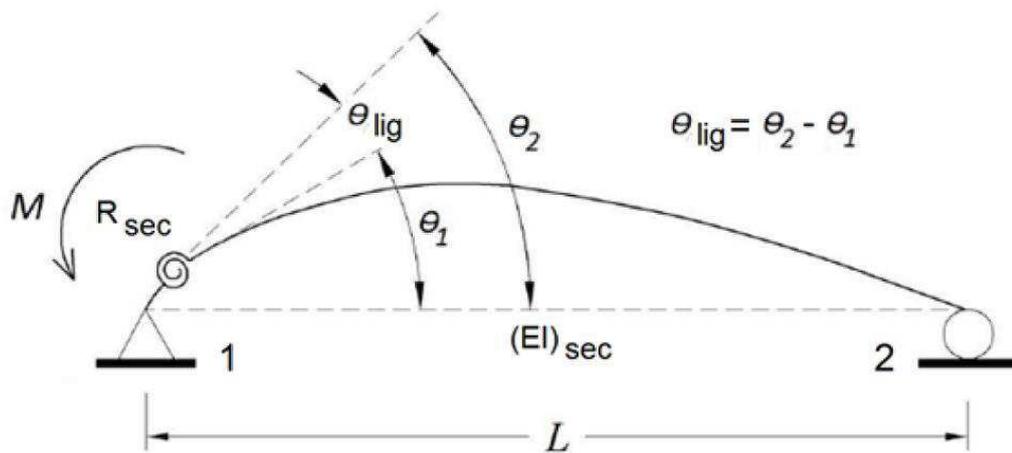


Figura 2.3- Fator de restrição à rotação. NBR 9062 (2006).

**Demonstração:**

$$\alpha r = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_{lig}} \rightarrow \alpha r = \frac{\left(\frac{L}{3.E.I}\right)}{\left(\frac{L}{3.E.I}\right) + \left(\frac{1}{R}\right)} \rightarrow \alpha r = \frac{\left(\frac{L}{3.E.I}\right)}{\left(\frac{R.L + 3.E.I}{3.E.I.R}\right)}$$

$$\alpha r = \left(\frac{L}{3.E.I}\right) \cdot \left(\frac{3.E.I.R}{R.L + 3.E.I}\right) \rightarrow \alpha r = \frac{R.L}{R.L + 3.E.I} \rightarrow$$

$$\alpha r = \frac{1}{1 + \left(\frac{3.E.I}{R.L}\right)} \rightarrow \alpha r = \frac{1}{1 + \frac{3.(E.I)_{sec}}{R_{sec}.L_{ef}}}$$

[Hadade (2016) ]

(2.4)

Onde:

**(EI)**<sub>sec</sub>: rigidez secante da viga conforme a ABNT NBR 6118 (2014);

**L<sub>ef</sub>**: vão efetivo entre os apoios, ou seja, a distância entre os centros de giro nos apoios;

**R<sub>sec</sub>**: rigidez secante da ligação viga-pilar;

**θ<sub>1</sub>**: rotação da extremidade do elemento;

**θ<sub>2</sub>**: rotação combinada do elemento e da ligação devido ao momento de extremidade.

## 2.6 Classificação das Ligações Quanto a sua Vinculação

O tipo de ligação está diretamente correlacionado com o custo da estrutura pré-fabricada, quanto maior for a complexidade da ligação maior será o custo. De acordo com a NBR 9062 (2006), existe somente um tipo de ligação, denominado ligação semirrígida. Esta ligação pode variar de rotulada a engastada dependendo do seu fator de restrição à rotação.

O estudo das ligações está vinculado a rigidez rotacional e a resistência de cada ligação presente nas estruturas.

Dentro do estudo da rigidez é detectado um parâmetro de restrição a rotação que é dado conforme a NBR 9062 (2006), podendo variar de 0 a 1. É considerado engastamento perfeito quando esse valor é 1, exemplo se uma ligação que transmite 65% do momento o valor de alfa será de 0,65. Tem-se a seguinte classificação das ligações:

Rotulada:  $\alpha_r \leq 0,15$ ;

Semirrígida:  $0,15 \leq \alpha_r \leq 0,85$ ;

Rígida:  $\alpha_r \geq 0,85$

### 2.6.1 Ligação Rotulada

As ligações rotuladas têm como características transmitir além dos esforços verticais os esforços horizontais entre as peças.

Este tipo de ligação tem fator de resistência à rotação abaixo de 0,15.

A ligação rotulada deve prever capacidade rotacional, principalmente no Estado-Limite de serviço. Esta capacidade permite que não surja patologia na estrutura, e que não sejam introduzidos esforços indesejados e não previstos no projeto.

## 2.6.2 Ligação Semirrígida

As ligações ditas como semirrígidas, tem como propriedade de resistir a uma parte do momento fletor de engastamento das peças. Portanto para que essa ligação tenha esse efeito, é necessário que exista a resistência a rotação, de maneira que ocorra o surgimento do binário relativo ao momento aplicado.

O fator de restrição que engloba as ligações semirrígidas deve estar compreendido entre os parâmetros  $0,15 \leq \alpha_r \leq 0,85$ .

De acordo com MELO (2007), geralmente, esse tipo de ligação se procede por binários formados pelos pinos, por concretagem vertical simples, e concretagem vertical com solda.

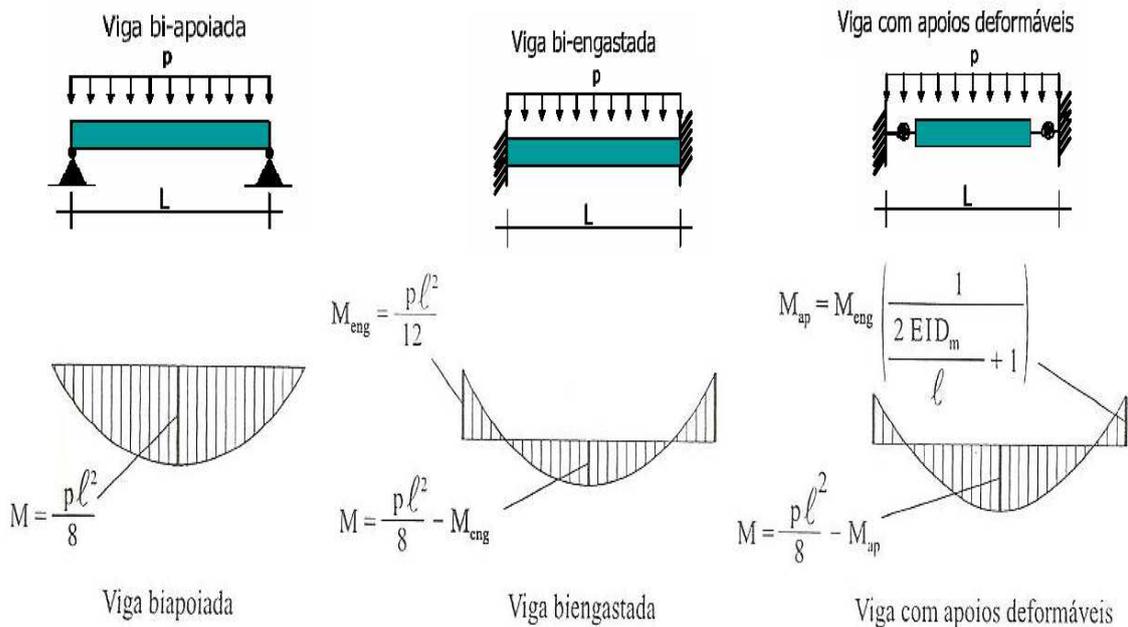
## 2.6.3 Ligação Rígida

A ligação engastada é aquela cujo fator de restrição à rotação é maior que 0,85. Neste caso, a ligação pode ser considerada como igual à realizada na obra (moldado in loco).

As ligações são classificadas no modelo estrutural conforme sua resposta às solicitações e não conforme sua execução, ou seja, qualquer ligação com luva, furos passantes, soldas e chapas, que por acaso apresentar restrição à rotação maior que 0,85, serão consideradas engastadas.

Logo importância do estudo do parâmetro ( $\alpha_r$ ) para cada tipo de classificação reside no fato de que as ligações interferem no modelo da estrutura. Assim, sabendo-se o tipo de ligação a ser utilizada na estrutura, estima-se a transferência de esforços entre suas partes.

A figura 2.4 a seguir mostra um exemplo da diferença de comportamento de uma viga, de acordo com a sua vinculação, em que a viga articulada permite o giro nas extremidades, aumentando o momento fletor no meio do vão e não transmitindo momento algum ao pilar. Já a viga bi engastada reduz o seu momento no meio do vão e transmite momento para o pilar. Já a viga com ligação semirrígida possui um comportamento intermediário.



**Figura 2.4 - Variação dos momentos fletores de viga em função da Deformabilidade ao momento fletor das ligações nos apoios. El Debs (2000).**

Onde:

EI – Rigidez à flexão da barra;

l – Vão da viga;

D<sub>m</sub> – Deformabilidade da ligação no apoio elástico;

M<sub>ap</sub> e M<sub>eng</sub> – Momento no apoio e no engastamento respectivamente;

p – Carregamento linearmente distribuído.

Conforme a ABNT NBR 9062 (2006), de modo geral, as regras e processos de cálculo relativos às estruturas moldadas no local, estas por sua vez regidas pela ABNT NBR 6118 (2014), aplicam-se às estruturas de concreto pré-moldado. Deve-se, porém, respeitar algumas peculiaridades deste tipo de estrutura como:

A capacidade das estruturas pré-moldadas deve ser governada pelo esgotamento da capacidade de resistência dos elementos estruturais e não pelo esgotamento da capacidade de resistência das ligações. A influência desfavorável do comportamento efetivo das ligações deve ser levada em conta na análise de estabilidade;

A estrutura deve ser analisada, em relação à estabilidade, em todas suas fases, considerando o comportamento das ligações na época da montagem, que podem ser diferentes daquelas da estrutura concluída;

Na prática, nem toda ligação é totalmente rígida ou articulada totalmente, principalmente nas ligações semirrígidas ainda mais quando aparecem fissuras. Portanto os graus de flexibilidade influenciam no comportamento da redistribuição de esforços e o deslocamento em toda a estrutura.

Conforme foi estudado o parâmetro  $\alpha_r$ , fator de restrição de rotação, apresenta, em Ferreira *et al.* (2002), uma proposta de classificação quanto a resistência das ligações semirrígidas de concreto pré-moldado conforme indicado na TABELA 2.1.

ZONAS	FATOR DE RESTRIÇÃO À ROTAÇÃO $\alpha_R$	COEFICIENTE DE ENGASTAMENTO PARCIAL $M_E/M_R$	CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES
ZONA I	$0 \leq \alpha_R < 0,14$	$0 \leq M_E/M_R < 0,2$	ARTICULADAS
ZONA II	$0,14 \leq \alpha_R < 0,4$	$0,2 \leq M_E/M_R < 0,5$	SEMIRRÍGIDAS COM RESISTÊNCIA BAIXA
ZONA III	$0,4 \leq \alpha_R < 0,67$	$0,5 \leq M_E/M_R < 0,75$	SEMIRRÍGIDAS COM RESISTÊNCIA MÉDIA
ZONA IV	$0,67 \leq \alpha_R < 0,86$	$0,75 \leq M_E/M_R < 0,9$	SEMIRRÍGIDAS COM RESISTÊNCIA ALTA
ZONA V	$0,86 \leq \alpha_R < 1,0$	$0,9 \leq M_E/M_R < 1,0$	PERFEITAMENTE RÍGIDAS

**Tabela 2.1. Fonte: FERREIRA**

Assim, o valor de  $\alpha_r$  pode variar de 0 a 1, sendo 0 o valor indicativo de ligação totalmente livre à rotação e 1 para engastamento perfeito. Daí, a título de exemplo, para uma ligação qualquer que transmita 35% do momento de engastamento perfeito, o valor de  $\alpha_r$  será de 0,35. Sendo classificada de acordo com a tabela como semirrígida com a resistência baixa, o fator de restrição à rotação da ligação é um importante parâmetro para definição do comportamento da ligação no apoio que poderá ser classificado como articulado (rotulado), semirrígido e rígido (engastado).

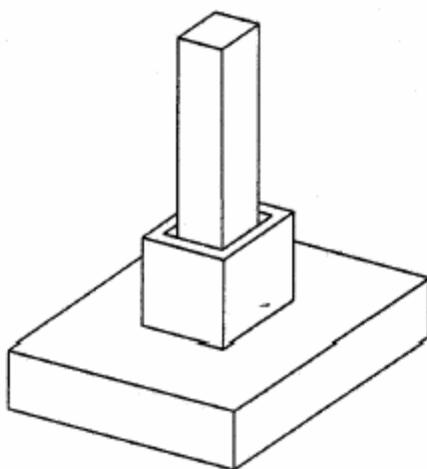
Conclui-se ainda que, em geral, as ligações mais simples geram estruturas mais solicitadas aos momentos fletores. Já ligações que mais se aproximam às das estruturas de concreto moldado in loco, têm melhor transmissão desses momentos. Estruturas com as ligações rígidas, porém, acabam por exigir maior trabalho de execução, reduzindo em grande parte a vantagem do uso do pré-moldado como solução construtiva. Este é um grande exemplo da importância do conhecimento e classificação das ligações a serem utilizadas entre elementos construtivos.

## **2.6.4 Mecanismos de Transferência de Esforços**

Nas ligações entre elementos pré-moldados pode-se recorrer a uma variedade de recursos. A seguir serão apresentados os principais modos de transmitir os esforços.

### **2.6.4.1 Encaixes**

De acordo com El Debs (2000), os objetivos de uma ligação por encaixe são: impedir deslocamentos relativos e disfarçar a ligação. O manual da FIB (2003) diz que uma ligação pode ser concebida pelo encaixe um componente dentro do outro em preenchendo o espaço vazio com graute ou concreto especial, ou ainda com adesivos. Exemplo clássico de ligação por encaixe é a ligação pilar-fundação por meio de cálice de fundação, como pode ser observado na figura 2.5.

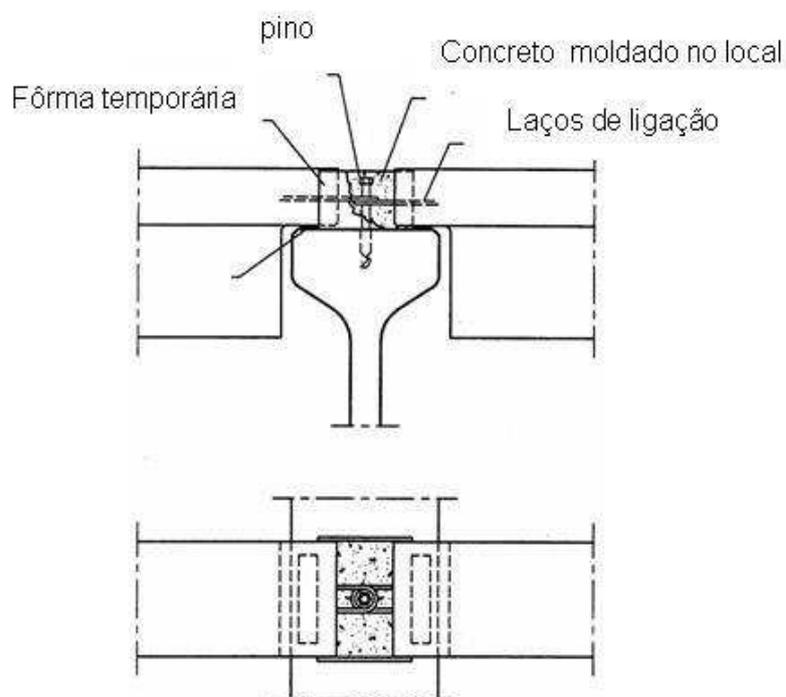


**Figura 2.5 – Ligação por encaixe [FIB (2003)]**

### 2.6.4.2 Barras Dobradas

Duas ou mais barras adjacentes podem ser acopladas longitudinalmente dentro de um elemento prismático de concreto confinado por estribos. A transmissão das forças de uma barra para a outra é garantida quando o comprimento da dobra é suficiente e o distanciamento entre as barras não é superior a um certo limite.

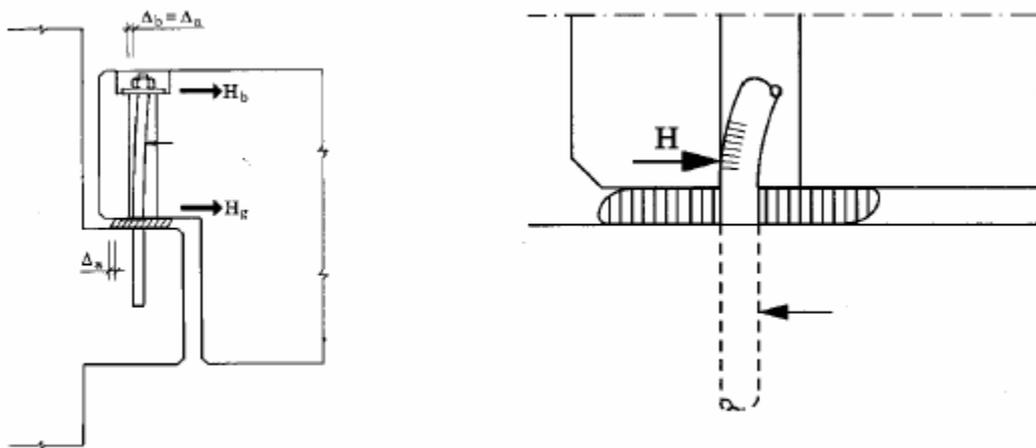
A ancoragem por dobra é frequentemente empregada para conectar elementos pré-moldados, que neste caso, são dotados de barras salientes, as quais são preenchidas com concreto moldado no local após a montagem. As ancoragens das extremidades podem se apresentar em forma de laços, dobras, ganchos e similares. A figura 2.6 ilustra uma ligação através de uma barra transversal conectando barras em laço e com posterior concreto moldado no local.



**Figura 2.6 – Barras transversal conectando barras em Laço [FIB (2003) ]**

### 2.6.4.3 Ação de Pino

De acordo com o Manual da FIB, transferência de ações horizontais de um elemento para o outro em estruturas pré-moldadas é geralmente feita por meio de ligações que utilizam chumbadores, nos quais aparece uma ação de pino, conforme apresentada na Figura 2.7. Neste caso, o chumbador é solicitado por cisalhamento na junta de interface, sendo apoiado por tensões de contato ao longo do seu trecho que está inserido no concreto, sendo que este estado de solicitações gera deformações por flexão no chumbador.



*Figura 2.7 – Transferência da força cortante através do efeito de pino [FIB (2003)]*

### 2.6.4.4 Aderência

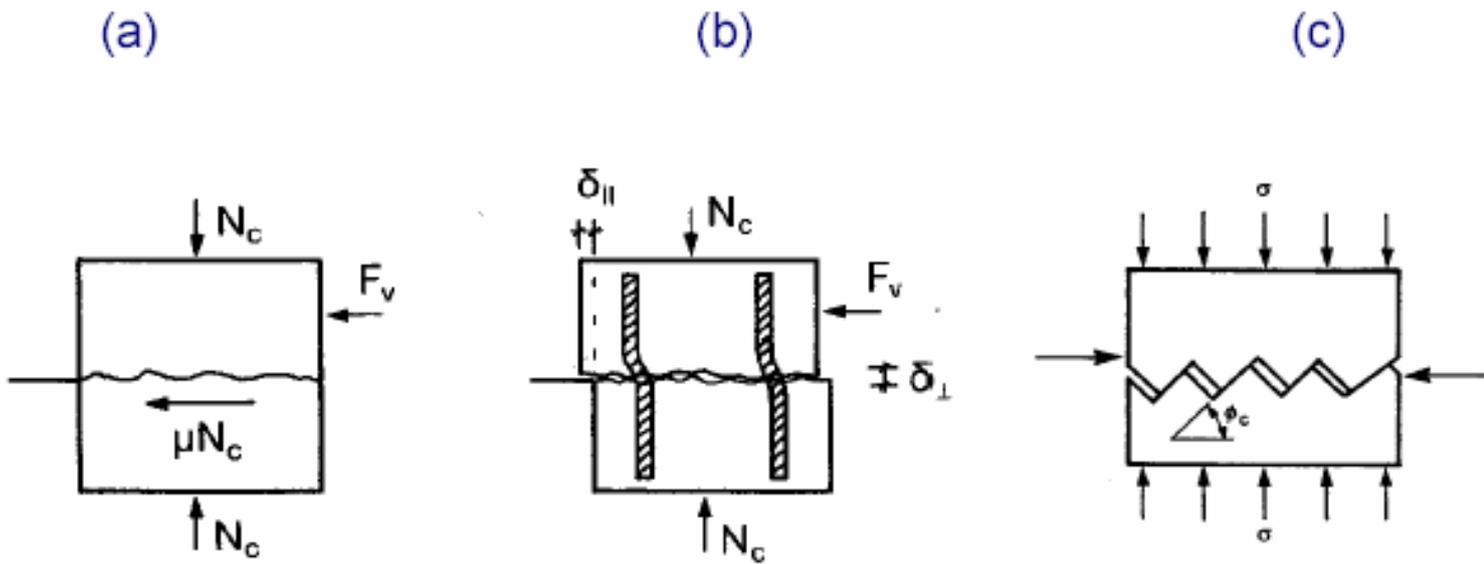
A ligação por aderência entre o concreto pré-moldado e o concreto moldado no local somente é considerada para baixas tensões nas interfaces, como por exemplo em ação composta entre as capas de concreto e as lajes de piso. Os fatores que afetam a aderência e a transferência de cisalhamento na superfície da interface são: a rugosidade da superfície; a resistência na superfície e a limpeza na superfície.

Fatores como limpeza, adensamento, cura e os cuidados em se molhar bem a superfície do concreto possuem maior influência na resistência ao cisalhamento da interface. Na verdade, através de uma combinação ótima desses fatores, em conjunto com um estudo adequado de traço é possível desenvolver uma boa resistência com uma superfície lisa como por exemplo no caso de extrusão, de formas

deslizantes ou apenas por adensamento, o qual é igual ou mesmo maior que aquele obtido para uma superfície rugosa, onde se tem uma menor preocupação com o tratamento da superfície.

#### **2.6.4.5 Atrito**

Em uma junta de interface com alguma rugosidade, as forças de cisalhamento são basicamente transferidas por atrito. Todavia, tensões de compressão são necessárias na interface para criar a resistência ao atrito (fig. 2.8 a). Uma força de compressão permanente pode ser obtida pela força de gravidade que é transferida através da junta ou por meio de protensão. Para muitas aplicações não é possível obter uma força de compressão nesta direção. Todavia, é possível induzir forças de compressão por meio de barras de armaduras, as quais são colocadas através da junta e deformada quando a ligação é solicitada por cisalhamento (Fig. 2.8 b). Por causa da rugosidade na interface, uma pequena junta de separação terá lugar quando a junta é solicitada por cisalhamento e ocorre um deslizamento ao longo da interface. A junta de separação gera tensões nas barras das armaduras e a força de tração é equilibrada por uma força de compressão através da interface. A força de compressão induzida torna possível a transferência de cisalhamento por ação do atrito, o tão conhecido efeito atrito-cisalhamento (fig. 2.8 c). A resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da armadura transversal e do coeficiente de atrito [FERREIRA (2008) ]. A Figura 2.9 mostra uma laje alveolar de piso, onde ocorre este tipo de ligação.



**Figura 2.8 – Transferência de forças de cisalhamento por atrito [FIB (2003)]**

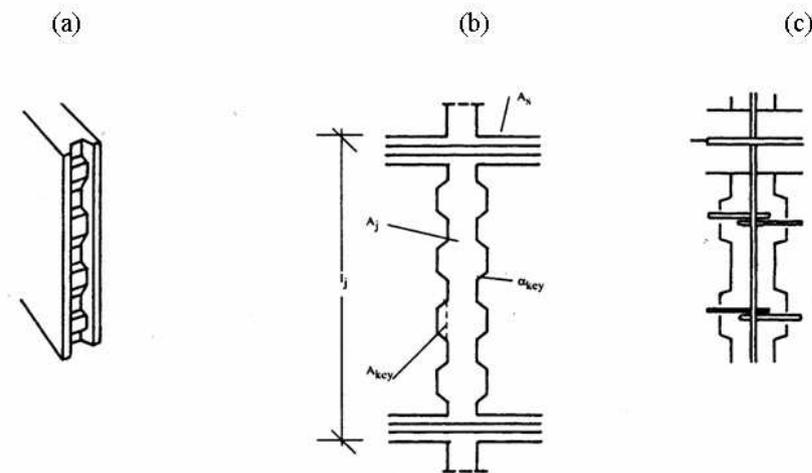


**Figura 2.9 – Superfície rugosa em lajes alveolares [Ferreira (2008)]**

### 2.6.4.6 Chaves de Cisalhamento

Chaves de cisalhamento são mecanismos que transferem os esforços de cisalhamento através de juntas com faces dentadas, como pode ser observado na figura 2.10a. A chave impede o deslizamento da junta. O impedimento de deslizamento é efetuado por meio de tirantes no topo e na base da junta, conforme figura 2.10b. Uma outra opção é colocar armadura em laços transversais ao longo do

comprimento da junta. (Figura 2.10c). Este sistema é utilizado na ligação de painéis pré-fabricados e também em paredes de concreto, conforme a figura 2.11.



**Figura 2.10 – Transferência de forças em chave de cisalhamento. Ferreira (2008) ]**



**Figura 2.11 – Paredes de concreto ligadas pelas chaves de cisalhamento. Ferreira (2008) ]**

#### **2.6.4.7 Ligações Soldadas**

Neste tipo de ligação estão presentes os elementos metálicos como perfis e chapas de aço. Esses elementos são fixados nas faces externas dos elementos, normalmente ligados à armadura principal por meio de solda. Com esses conectores metálicos, também chamados de insertos metálicos, pode-se recair em determinados tipos de ligações empregadas nas estruturas metálicas, por meio de soldas e parafusos. El Debs (2000) adverte que ao utilizar a solda deve-se levar em conta as

possíveis dificuldades de montagem devido às deformações produzidas pela solda, redução de resistência no caso de ações com grande número de repetições e prejuízos na aderência da barra com o concreto junto à solda. A figura 2.12 mostram exemplo de ligações soldadas.



**Figura 2.12 – Exemplo de ligação viga-pilar com chapa soldada [HADADE (2016) ]**

#### **2.6.4.8 Ligações Protendidas (Pós Tensão)**

A técnica da pós-tensão é empregada em construções segmentadas e em paredes de edifícios altos. Bainhas são instaladas dentro dos elementos pré-moldadas e, após a montagem, os cabos de protensão são colocados nas bainhas e pós-tensionados. As ligações entre os elementos são dimensionadas para resistir às forças de tração e de cisalhamento [ FERREIRA (2008) ]

### **2.7 Transferência de Forças nas Ligações**

A transferência de forças nas ligações pode ser dividida em 3 formas básicas:

#### **2.7.1 Transferência de Força de Compressão**

El Debs (2000) afirma que a transferência de forças de compressão pode ser feita por meio de: com argamassa de assentamento ou enchimento, com elastômeros ou com elementos metálicos, como chapas ou cantoneiras fixadas nas

partes em contato. De acordo com o autor deve-se tomar cuidado com irregularidades na superfície, que podem atrapalhar o contato direto. A figura 2.13 mostra alguns problemas que podem ocorrer no contato direto de superfícies. Com isso, só se utiliza apoio direto entre elementos para baixas tensões e/ou quando se consegue muita exatidão na fabricação.

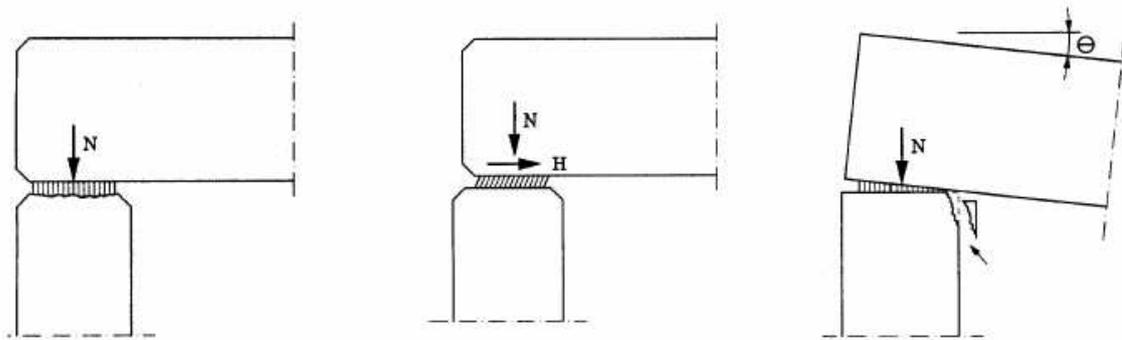


**Figura 2.13 – Superfície de contato irregulares nos apoios [FIB (2003) ]**

O manual da FIB (2003) afirma que argamassa podem ser empregados para nivelar (compensar) as irregularidades entre as superfícies na interface entre os elementos. Materiais deformáveis para apoios como as almofadas de apoio com neoprene também são empregadas para compensar as irregularidades e distribuir melhor as tensões sobre a área de contato. Este tipo de almofada é utilizado geralmente para apoios de vigas e lajes de pisos. Acima de certas espessuras e carregamentos, as almofadas de apoio podem ser feitas com neoprene fretado com chapas metálicas de reforço intermediário que produzem um confinamento às deformações transversais na almofada, aumentando a sua resistência e diminuindo a sua Deformabilidade.

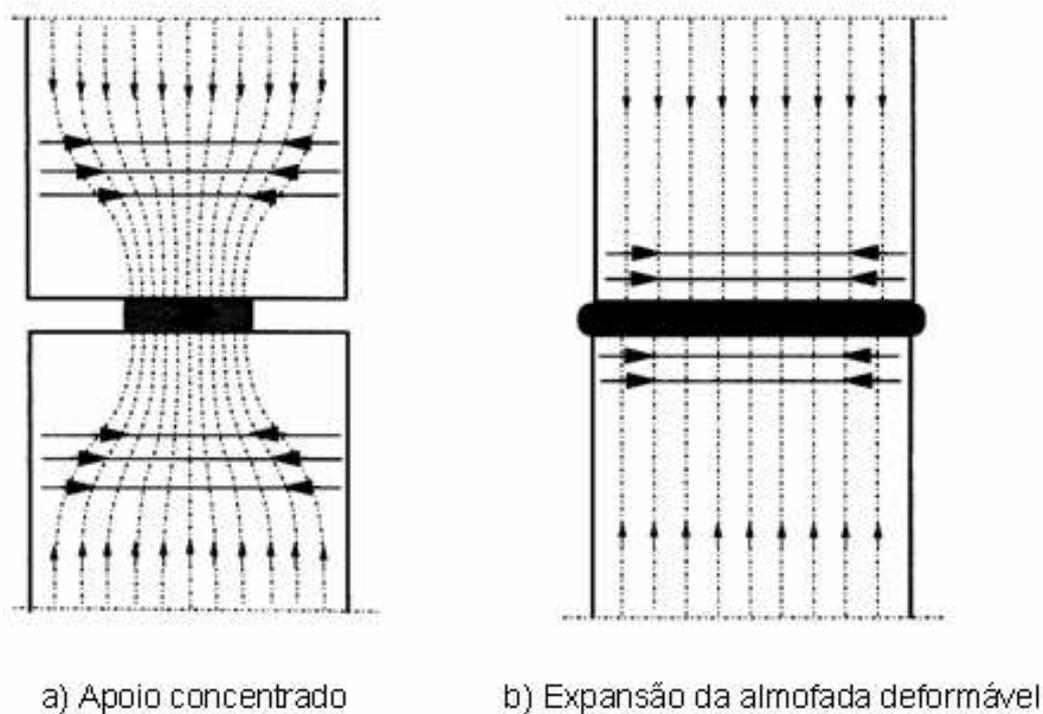
O Manual também adverte que as almofadas de apoio devem ser posicionadas não faceando as bordas dos elementos para evitar a transferência de forças de contato nessas bordas, o que poderia resultar em danos localizados. A

almofada também deve dar liberdade para a viga fletir livremente de modo a evitar o contato entre a parte inferior da viga e a bordado elemento de apoio. A figura 2.14 mostra as condições de carregamento com almofadas de elastômero. Note que haverá risco de lascamento caso a almofada não possua espessura suficiente.



**Figura 2.14 – Condições de carregamento em almofada com elastômero. [FIB (2003) ]**

Quando o módulo de elasticidade do material da junta é muito inferior ao dos elementos adjacentes, tensões de fendilhamento irão se desenvolver devido à deformação transversal no material da junta (Figura 2.15). As tensões transversais de tração nas juntas deveriam ser resistidas por uma armadura apropriada de fretagem nos elementos adjacentes. (FIB, 2003).

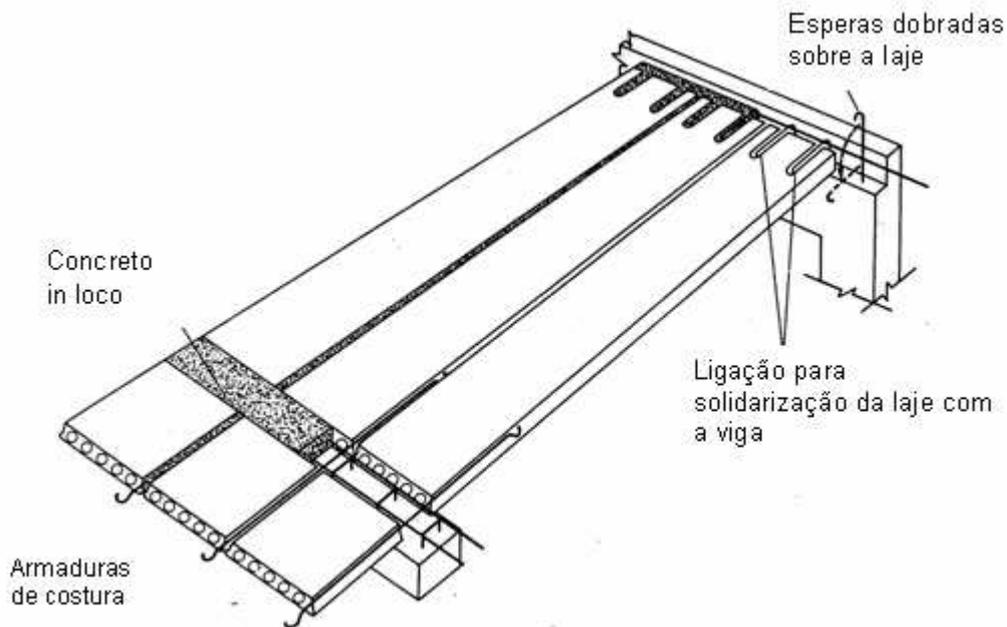


**Figura 2.15 – Tensão transversais de tração nas juntas de compressão [FIB (2003) ]**

### 2.7.2 Transferência de Força de Tração

As forças de tração são transferidas entre os elementos de concreto por meio de diferentes tipos de dispositivos mecânicos: esperas de armaduras salientes, ação de pino ,chumbadores, conectores soldados, conectores mecânicos, etc. A resistência à tração de uma ligação pode ser determinada pela resistência e pela seção transversal (ou pela área) dos componentes metálicos tracionados e/ou pela capacidade de ancoragem dos mesmos nos elementos de concreto, a qual pode ser obtida pela aderência ao longo de barras corrugadas ou por meio de vários tipos de ganchos e outras ancoragens mecânicas. De acordo com o manual da FIB (2003), a ancoragem por traspasse é frequentemente utilizada em elementos de concreto pré-moldado, em que estes possuem barras salientes para serem embutidas (inseridas ou preenchidas) em concreto moldado no local após a montagem, conforme mostra a figura 2.16. As ancoragens nas extremidades podem ser em formato de laços, dobras, ganchos ou similares. A transferência de força é conseguida através da sobreposição

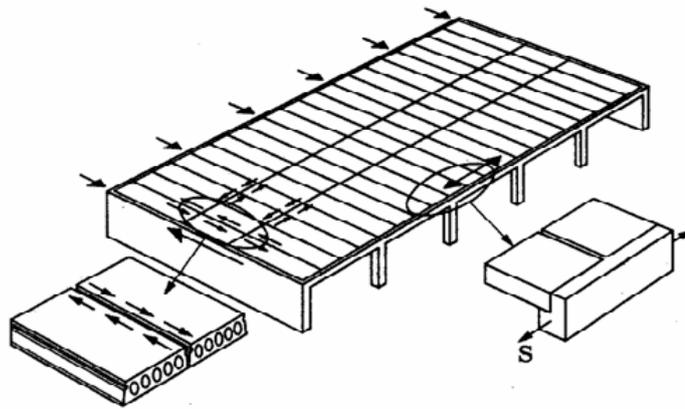
(traspasse) das armaduras salientes dos elementos, mas algumas vezes isto também pode ser feito em combinação com uma ação de pino ou por outros meios.



**Figura 2.16 - Ligação de tração com armadura de espera em nichos preenchidos com concreto**  
[FIB (2003) ]

### 2.7.3 Transferência de Forças de Cisalhamento

As forças de cisalhamento entre elementos adjacentes de concreto podem ser transferidas por meio de aderência, por meio do atrito na interface das juntas, por meio de intertravamento das chaves de cisalhamento, por meio da ação de pino em barras ou chumbadores transversais, ou por meio de dispositivos mecânicos. A figuras 2.17a e 2.17b a seguir mostra um exemplo de transferência de cisalhamento em juntas de elementos de piso.



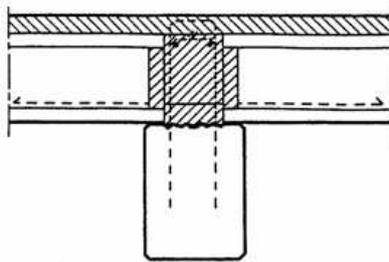
(a)



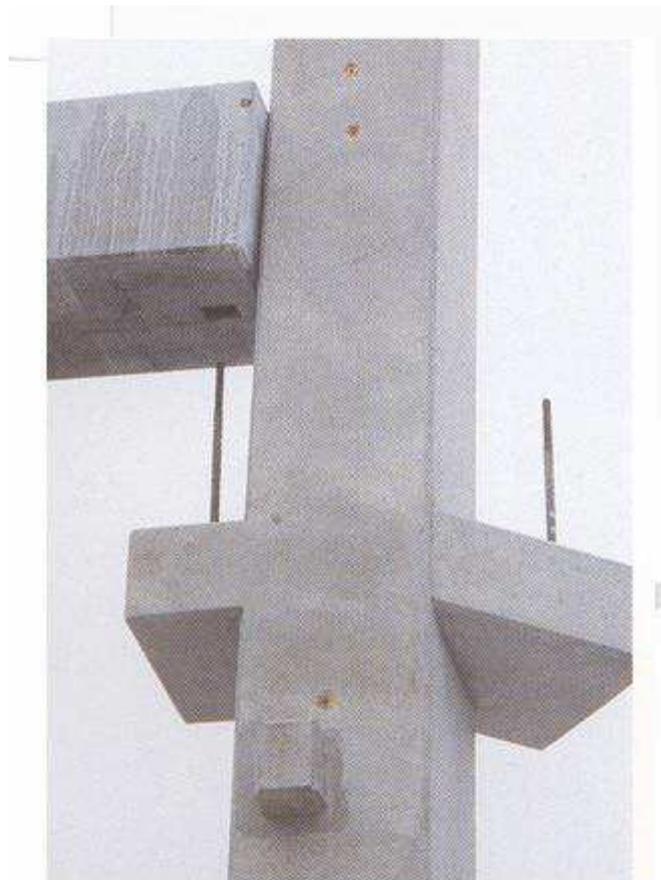
(b)

**Figura 2.17 – Tensões de cisalhamento em juntas de lajes alveolares [Ferreira (2008) ]**

A transferência do cisalhamento também pode ser através de estribos e atrito, como é o caso da figura 2.18. Uma ligação muito comum utilizada em que ocorre transferência do cisalhamento é a viga apoiada em consolos com chumbador. (Figura 2.19). Essa ligação faz com que surja o efeito de pino.



**Figura 2.18 – Transferência de cisalhamento por meio de estribos e atrito. [Ferreira (2008) ]**



**Figura 2.19 – Transferência de cisalhamento por efeito de pino. [Ferreira (2008)].**

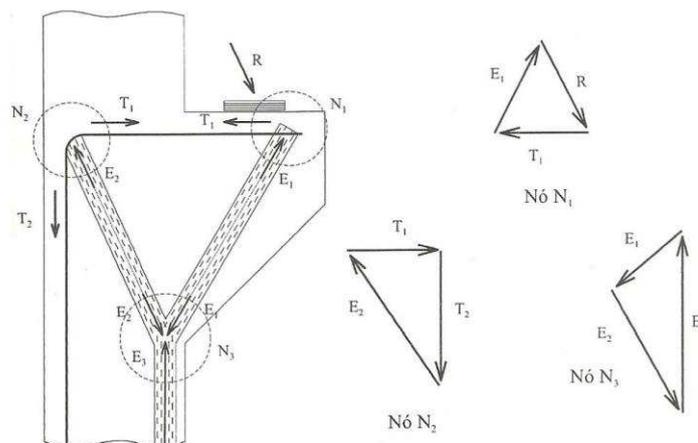
## **2.8 Modelos de Análises de Transferências de Esforços**

No projeto de elementos pré-moldados, os componentes da estrutura de concreto armado, aplica-se a hipótese de que as suas ligações atuam como perfeitamente rígidas ou perfeitamente articuladas. Outras partes, porém, onde ocorrem descontinuidades de natureza estática ou geométrica, como pontos de aplicação de cargas concentradas, nós de pórticos, aberturas, etc., são projetadas por

regras empíricas, baseadas na experiência. Estes “detalhes”, contudo, têm a mesma importância para o comportamento e a segurança das estruturas que o restante dela. A qualidade do projeto fica assim limitada pela pouca precisão com que são projetadas estas partes da estrutura e pela validade da teoria na qual seu projeto se sustenta. Daí a necessidade de se aplicar um conceito de projeto que seja consistente e válido para todos os tipos de estruturas e todas as suas partes (CAMPOS, 1996). Surge então a necessidade de busca por modelos de análise de transferência de esforços entre os elementos pré-moldados.

Existem alguns modelos de análise largamente empregados na atualidade e descritos na norma brasileira e em normativas internacionais. Dois deles serão aqui abordados por sua maior utilização observada na ABNT NBR 6118 (2014) e nas normas norte americanas referentes a pré-moldados de concreto. São os modelos das bielas e tirantes (strut-and-ties) e o modelo de atrito-cisalhamento.

O primeiro modelo, das bielas e tirantes, consiste em idealizar o comportamento do concreto, em trechos de descontinuidade, por meio de elementos comprimidos (bielas), e de elementos tracionados (tirantes). Esses elementos se conectam nos nós, resultando na formação de uma treliça idealizada conforme pode ser observado na Figura 2.20.

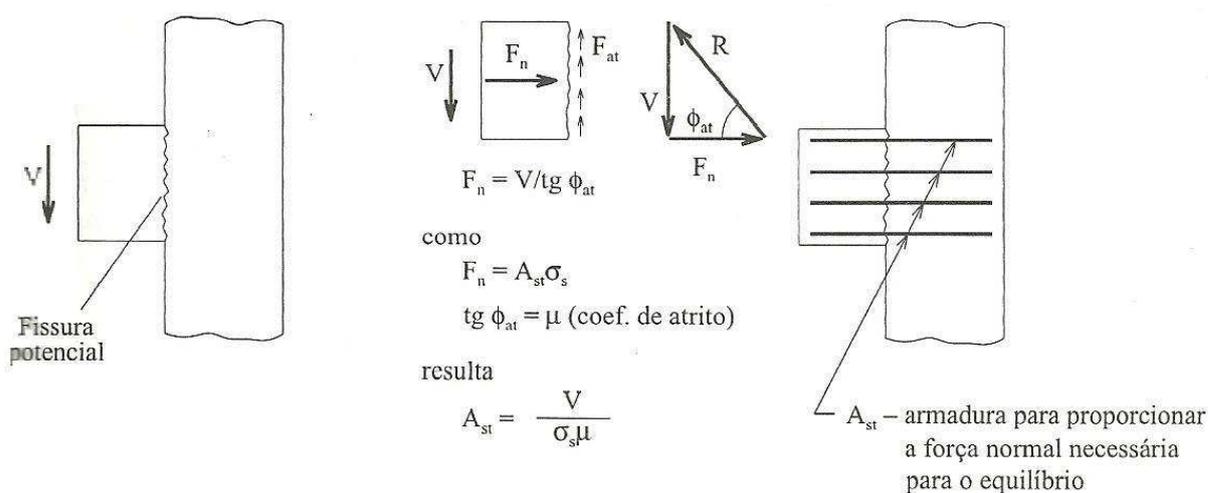


**Figura 2.20 - Modelo de biela e tirante. El Debs (2000).**

Os esforços nos elementos comprimidos são resistidos pelo concreto, com a capacidade resistente da peça limitada à resistência à compressão do concreto e da seção fictícia da biela. Já os esforços nos tirantes são de responsabilidade das

armaduras e sua capacidade resistente função da área da armadura e da tensão de escoamento do aço.

Já o modelo de atrito-cisalhamento assume como ideia básica o fato do concreto, quando submetido a tensões de cisalhamento ( $V$ ), desenvolver uma fissura no plano dessas tensões. Essa tendência de separação das partes se dá em um plano definido, o plano da fissura potencial, com atuação de esforço normal ( $F_n$ ) a esse plano. Essa força normal mobiliza a força de atrito ( $F_{at}$ ) de modo a equilibrar o cisalhamento atuante. São então previstas armaduras perpendiculares a esse plano de secção e, com a utilização da teoria de atrito de Coulomb, pode-se determinar a armadura necessária para garantir a resistência ao cisalhamento. A Figura 2.21 a seguir auxilia na visualização do acima descrito.

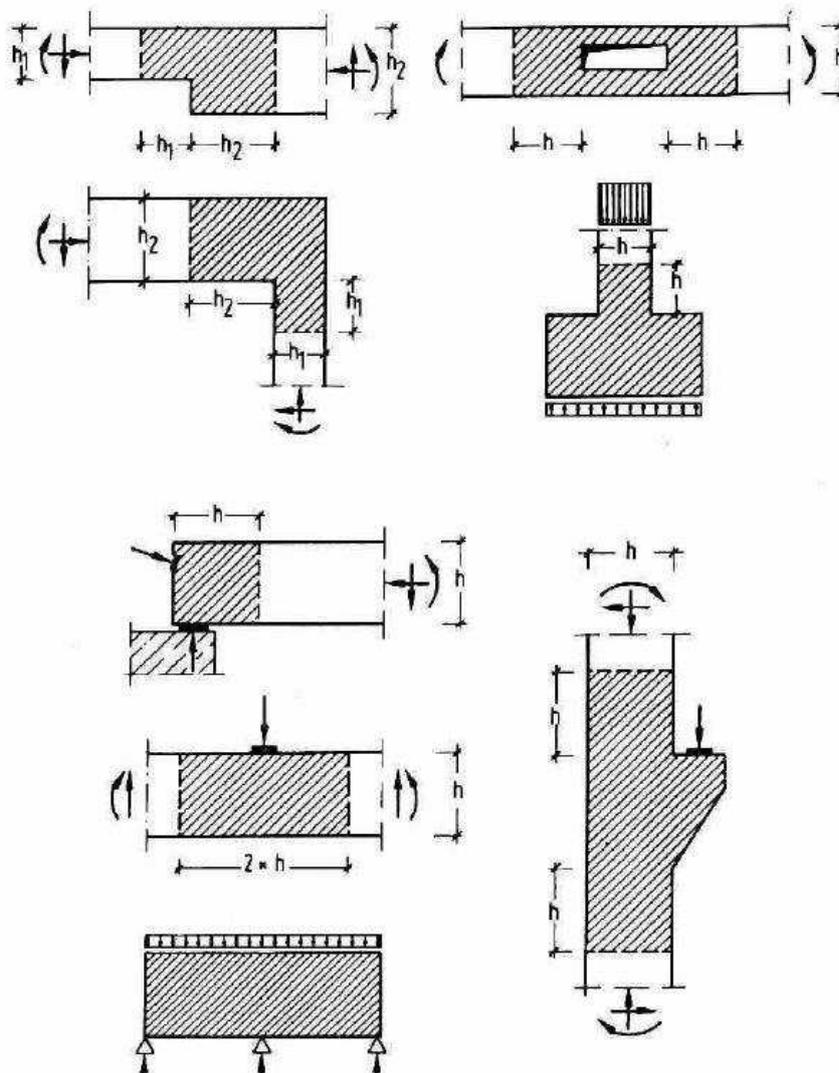


**Figura 2.21- Modelo de atrito-cisalhamento. El Debs (2000).**

Levando-se em conta o modelo inicialmente descrito das bielas e tirantes, ao se observar mais de perto os diferentes elementos constitutivos das estruturas de concreto pré-moldado, uma discretização das peças pode ser realizada. Assim pode-se falar genericamente de um elemento pré-moldado, dividindo-o em zonas de distúrbio B e D (CAMPOS, 1996). Por exemplo, uma viga pré-moldada pode ser avaliada quanto ao seu comportamento nas suas infinitas partes constituintes. Pode-se, no entanto, agrupar essas partes em áreas de igual comportamento, já que, em média, determinadas partes da peça irão apresentar comportamento comum entre si, porém, significativamente diferente de outros trechos. O trecho da ligação entre a viga

e o pilar, por exemplo, é um trecho que pode ser classificado como zona D, de comportamento totalmente singular, particular. Essa singularidade pode ser melhor percebida quando a peça é analisada sob a ótica da distribuição dos esforços solicitantes. Observe os casos da Figura 2.22.

Tal subdivisão em zonas tem sua importância estabelecida quando se observa o fato dos procedimentos de projeto para as regiões B já estarem bem estabelecidos. Com isso torna-se necessário analisar e desenvolver o método de bielas e tirantes para as regiões D, diminuindo-se assim o trabalho de análise.



**Figura 2.22 - Regiões D (áreas sombreadas) com distribuição de deformações não lineares por descontinuidades geométricas ou estáticas. Campos (1996).**

## 2.9 Componentes das Ligações

Antes de se abordar as tipologias de ligações, que justificam a realização desse trabalho, faz-se necessário tratar do tema da ligação entre peças pré-moldadas por meio dos componentes; juntas com e sem argamassa, Aparelho de elastômeros, Chumbadores sujeitos à Força de Transversal, Consolos de Concreto e Dente Gerber. Isso porque, como será mostrado, essas são partes constituintes das ligações e estão presentes na maioria dos casos abordados, sendo o uso desses conectores bastante disseminado no Brasil, conforme dados da Associação Brasileira da Construção Industrializada (ABCI, 2015).

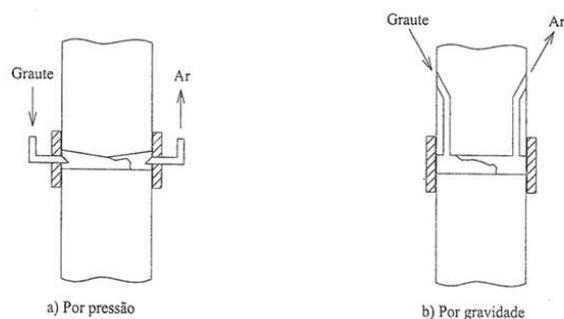
### 2.9.1 Juntas Com e Sem Argamassas

O emprego de camada de argamassa no contato entre peças pré-moldadas que serão ligadas é uma solução que possui dois principais objetivos:

- a) promover o nivelamento das superfícies de contato;
- b) distribuir as tensões de contato.

Em geral, o enchimento da junta pode ser feito de duas formas (figura 2.23):

1. Com a colocação de argamassa seca, socando manualmente o material no espaço a ser preenchido (*dry packed mortar*);
2. Com a colocação de argamassa, em forma de graute, por pressão ou por gravidade.



**Figura 2.23 - Juntas Feita por Meio de Graute. El Debs (2000)**

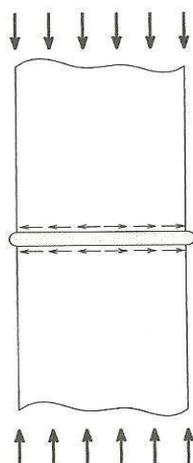
A espessura das juntas deve ser a menor possível, dentro de limites de execução e tolerância, não devendo ser superior a 10% da menor dimensão da seção transversal dos elementos a serem conectados. Isso ocorre porque as juntas estão submetidas, principalmente, a esforços de compressão que podem ainda ser acompanhados de cisalhamento. Assim a transferência de forças de compressão é governada, como já visto, pela Deformabilidade relativa da argamassa e pela ocorrência de estrangulamento da seção na junta. Se a espessura da junta for muito grande podem ocorrer problemas de perda de alinhamento da ligação, já que a argamassa apresenta baixo módulo de elasticidade em relação ao concreto dos elementos pré-moldados, sofrendo, conseqüentemente, maior deformação. O dimensionamento de uma junta, em relação aos esforços de compressão, consiste basicamente em verificar as tensões de compressão na junta e verificar os elementos pré-moldados considerando as tensões de tração provenientes do comportamento de bloco parcialmente carregado.

Já as juntas sem argamassa podem ser empregadas somente em casos específicos, quando a tensão de contato for baixa, além de haver grande precisão de execução e montagem (Introdução ao Concreto Pré-Moldado-notas de aulas, Docente: Prof. Dr. Rafael Alves de Rafael Alves de Sousa)

A NBR 9062 é bastante restritiva, limitando o emprego a elementos de pequenas dimensões, com tensão de contato menor que  $0,03f_{ck, adj.}$  ou 1 MPa, em que  $f_{ck, adj.}$  é a menor resistência dos materiais de contato.

O preenchimento com argamassa da região de ligação entre as vigas e a sua região de contato com as lajes pré-moldadas é uma prática usual que tem sido observada nas obras visitadas. Tal ligação está sujeita principalmente à transferência

das forças de compressão, que podem ser acompanhadas pelos esforços de cisalhamento. Assim, a Deformabilidade relativa da argamassa da junta, em relação à do concreto do elemento pré-moldado, governa o sistema de transferência das forças de compressão. Isso porque, a argamassa, apresenta módulo de elasticidade inferior ao do concreto dos elementos pré-moldados, deformando-se conforme o ilustrado na Figura 2.24, gerando tensões de cisalhamento.



**Figura 2.24 - Tensões de cisalhamento devido ao módulo de elasticidade da argamassa ser menor que o do concreto. El Debs (2000)**

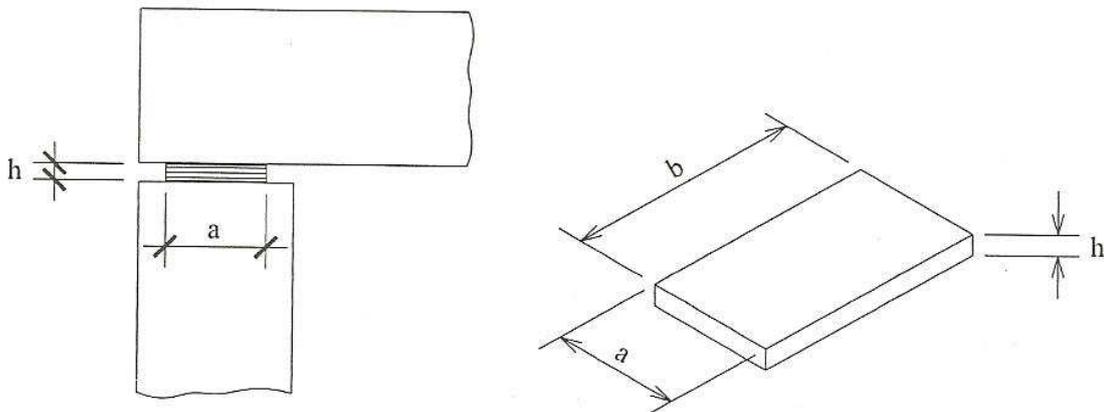
### **2.9.2 Aparelhos de Apoio de Elastômetro**

Nos projetos de ligações de estruturas pré-moldadas a transmissão de esforços entre viga/pilar são feitas através de aparelhos de apoio simples de elastômero. Tais apoios promovem uma distribuição mais uniforme das tensões de contato nas ligações entre os elementos de concreto, além de permitir relativa possibilidade de movimentos de translação e rotação para acomodação entre as peças estruturais. O material mais comumente utilizado nas ligações entre elementos de concreto pré-moldado é o policloropreno comercializado como Neoprene. Suas vantagens são inúmeras enquanto suas desvantagens ficam por conta de seu ainda elevado custo e necessidade de manutenção periódica (Siqueira, 2007).

A análise das tensões e deformações do Neoprene não é simples, principalmente em função de sua grande Deformabilidade (seu módulo de elasticidade transversal é da ordem de  $10^{-4}$  vezes o do concreto) o que gera deslocamentos da mesma ordem de grandeza das dimensões iniciais. A geometria da almofada tem uma

influência direta no comportamento global da ligação. Aumentando a área do apoio, aumenta-se o atrito na interface da ligação.

No dimensionamento desse tipo de aparelho de apoio as ações não são fatoradas, sendo usados seus valores característicos. Deve-se, no entanto, realizar uma diferenciação entre ações de curta (vento, frenagem, etc.) e de longa duração (fluência, cargas permanentes, etc.). Esse dimensionamento consiste basicamente na determinação das dimensões em planta do comprimento, largura e espessura da almofada de elastômero, conforme mostrado na Figura 2.25. Estas dimensões são função da tensão de compressão suportada com uma área  $A$  tal que:



**Figura 2.25 - Dimensões das almofadas de elastômeros. El Debs (2000).**

$$A = a \cdot b \geq \frac{N_{max}}{\sigma_{adm}} \quad (2.3)$$

Sendo:

$N_{max}$  – Máxima força normal de compressão;

$a$  e  $b$  – Dimensões conforme figura 5.3;

$\sigma_{adm}$  – Tensão admissível, valor de 7 MPa para elastômero simples.

Em geral o valor de  $b$  é fixado pela largura da viga, sendo então determinado o valor de  $a$ . Já a espessura da camada ( $h$ ) é estimada com:

$$h=2a_{h,lon} \quad (2.4)$$

$a_{h, lon}$  – deslocamento horizontal devido às ações de longa duração (fluência, retração, etc.).

### 2.9.3 Consolos

Os consolos são elementos estruturais que se projetam de pilares ou paredes para servir de apoio para outras partes da estrutura ou para cargas de utilização (EL DEBS, 2000).

Consolos são elementos estruturais prismáticos utilizados frequentemente em estruturas de concreto armado, servindo de apoio para outros elementos estruturais ou para equipamentos pesados. Os consolos se destacam entre os elementos mais usuais de ligação em estruturas pré-fabricadas. Nestes elementos há transmissão direta da carga, neles aplicada, para o pilar que lhes apoia, não sendo para eles, válidos os critérios de dimensionamento de vigas esbeltas. Eles funcionam como elementos em balanço, projetados de pilares e vigas, para apoio de outros elementos. O seu comportamento estrutural é tratado de maneira diferente das vigas, pois para o seu balanço, bastante curto, não se aplica a teoria clássica da flexão.

Segundo a NBR 6118:2014, são considerados consolos os elementos em balanço nos quais a distância ( $a$ ) da carga aplicada a face do apoio é menor ou igual a altura útil ( $d$ ) do consolo, como é mostrado na Figura 2.26.

Basicamente, o comportamento típico deste elemento é representado por um modelo de biela tirante. Neste contexto, alguns aspectos são essenciais para que o modelo apresente um comportamento adequado. Dentre estes aspectos podemos citar:

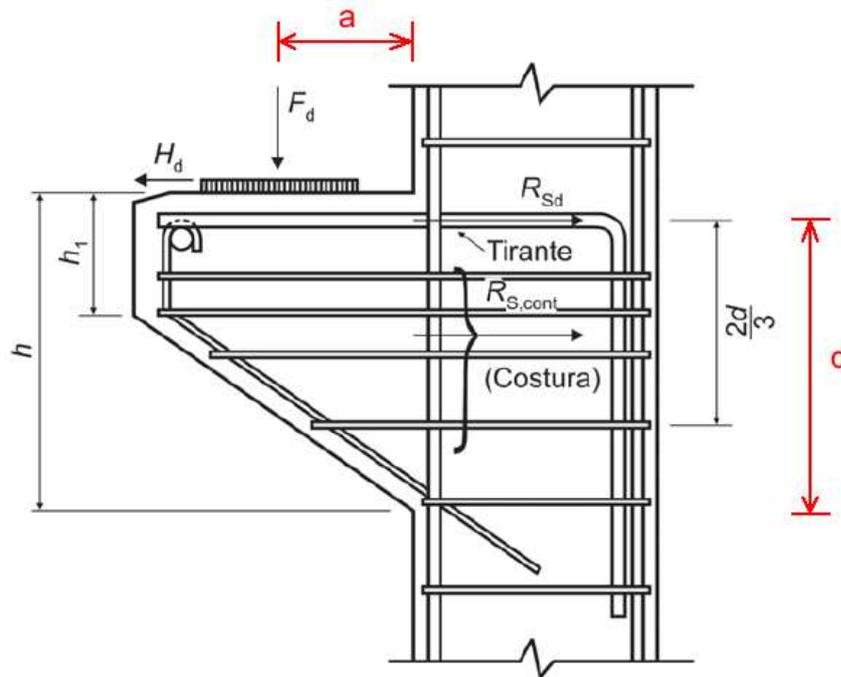
1. Ancoragem adequada do tirante;
2. Taxa de armadura limitada, de modo a garantir escoamento da armadura antes da ruptura do concreto;

3. Resistência à compressão do concreto (esmagamento da biela comprimida);

4. Consideração dos esforços horizontais;

5. No caso de excentricidades de cargas, considerar os esforços de “torção” internos ao consolo.

Segundo a NBR 9062:2006, para cada tipo de consolo, dependendo de sua classificação em função da razão entre a distância de aplicação da força a face do pilar ( $a$ ) e a altura útil do consolo ( $d$ ), deve-se adotar uma forma de dimensionamento:



**Figura 2.26 – Posicionamento das dimensões ( $a$ ) e ( $d$ ) em um consolo típico Fonte: NBR 9062:2006.**

Para  $(a/d) > 1$ , trata-se o elemento como uma viga em balanço aplicando-se o disposto na NBR 6118 para flexão e força cortante.

Para  $0,5 < (a/b) \leq 1$ , são ditos consolos curtos e o processo de dimensionamento indicado pela norma e o modelo matemático de bielas e tirantes.

Para  $(a/b) > 0,5$ , onde o elemento é dito consolo muito curto: o dimensionamento se faz supondo a ruptura ao longo do plano de ligação do consolo com seu suporte (modelo de atrito-cisalhamento).

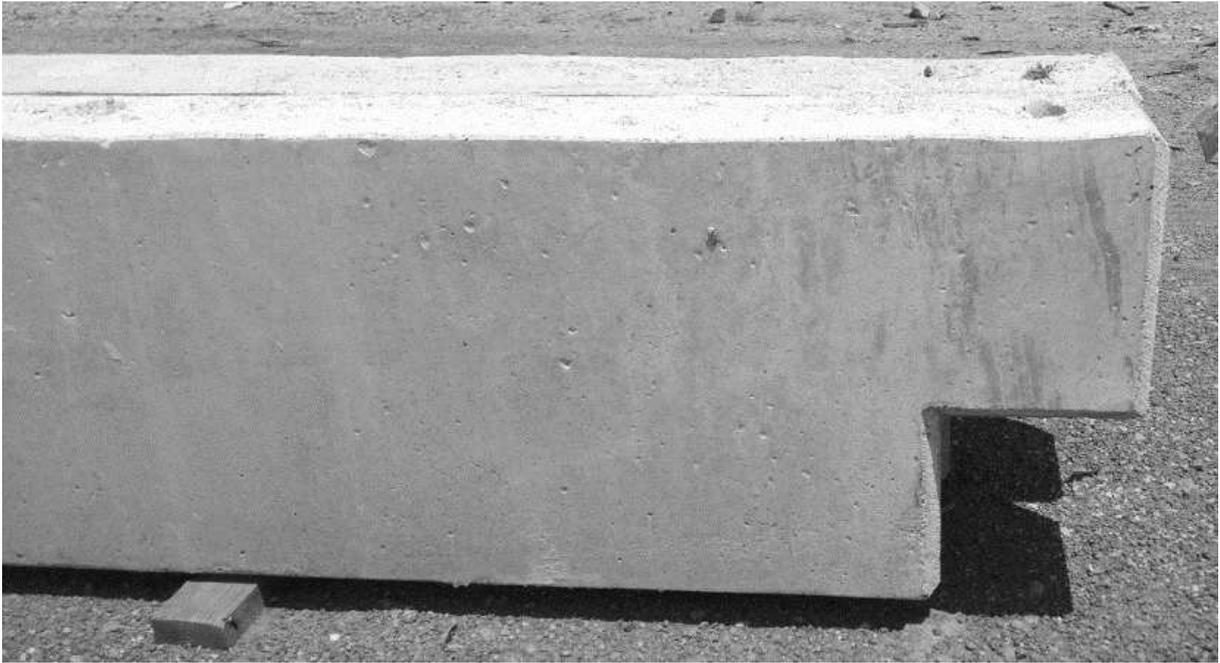
#### 2.9.4 Dente Gerber

O dente Gerber é uma saliência que se projeta na parte superior da extremidade de uma viga, com o objetivo de apoiá-la em consolo criado na face de um pilar ou na região inferior da extremidade de outra viga. São elementos onde ocorrem elevadas tensões de cisalhamento devido à redução da altura do elemento na região do apoio resultando uma elevada concentração de armadura. Usualmente ambos, consolo e dente Gerber, têm altura um pouco menor que metade da altura da viga (Figura 2.27).



*Figura 2.27- Ligação dente Gerber-consolo. El Debs (2000).*

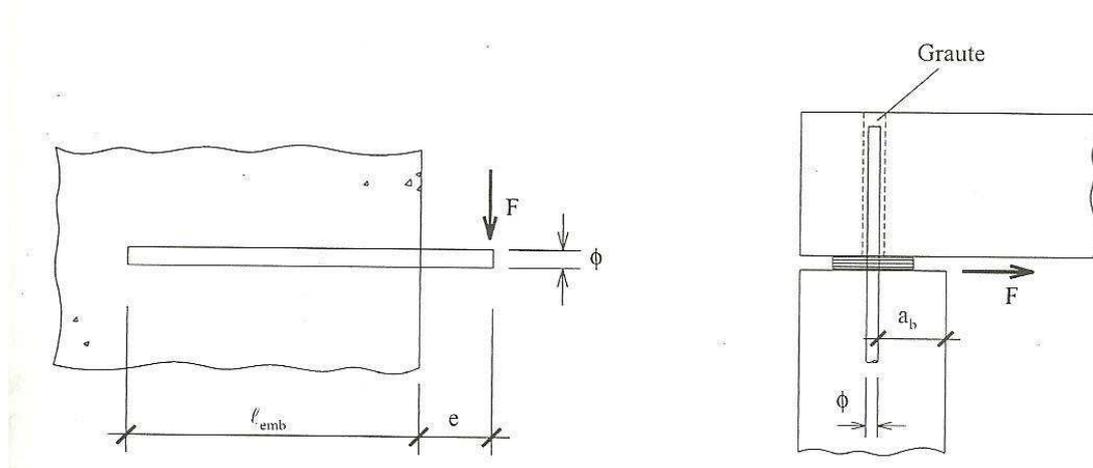
Finalmente, na Figura 2.28, são observadas duas vigas com dentes Gerber como sistema de ligação. Nesse caso pode-se ainda observar o furo para inserção do pino metálico, ou chumbador, ficando a consideração do tipo de ligação, se isostática, rotulada ou semirrígida em função da escolha dos materiais de preenchimento do pino e do resultado final da construção do elemento construtivo.



**Figura 2.28 - Vigas com dentes Gerber. El Debs (2000).**

### 2.9.5 Chumbadores Sujeitos à Força Transversal

A análise dos chumbadores sujeitos à ação transversal se baseia na disposição de forças mostrada na Figura 2.29. Seu cálculo se dá em função da força de ruptura do aço, sendo esta obtida com base em ensaios experimentais para dois casos: sem proteção de borda e com proteção de borda. Essa proteção de borda faz referência ao confinamento do chumbador na peça. Sem proteção de borda seria sem confinamento e com proteção de borda, com confinamento.



**Figura 2-29 - Exemplos de chumbadores sujeitos à ação vertical com confinamento. El Debs (2000).**

## 2.10 Tipologia das Ligações

Diante do que foi falado nos capítulos anteriores, porque os assuntos relacionados a classificação, transmissão de esforços e componentes de ligação terão extrema importância na compreensão e entendimento das ligações dos elementos pré-moldados. A produção destas devem prever como serão realizadas as montagens na obra.

Considerando que as ligações são pontos críticos das estruturas pré-moldadas e estão diretamente relacionadas ao custo, ligações mais complexas tendem gerar custos mais elevados, além disso, ligações mais rígidas favorecem a economia, mas dificultam mudanças.

Com isso percebe-se a preocupação de se tomar cuidado tanto no projeto quanto na execução das ligações entre peças pré-moldadas, de modo a impedir o aparecimento de patologias nesses locais e evitar que a obra tenha seu custo elevado.

Serão analisadas em linhas gerais as principais formas de se executar as ligações entre elementos pré-moldados.

Levando em consideração que as tipologias de ligação possuem duas divisões:

1. Ligações em elementos tipo barra, que incluem as ligações típicas de pilares e vigas.
2. Ligações em elementos tipo folha, que incluem ligações típicas de lajes e paredes.

O seguinte trabalho faz uma análise somente das ligações tipo barras e ligações vigas- lajes e lajes-lajes que são particularidades das ligações tipo folha que terão como objetivo mostrar como as principais tipologias dessa classe se conectam formando assim as ligações mais frequentes nos canteiros de obra.

### **2.10.1 Ligações Pilar-Fundações**

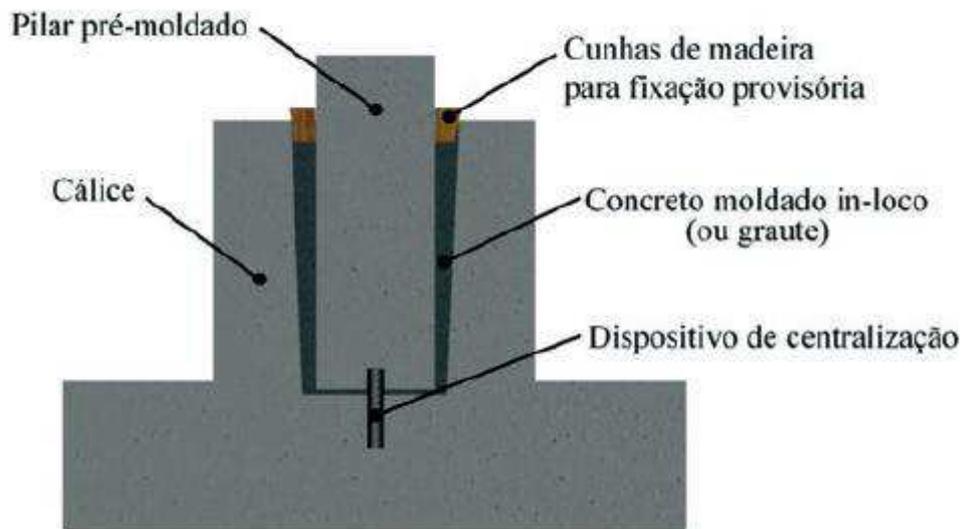
As ligações pilar-fundação tem a função de transmitir forças horizontais, verticais e momentos. Falando-se de estruturas de pequena altura, a concepção estática mais usual e mais racional é a adoção da ligação rígida de pilar-fundação, para que as ligações dos demais elementos possam ser, na maioria das vezes, ligações articuladas, de maior simplicidade executiva.

As ligações pilar-fundação mais usuais são:

1. Ligação tipo cálice.
2. Ligação com chapa metálica.

#### **2.10.1.1 Ligação tipo cálice**

A ligação tipo cálice é a mais utilizada no Brasil e a execução de uma ligação entre o pilar e a fundação inicia-se com o encaixe do pilar no cálice, que utiliza um dispositivo de centralização localizado no fundo do cálice. Nessa operação, colocam-se cunhas preenchido posteriormente com graute ou concreto, com sua resistência característica igual ou superior a maior resistência do conjunto pilar e fundação. A Figura 2.30 apresenta um esquema do corte longitudinal da conexão entre o pilar e a fundação por meio de cálice externo. Nessa figura, podem ser observadas as diferentes partes da conexão, como o dispositivo de centralização localizado na fundação, o concreto moldado in-loco (ou graute) utilizado para solidarizar o pilar com o cálice e também as cunhas para fixação provisória do pilar.



**Figura 2.30 - Ligação pilar-fundação por meio de cálice. [adaptado de EL DEBS (2000)].**

As vantagens da utilização desse tipo de ligação são:

- a) Facilidade de montagem e conseqüente rapidez na execução dessa etapa construtiva;
- b) Menor sensibilidade as imprecisões de projeto e montagem, facilitando ajustes aos desvios de execução;
- c) Boa capacidade de transmissão de forças normais e momentos fletores, tendo as vezes comportamento muito próximo ao de uma ligação monolítica;
- d) Dispensa cuidados especiais de proteção contra agentes atmosféricos e fogo pelo fato de não ter armaduras expostas.

Para facilitar o entendimento deste trabalho, a Figura 2.31 apresenta esquemas em planta e em corte da estrutura de fundação com cálice externo, onde estão identificadas as siglas da geometria (a) e (b).

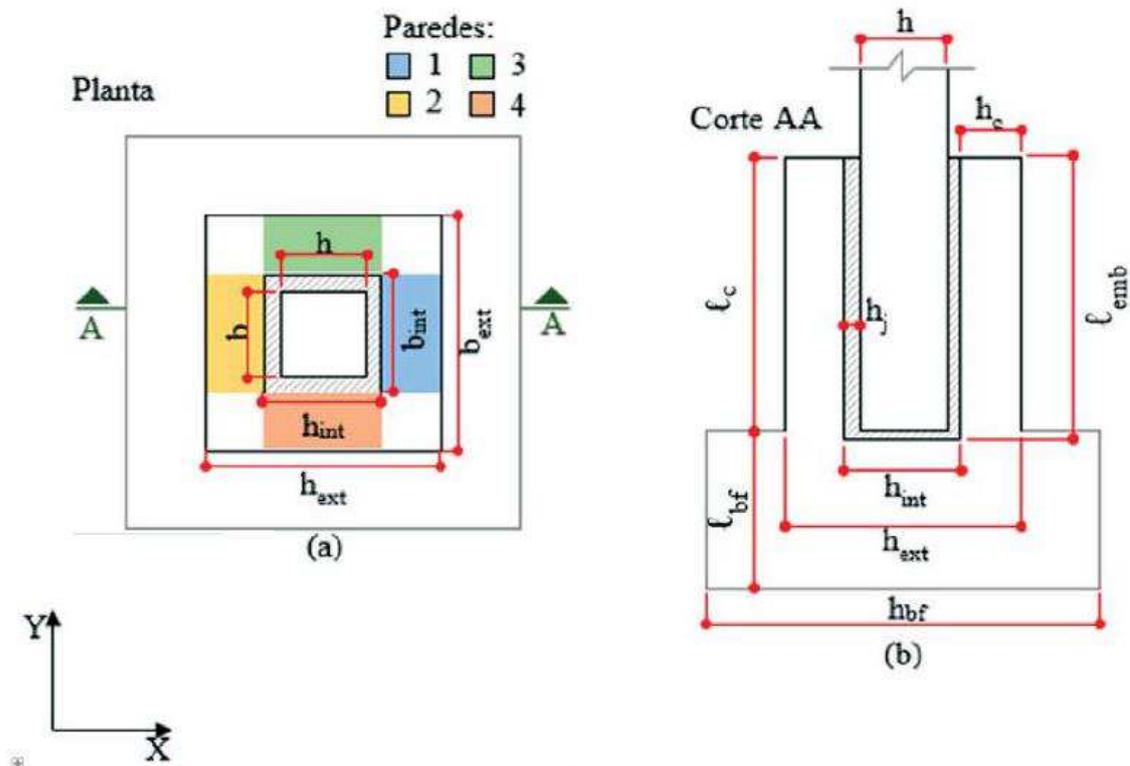


Figura 2.31 - Nomenclatura geométrica (a) e (b). El Debs (2000).

$b$ : medida da seção transversal do pilar na direção Y

$h$ : medida da seção transversal do pilar na direção X

$b_{int}$ : medida entre as faces internas das paredes na direção Y

$h_{int}$ : medida entre as faces internas das paredes do cálice na direção X

$b_{ext}$ : medida entre as faces externas das paredes na direção Y

$h_{ext}$ : medida entre as faces externas das paredes na direção X

$h_{bf}$ : medida da seção transversal do bloco de fundação ou sapata

$h_c$ : Espessura da parede do cálice

$h_j$ : Espessura da junta da face interna do cálice e face do pilar

$l_c$ : altura externa do cálice

$l_{emb}$ : comprimento de embutimento do pilar no cálice

$l_{bf}$ : altura do bloco de fundação /sapata

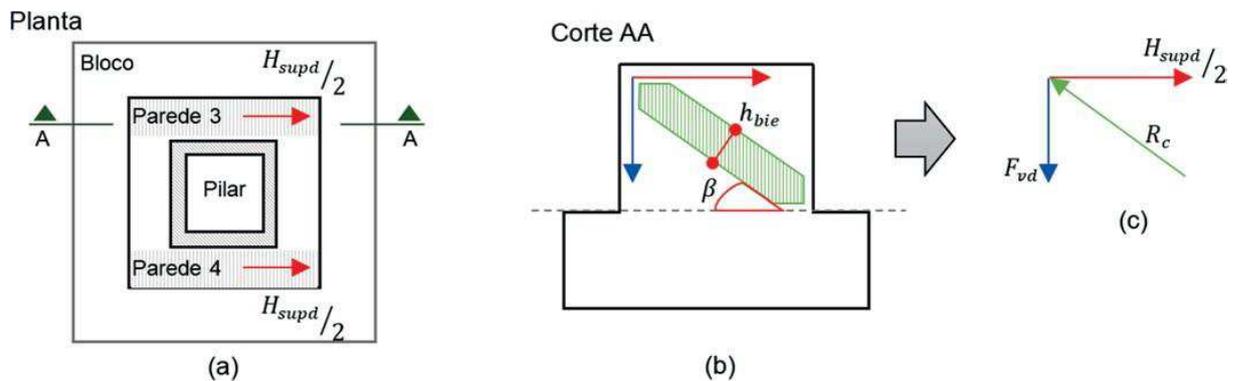
O processo de transferência de esforços do pilar para a fundação por meio do cálice observado por EL DEBS consiste em idealizar que por intermédio do concreto de preenchimento da junta, os esforços solicitantes momento fletor  $M$

e a força cortante  $V$  atuantes no pilar são transmitidas para as paredes do pilar diretamente para as paredes 1 e 2 do cálice através de pressões superiores e inferiores. A Figura 2.32 mostra um esquema de um corte da ligação pilar/fundação com o perfil de distribuição de pressões e as resultantes superiores (de cálculo)  $H_{supd}$  e inferior  $H_{inf d}$ , com suas respectivas distâncias de atuação  $y$  e  $z+y$ .

Essas pressões mobilizam forças de atrito na interface do pilar com o cálice. A norma ABNT NBR 9062:2006 considera o atrito como uma parcela da força normal para cálices com interfaces lisas. A força de atrito mobilizada na parede 1 é no sentido da força normal ( $N$ ). Já o sentido da força de atrito mobilizada na parede 2 depende da relação entre as solicitações e a geometria do cálice. A força normal do pilar e os esforços de atrito mobilizados nas paredes 1 e 2 são transmitidos para a base do cálice, onde também tendem a mobilizar o atrito no sentido horizontal. Como as paredes 3 e 4 têm maior inércia do que a parede 1 na direção de solicitação dos esforços, a pressão que atua na parede 1 será transmitida quase que em sua totalidade, por flexão para as paredes 3 e 4. Já a pressão atuante na parede 2 será transmitida, praticamente, de forma direta para a base do cálice. As forças que atuam nas paredes 3 e 4 são transmitidas para a base do cálice, apresentando-se assim como um comportamento de um consolo engastado na fundação.



transversais e longitudinais no lado tracionado e também por meio de uma biela de compressão conforme indicado na Figura 2.33 (b) e figura 2.33 (c).



**Figura 2.33 - Comportamento das paredes 3 e 4 do cálice. EL DEBS (2000)**

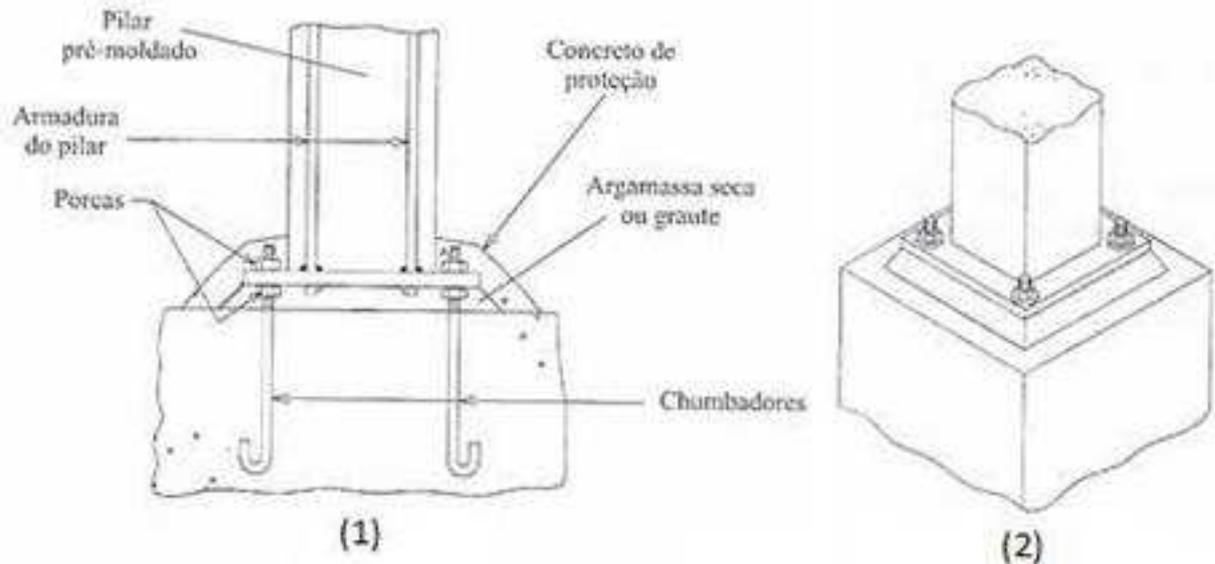
Há uma outra solução para a transferência de esforços, seria presença de rugosidade tanto na parede do colarinho como na parede do pilar, gerando as chaves de cisalhamento. Elementos já estudado em itens anteriores. Essa rugosidade faz com que ocorra o funcionamento conjunto entre pilar e fundação, similar ao que ocorre em uma ligação monolítica. Nesse caso além da mobilização das forças de atrito, ocorre a transferência de cisalhamento nas paredes e a força normal transmitida para a base da fundação é distribuída em uma área equivalente à do pilar mais o colarinho.

### 2.10.1.2 Ligação com chapa metálica.

Neste tipo de ligação, a fundação dispõe de chumbadores com a extremidade saliente ou roscada devidamente fixada no concreto.

A face interior do pilar apresenta uma chapa metálica com a furação concordante com a posição dos chumbadores, à qual se encontra soldados os ferros da armadura longitudinal do pilar.

Assim sendo, o pilar é posicionado sobre a fundação sendo ajustado o nível e o prumo através do sistema de porcas e contra porcas. O espaço entre a fundação e a chapa é ligado com argamassa seca ou graute cuja resistência deverá ser igual ou superior a do concreto dos elementos estruturais (figura 2.34).



**Figura 2.34 - Ligação pilar x fundação por meio de chapa de base** Fonte: Adaptado de ACKER, 2002

1. Detalhe do nivelamento e prumo do pilar feito através da regulação das porcas da parte abaixo da chapa.
2. Ligação pilar x fundação já executada e com os vazios ocupados com graute.

### 2.10.2 Ligações Pilar-Pilar

A união de pilares pré-fabricados é geralmente necessária em edificações altas, quando existe a necessidade de segmentação do pilar, seja por uma restrição logística, seja por uma limitação da produção. O fator determinante para recorrer à segmentação e à posterior emenda de pilares pode ser o custo de transporte ou de montagem ou, ainda, a estabilidade estrutural da peça na fase de manuseio ou transporte.

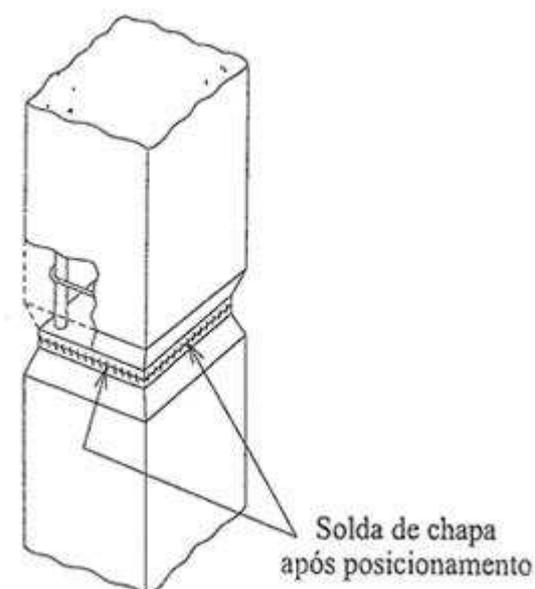
Também nos casos em que há impossibilidade de tráfego de carretas muito extensas, pode ser necessário usar peças de menores dimensões e emendá-las no canteiro. Existem variados sistemas de união de pilares, alguns deles patenteados pelos fornecedores de insertes metálicos. No Brasil, onde a quantidade

de fabricantes de conectores e chumbadores para pré-fabricados é restrita, o sistema empregado pode envolver ligação por chapas, soldas, parafusos, grauteamento de esperas ou vergalhões em nichos previamente deixados na peça para este fim.

As duas formas mais usais de se executar a união de pilares pré-fabricado são:

1. Com chapa ou conectores metálicos e solda.

Essa alternativa tem característica de apresentar resistência logo após a solda, dispensando ou minimizando o caibramento provisório (EL DEBS). Uma evolução desse método é a substituição da solda por parafusos (acoplador metálico), conforme a figura 2.35.

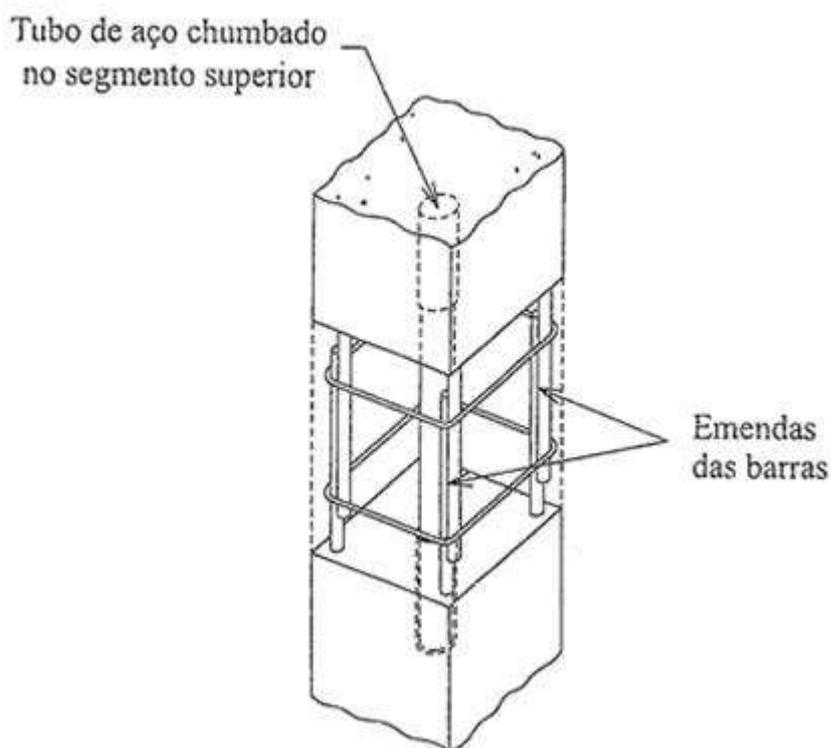


**Figura 2.35 - Ligações com chapa soldadas. Fonte: EL DEBS**

2. Com Tubos metálicos.

Esse tipo de ligação tem a vantagem de facilitar o posicionamento e o prumo do pilar. Nessa alternativa, os dois segmentos do pilar precisam ser moldados na mesma posição em que serão montados, (EL DEBS) utilizando o topo de um como

fôrma para outro, com o tubo metálico posicionado. Em geral, a ligação é completada com emendas das barras e concretagem do espaço, conforme a figura 2.36.



*Figura 2.36 - Ligações com tubo metálico. Fonte: EL DEBS*

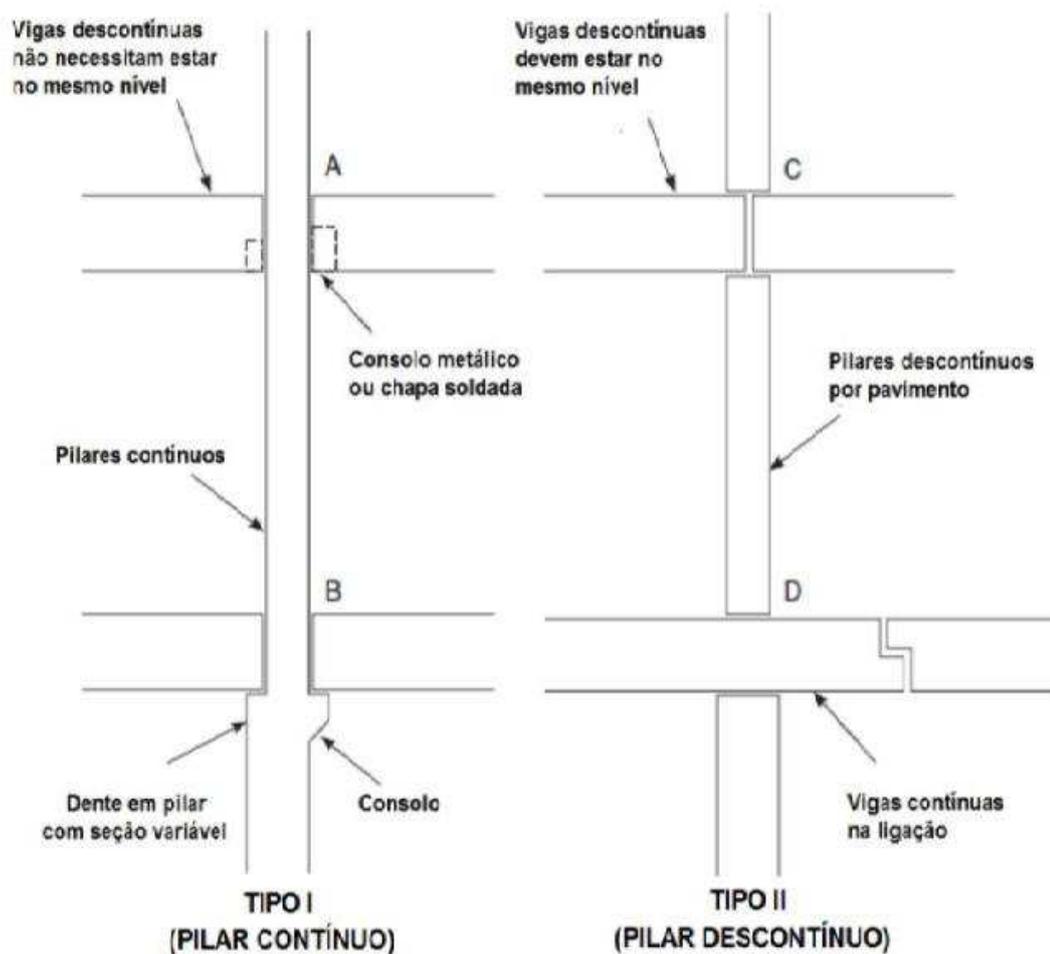
### **2.10.3 Ligação Viga-Pilar**

Dentre as ligações até aqui citadas as mais importantes das ligações é a ligação viga pilar considerada dentro dos sistemas estruturais tipo esqueleto. Nessas ligações existem componentes básicos que interligam os elementos estruturais capazes de transmitir os esforços e distribuir as tensões, entendendo que dentro dessa região existem elementos que formam ligações positivas e ligações negativas formando o conjunto da tipologia viga-pilar.

Elementos tais como; consolos, armaduras de continuidade negativa, neoprene, graute e chapas soldadas. Em geral, as ligações viga-pilar pré-moldadas podem apresentar-se de duas maneiras básicas em relação aos pilares:

1. Ligação viga-pilar de extremidade, quando o pilar é contínuo em termos de projeto e construção, os elementos horizontais (vigas) são conectados a ele pela extremidade;

2. Ligação viga-pilar de topo, quando descontínuo, em termos construtivos, os elementos horizontais (vigas) serão estruturalmente contínuos ou descontínuos na junta e a ligação é considerada de topo (FIGURA 2.37).



**Figura 2.37 – Tipos de ligação viga-pilar. (A) ligação viga-pilar com consolo embutido; (B) ligação viga-pilar sobre consolo aparente; (C) viga e pilar descontinuos na ligação; (D) viga contínua e pilar descontinuo na ligação. Fonte: FIB**

Especificando o presente trabalho nesse tipo de ligação, abordaremos a ligação viga pilar com pilares contínuos para sistemas estruturais em esqueleto de

múltiplos pavimentos em concreto armado pré-moldado (FIGURA 2.38), como exemplo de análise.



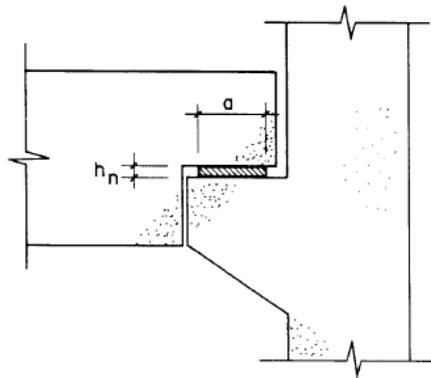
**Figura 2.38 – T&A Pré-fabricados – Estruturas em esqueleto** Hadade (2016).

Onde a ligação viga-pilar citada nesse trabalho é baseado nos componentes que formam o conjunto dessa ligação diferenciando ligações positivas e ligações negativas contidas nessa tipologia.

Essas ligações podem ser divididas em três tipologias que serão aqui analisadas em seu comportamento estrutural.

### **2.10.3.1 Ligação Viga-Pilar com Almofada de Apoio sobre Consolo**

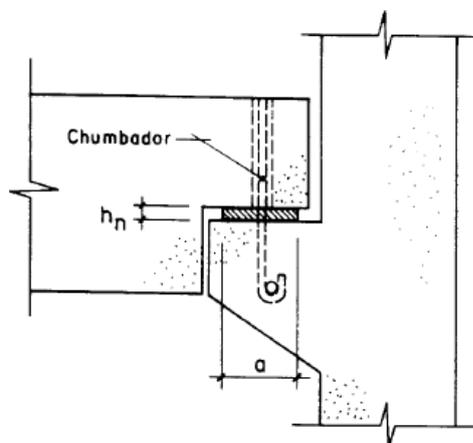
Segundo Ferreira (2003) esse tipo de ligação é bastante utilizado em galpões pré-moldados de concreto e cita que são frequentemente utilizados elastômeros não fretados, já que para estruturas com cargas mais elevadas utilizam-se elastômeros fretados. A sua montagem consiste na presença de elastômeros na interface viga-consolo, conforme mostra a figura 2.39, lembrando que que essa seria uma das ligações que compõe a tipologia viga-pilar dotada de ligação positiva.



**Figura 2.39 – Ligação viga-pilar articulada com almofada de elastômero sobre consolo**  
**[FERREIRA (1993)].**

### 2.10.3.2 Ligação Viga-Pilar com Almofada de Elastômero Consolo e Chumbador

Esse tipo de ligação apresenta a adição de chumbador, conforme Ferreira, para garantir a estabilidade lateral do elemento, mas preenchendo os furos com graute expansivo, há uma solidarização do chumbador com o elemento, gerando uma restrição aos deslocamentos da viga, conseqüentemente o chumbador deve resistir a esforços horizontais (Figura 2.40), apresentando assim uma outra parte de ligação positiva presente na região da ligação viga-pilar.



**Figura 2.40 - Ligação viga-pilar com almofada de elastômero consolo e chumbador**  
**[FERREIRA (1993)].**

### 2.10.3.3 Ligação Viga-Pilar Semirrígida com Armadura de Continuidade

Diferente das ligações anterior mente apresentadas, a presença da armadura longitudinal negativa passando por dentro do pilar, completa a ligação na região por apresentar essa ferragem que gera ligações negativas conforme mostra figura abaixo, permite a transferência de momento fletor entre- viga e pilar. É muito comum em sistemas estruturarias em esqueleto de múltiplos andares o emprego de armaduras negativas de continuidade compostas por barras passantes em pilares, pois essa ligação permite que a solidarizarão da ligação viga-pilar gerando uma redução de esforços na base dos pilares.

Considerando os aspectos abordados no parágrafo anterior, uma das soluções possíveis para que a estabilização de estruturas pré-moldadas seja alcançada é através da solidarizarão entre as vigas e os pilares, formando pórticos nas duas direções da estrutura

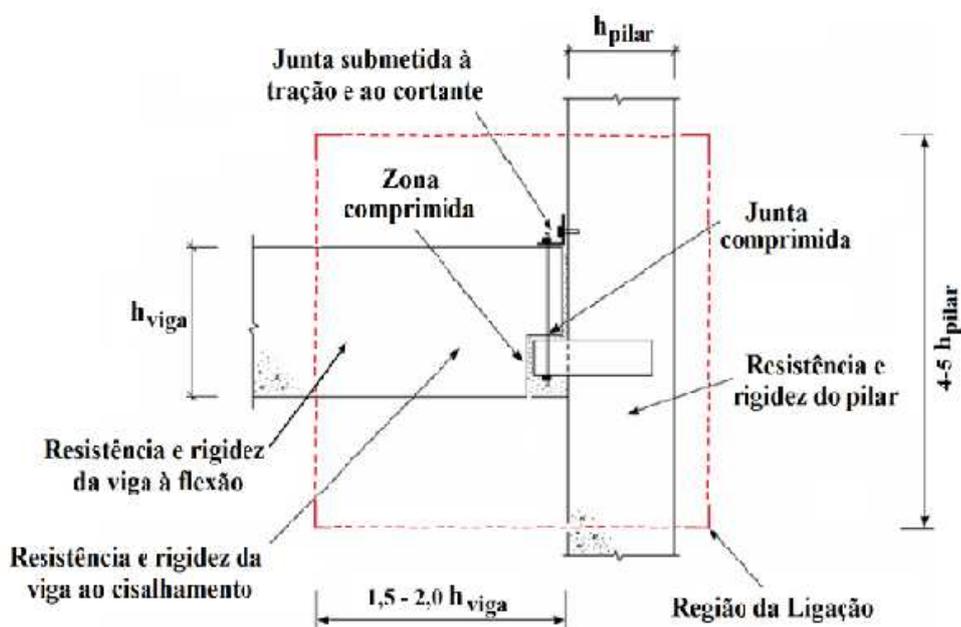
A Figura 2.41 mostra a armadura de continuidade que transpassa pelos furos do pilar e é amarrada nos estribos da viga reforçando a ligação viga x pilar.



**Figura 2.41 Detalhe da solução com armadura de solidarizarão com barras (FONTE: FERREIRA, 2007)**

Essas ligações podem ser divididas em três tipos de acordo com as matérias utilizadas em suas junções e ligações. Para efeito de definição entre junta e

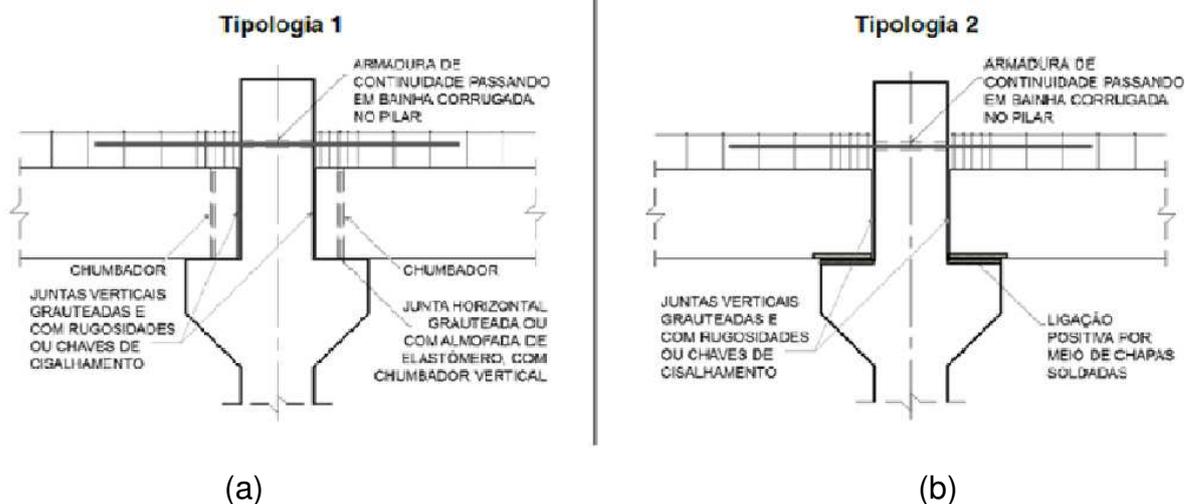
ligação partimos da definição do *Manual da FIB* (2008), junta” é a interface de dois ou mais elementos estruturais e “ligação” é uma região que pode compreender uma ou mais juntas (interfaces) e partes de elementos adjacentes, montada a partir de dispositivos mecânicos e concebida para resistir à ação de forças e/ou momentos( figura 2.42) Portanto o que diferenciam essas divisões são as ligações positivas, ligações negativas, e os materiais adotados em cada uma delas (Neoprene, graute e chapas soldadas).



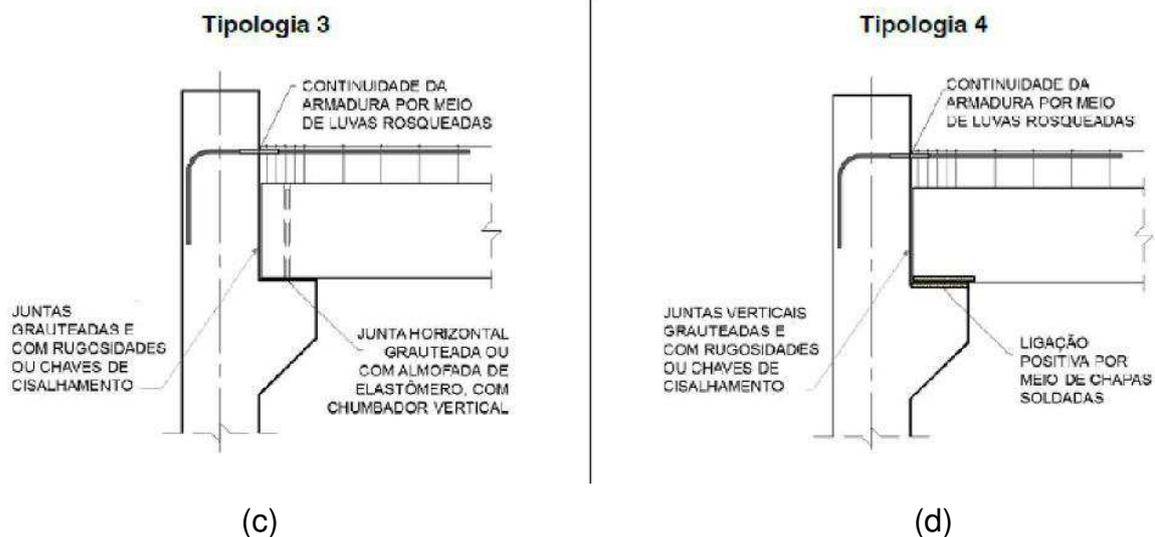
**Figura 2.42 – Definição de junta e ligação[FERREIRA (1993) ].**

As FIGURA 2.43 e FIGURA 2.44 mostram essas tipologias de ligações viga-pilar que possuem ligações positiva e ligações negativas contendo cada uma os seus componentes de união.

As ligações positivas das tipologias 1 e 3 são formadas por chumbadores fixados aos consolos, para atravessarem as vigas por meio de nichos grauteados e almofadas de neoprene ou graute. Cada ligação positiva das tipologias 2 e 4 é composta por duas chapas soldadas, uma na face superior do consolo e outra na face inferior da viga.



**Figura 2.43 – Ligações viga-pilar com armadura de continuidade passando em bainha corrugada no pilar central. (a) ligação viga-pilar com consolo aparente, neoprene e chumbador ou graute e chumbador; (b) ligação viga-pilar com consolo aparente e chapa soldada. Fonte: NBR 9062, 2016**



**FIGURA 2.44 – Ligações viga-pilar com armadura de continuidade por meio de luvas rosqueadas. (c) ligação viga-pilar com consolo aparente, neoprene e chumbador ou graute e chumbador; (d): ligação viga-pilar com consolo aparente e chapa soldada. Fonte: NBR 9062.**

Conforme a NBR 9062 (2016), no caso de ligações viga-pilar típicas e seção composta com solidarização no local e continuidade da armadura negativa por meio de bainhas corrugadas passando pelo pilar preenchidas com graute ou por meio

de luvas inseridas no caso de pilares de extremidade , as rotações efetivas são geradas devidas as deformações tanto na ligação ocorrem tanto na interface viga-pilar quanto na zona de transição na extremidade conectada da viga, denominada de região da ligação, aonde aparecem justamente os elementos diferenciadores de cada ligação viga – pilar . Ao analisar a rigidez secante no limite do valor da tensão na armadura de continuidade igual à tensão do aço, que seria o utilizado para efeito de projetos., a rigidez secante para a relação momento-rotação pode ser calculada de forma simplificada, conforme o desenvolvimento a seguir, Hadade (2016).

$$R_{sec} = \frac{My_{lim}}{\theta_y}$$

$$My_{lim} = 0,9. d. f_{yd}. A_s$$

$$\theta_y = \left(\frac{0,9}{k}\right) \cdot \left(\frac{f_{yd}}{E_s. d}\right) \cdot L_{ed}$$

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

Onde:

k      coeficiente de ajustamento da rigidez secante

A<sub>s</sub>    área da seção transversal da armadura passante

d      altura efetiva na extremidade da viga

E<sub>s</sub>    modulo de elasticidade

f<sub>yd</sub>   Tensão característica de escoamento do aço

L<sub>ed</sub>   corresponde ao comprimento da deformação efetiva da parte da barra embutida no pilar.

De acordo com FERREIRA (1993 o comprimento efetivo de deformação por alongamento da armadura de continuidade (L<sub>ed</sub>) é formado pela soma comprimento da deformação efetiva da parte da barra ancorada na zona da ligação da extremidade superior da viga, (L<sub>d</sub>) com comprimento embutido (L<sub>e</sub>) como mostra a figura 2.45 e a EQUAÇÃO 2.4:

### 2.10.3.3.1 Comprimento efetivo de deformação da armadura de continuidade

( $L_{ed}$ ), HADADE (2016).

$$L_{ed} = L_e + L_d \quad (2.4)$$

Onde:

a )  $L_e$  = comprimento de deformação efetiva da parte da barra embutida no pilar que pode ser encontrada através da equação 2.5.

$$L_e = \frac{L_{b,emb}}{2} + 2 \cdot \Phi_b \quad (2.5)$$

Aparecendo nessa equação o comprimento de ancoragem ( $L_{b,emb}$ ) que por sua vez é determinado em função da tensão de aderência entre o concreto e aço, dado pela equação 2.6, de acordo com a NBR 6118 (2014).

$$\tau_b = \frac{A_s \cdot \sigma_{SY}}{\pi \cdot \Phi_b \cdot L_{b,emb}} \quad (2.6)$$

Onde:

$A_s$  : Área da seção da barra

$\sigma_{sy}$  : Tensão Normal de escoamento do aço

$\Phi_b$  : Bitola da barra

Substituindo  $A_s = \frac{\pi \cdot \Phi^2}{4}$  na equação então teremos o seguinte comprimento;

$$L_{b,emb} = \frac{\Phi_b \cdot \sigma_{SY}}{4 \cdot \tau_b} \quad (2.7)$$

Como a situação do embutimento da barra no concreto é considerada de bom confinamento logo a tensão de aderência será;

$$\tau_b = \beta \cdot \sqrt{f_c} \rightarrow \tau_b = 2 \cdot \sqrt{f_c}, \quad (2.8)$$

Assim;

$$L_e = \frac{L_{b,emb}}{2} + 2 \cdot \phi_b \rightarrow L_e = \frac{\frac{\phi_b \cdot \sigma_{SY}}{4 \cdot 2 \cdot \sqrt{f_c}}}{2} + 2 \cdot \phi_b \text{ logo ;}$$

$$L_e = \frac{\phi_b \cdot \sigma_{SY}}{16 \cdot \sqrt{f_c}} + 2 \cdot \phi_b \quad (2.9)$$

b)  $L_d$  = comprimento da deformação efetiva da parte da barra ancorada na zona da ligação da extremidade superior da viga que é dado por;

$$L_d = \frac{L_{b,be}}{2} + 2 \cdot \phi_b \rightarrow L_d = \frac{\frac{\phi_b \cdot \sigma_{SY}}{4 \cdot \tau_b}}{2 \cdot \sqrt{f_c}} + 2 \cdot \phi_b \quad (2.10)$$

Dentro da zona de ligação na extremidade da barra apoiada na viga é considerada aqui, sem confinamento, portanto a tensão de aderência pode ser;

$$\tau_b = \beta \cdot \sqrt{f_c} \rightarrow \tau_b = 1 \cdot \sqrt{f_c},$$

$$L_d = \frac{L_{b,be}}{2} + 2 \cdot \phi_b \rightarrow L_e = \frac{\frac{\phi_b \cdot \sigma_{SY}}{4 \cdot \tau_b}}{2 \cdot \sqrt{f_c}} + 2 \cdot \phi_b \text{ logo ;}$$

$$L_d = \frac{\phi_b \cdot \sigma_{SY}}{8 \cdot \sqrt{f_c}} + 2 \cdot \phi_b \quad (2.11)$$

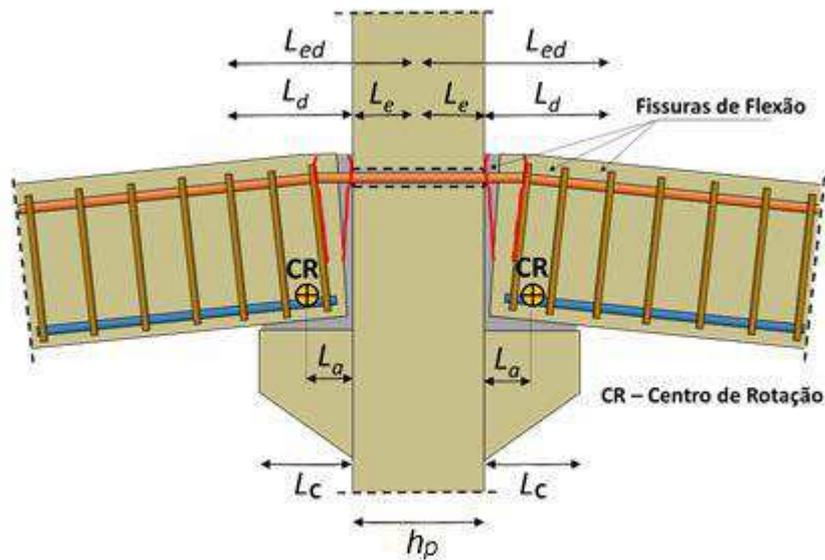
O equilíbrio entre a força de tração na barra e a força de aderência ao longo da profundidade da penetração (comprimento de aderência da barra para transferir

força de tração o desta para o concreto, através da tensão de aderência) é notada na fase de pré-escoamento

Portanto, o comprimento da deformação efetiva  $L_{ed}$ , observado na figura 2.45, é:

$$L_{ed} = L_e + L_d \rightarrow L_{ed} = \frac{\phi_b \cdot \sigma_{SY}}{16 \cdot \sqrt{f_c}} + 2 \cdot \phi_b + \frac{\phi_b \cdot \sigma_{SY}}{8 \cdot \sqrt{f_c}} + 2 \cdot \phi_b$$

$$L_{ed} = L_e + L_d \rightarrow L_{ed} = \frac{3 \cdot \phi_b \cdot \sigma_{SY}}{16 \cdot \sqrt{f_c}} + 4 \cdot \phi_b \quad (2.12)$$



**Figura 2.45 – Comprimentos efetivos de deformação da armadura de continuidade em ligações viga-pilar. Fonte: Hadade (2016)**

Onde:

$L_a$  distância da face do pilar até o centro de rotação no consolo

$L_c$  comprimento do consolo

$h_p$  altura da seção do pilar

O comprimento embutido  $L_e$  **difere**, devido à geometria, para pilares com ligação em apenas uma face e para pilares com ligações nos dois lados, conforme

mostrado na FIGURA 2.45. Portanto, o comprimento  $L$  dentro do pilar é também limitado por HADADE (2016):

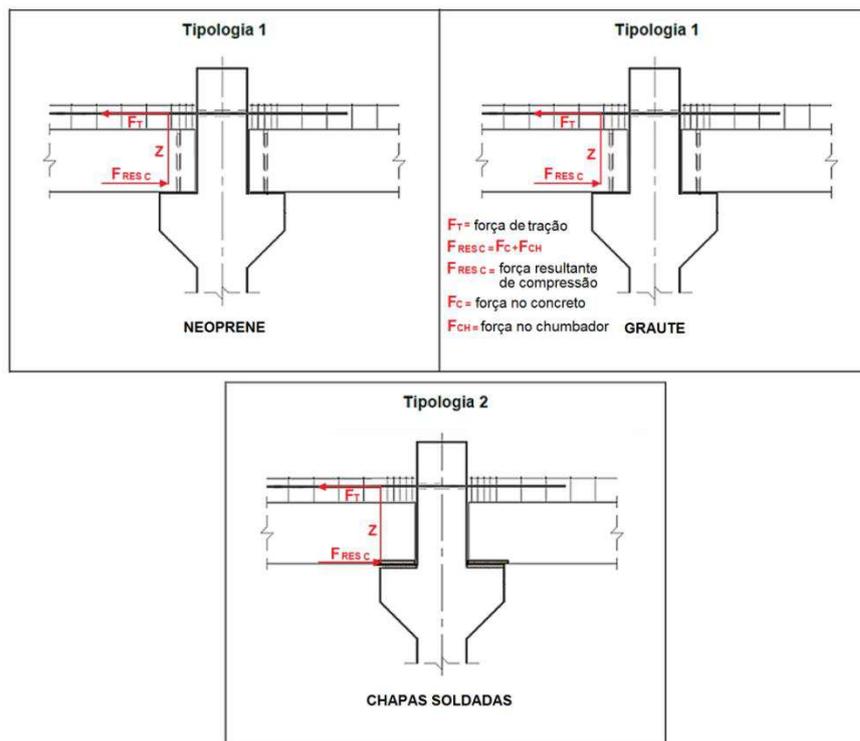
$$L_e \leq \frac{hp}{2} \quad \text{para pilares internos}$$

$$L_e \leq 0,8 \quad \text{para pilares externos}$$

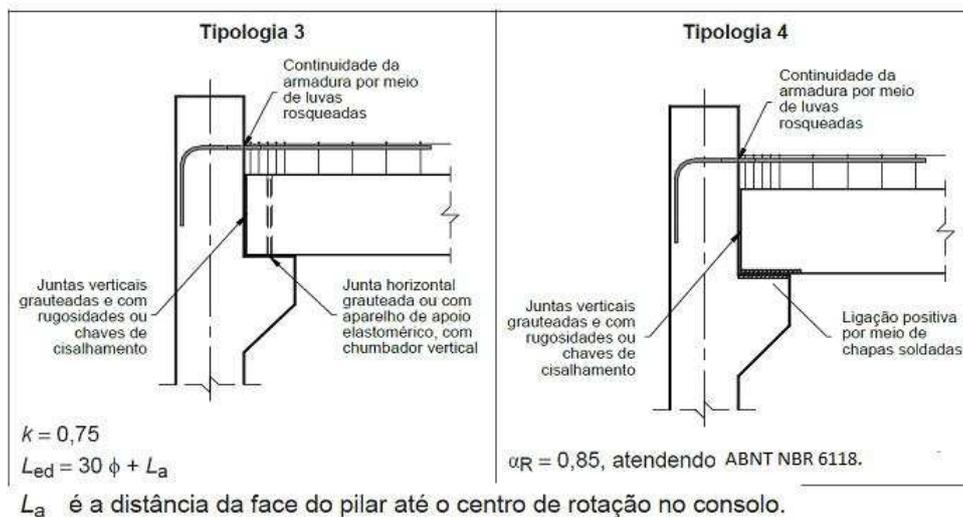
A tabela 2.2 mostra os valores dos coeficientes de ajustamento da Rigidez de cada elemento utilizada nas ligações, o qual estará relacionada com a altura da região fissurada, já que a rigidez é a secante, bem como efetivo de deformação  $L_{ed}$ ., conforme a NBR 9062 (2016). Os braços de alavanca estão ilustrados nas FIGURA 2.46 e FIGURA 2.47.

TIPOLOGIA DA LIGAÇÃO	K	$L_{ed}$
NEOPRENE/ CHUMBADOR	0,75	$25\varnothing + L_a$
GRAUTE/ CHUMBADOR	0,75	$25\varnothing + L_a$
CHAPA SOLDADA	1	$20\varnothing + L_a$

**TABELA 2.2 – Dados para a obtenção da rigidez secante negativa para ligações viga-pilar típicas Fonte: NBR 9062, 2016.**



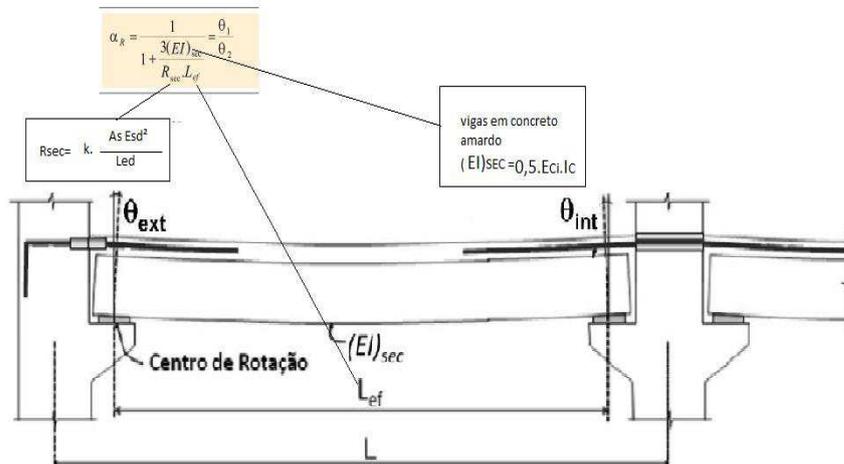
**FIGURA 2.46 – Braços de alavanca do momento responsável pela rotação viga-pilar para as três tipologias, para pilares centrais. Fonte: Hadade, 2016**



**Figura 2.47 ligações viga-pilar com pilares de extremidade. Fonte: Hadade, 2016.**

Conforme os valores de restrição ( $k$ ) para cada tipo de ligação viga-pilar com armadura de continuidade negativa para pilares internos como para pilares externos, comprimentos efetivos da viga para cálculo do fator de restrição (figura 2.48) e valores de rigidez sugeridos em norma para estruturas de concreto armado e concreto pré-moldado (TABELA 2.3), podemos classificar cada uma das ligações viga-

pilar com armadura de continuidade negativa com seu principais elementos de conexão( neoprene , graute e chapa solada ),a partir da consulta da tabela 2.2 , citada no item 2.4.



**FIGURA 2.48 – Comprimento efetivo da viga para o cálculo do fator de restrição Fonte: NBR 9062, 2017.**

Elemento	NBR 6118:2014	NBR 9062:2017	ACI 318M-
Laje	0,3.E <sub>ci</sub> I <sub>ci</sub>	0,25.E <sub>ci</sub> I <sub>ci</sub>	0,25.E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub>
Viga	0,4E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub> se A'≠A <sub>s</sub>	0,8 E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub> se para CP	0,35.E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub>
	0,5E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub> se A'≠A <sub>s</sub>	0,5 E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub> para CA	
Pilar	0,4E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub>	0,4E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub> <sup>1</sup>	0,7.E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub>
		0,55E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub> <sup>2</sup>	
		0,7E <sub>ci</sub> I <sub>c</sub> <sup>3</sup>	
<b>(1) para estruturas com ligação viga-pilar articulada com 01 pavimento ou galpão</b>			
<b>(2) para estruturas com ligações semirrígidas com até 04 pavimentos</b>			
<b>(3) para estruturas com ligações semirrígidas com 05 ou mais pavimentos</b>			

**Tabela 2.3- Comparação entre rigidezes. Fonte: NBR 9062, 2017.**

A tabela acima apresenta as rigidezes de acordo com as normas de concreto armado (NBR 6118:2014) e (NBR 9062: 2017) em que E<sub>ci</sub> é o modulo de elasticidade tangente do concreto, I<sub>c</sub> é o momento de inercia da seção bruta de

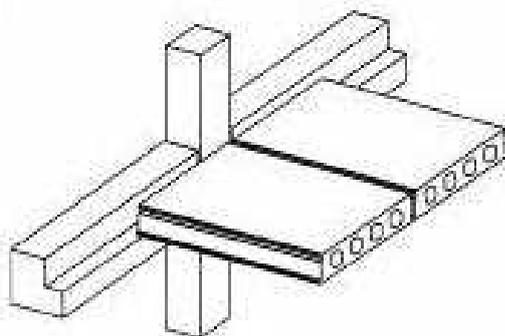
concreto,  $A_s$  a armadura de tração;  $A'_s$  a armadura de compressão; CP concreto protendido e CA concreto armado.

#### 2.10.4 Ligações Viga Laje

Nessa ligação a análise deve ser feita em dois sentidos: sentido construtivo e no sentido de continuidade estrutural a ser projetada na viga de apoio (Albarran 2008).

Nos modelos comuns, a laje alveolar pré-fabricada é considerada um grande pano rígido e funciona como um diafragma na estrutura. O seu apoio sobre a viga ocorre em grandes áreas e, em função do atrito, a aproximação é aceitável (MANUAL MUNTE, 2004, pg. 22).

A rugosidade da superfície de contato entre laje, a viga e o concreto complementar deve garantir uma melhor ligação entre os elementos, gerando resultados típicos para a ligação laje-viga independente da tipologia de laje a ser adotada. As vigas que possuem abas para apoio das lajes alveolares, por exemplo, possuem estribos salientes ou esperas que se destinam não só a resistir aos esforços cortantes, mas também a garantir a resistência ao cisalhamento na junta entre a viga pré-moldada e o concreto complementar, figura 2.49 (ALBARRAN)



**Figura 2.49 - Desenho de ligação viga-pilar. (ALBARRAN, 2008).**

### **3. CONCLUSÃO**

#### **3.1 Considerações Finais**

O resultado do presente trabalho mostrou-se satisfatório, considerando-se que o seu principal objetivo, de discorrer sobre o tema das estruturas em concreto pré-fabricado, em especial a diferença básica entre estas e as estruturas monolíticas, as suas ligações, foi alcançado.

Para isto, foi feita uma vasta e minuciosa revisão bibliográfica, que englobou inúmeros artigos, revistas, livros, teses, dissertações, manuais e normas técnicas referentes ao assunto abordado, dentre elas: a NBR 6118(2014) e NBR 9062(2017), todos citados na bibliografia.

Esta pesquisa foi de cunho teórico e recolheu os estudos mais recentes, bem como agregou conhecimento sobre o comportamento de elementos pré-fabricados, incluindo as tipologias de ligações entre eles, o que envolveu conceitos de junta, ligação, rigidez, deformabilidade, mecanismos de deformação, modelagem de transferência de esforços e componentes das ligações.

Dentre as tipologias aqui apresentadas, foram escolhidas em função da relevância de utilização nos sistemas apoticados desenvolvidos no Brasil. Tem-se, portanto, o que segue: ligação fundação pilar tipo cálice, ligação pilar-pilar por chapa-soldada, ligação viga-pilar com armadura longitudinal negativa de continuidade e ligação positiva com chumbador (pino), almofadas de graute ou elastômero ou chapa soldada etc.

Como proposta, sugere-se a elaboração de mais trabalhos capazes de esclarecer os princípios básicos dos elementos pré-fabricados em concreto, para fomentar o interesse por esse método construtivo, que certamente colabora com a sustentabilidade do nosso planeta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCI. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA (1980). **“A história dos pré-fabricados e sua evolução no Brasil”**. São Paulo, 70 p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 (2014)**. **“Projetos de estruturas de concreto: procedimento”**. Rio de Janeiro, 231 p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062 (2017)**. **“Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado”**. Rio de Janeiro, 42 p.
- EL DEBS, M. K. (2000). **“Concreto Pré-Moldado: fundamentos e aplicações”**. Universidade de São Paulo, São Carlos: EESC-USP, 107 p.
- FERREIRA, M.A. (2003). **“ Notas de aula, capítulo 4: Ligações entre elementos pré-moldados”**. Universidade de São Paulo, São Carlos: EESC-USP, 34 p.
- CAMPOS, A. F. (1996). **“Detalhamento das Estruturas de Concreto pelo Método das Bielas e dos Tirantes”**. Caderno de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 72 p.
- Acker, Arnold Van (2002). **“MANUAL DE SISTEMAS PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO”**. 129p
- MUNTE, MANUAL TECNICO (2004), **Soluções concretas**, 37p.
- CATOIA, Bruna. **Comportamento de vigas protendidas pré-moldadas com ligações semirrígidas, 2007**. 6p. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade federal de São Carlos, 2007
- ALBARRAN, E.G. **Construção com Elementos Pré-Fabricados em Betão Armado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
- KATAOKA, Marcela Novischi. **Estudo da continuidade laje-viga-pilar em estruturas pré-moldadas de concreto**. 2007. 86p.
- PONTES, V.P. (2016). **Estudo de Ligações em Elementos de Concreto Pré-Moldado. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 13, 94p.**
- HADADE, M.A. SIMÕES (2016). **Comportamento de Ligações viga-pilar típicas com continuidade de Armadura Negativa em Estruturas Pré-fabricadas. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da**

**Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Construção Civil. Área de Concentração: Sistemas Estruturais. 243p**

Prof. Crisane Daemon, MSC, PMP. **Concreto Pré-moldado Projeto e Dimensionamento. Aula 3 – Ligações. 137p**

