

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Curso de Especialização em Estruturas**

Aline de Paula Oliveira Gomes

**CONSTRUÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO EM ESTRUTURA PRÉ-FABRICADA: DA  
CONCEPÇÃO DO PROJETO À MONTAGEM**

Belo Horizonte

2023

Aline de Paula Oliveira Gomes

**CONSTRUÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO EM ESTRUTURA PRÉ-FABRICADA: DA CONCEPÇÃO DO PROJETO À MONTAGEM**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Salvador Real Pereira

Belo Horizonte

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos **dezesesseis dias** do mês de **setembro de 2024**, às 16h, a estudante **Aline de Paula Oliveira Gomes**, matrícula 2022682836, defendeu o Trabalho intitulado “**Construção de uma Edificação em Estrutura Pré-Fabricada: da Concepção do Projeto à Montagem**”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

**Nota:** ( 91 )

**Orientador(a):** Prof. Sebastião Salvador Real Pereira

**Nota:** ( 91 )

**Examinador(a):** Prof. Pedro Vianna Pessoa de Mendonça



Documento assinado eletronicamente por **Sebastião Salvador Real Pereira, Professor do Magistério Superior**, em 18/09/2024, às 19:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Vianna Pessoa de Mendonca, Professor do Magistério Superior**, em 09/10/2024, às 05:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3557112** e o código CRC **C023E478**.

### INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família e amigos pelo suporte incondicional durante a realização do curso de Especialização e no desenvolvimento da minha carreira profissional.

À Gerência de Engenharia da FIEMG, pelo ambiente de aprendizado proporcionado durante o período em que estive à frente do acompanhamento da obra objeto do presente estudo de caso.

Aos Professores do núcleo de Pós-Graduação do Departamento de Estruturas da UFMG, pelo conhecimento transmitido, sobretudo ao orientador, Professor Sebastião Salvador, pela contribuição em relatar vários casos práticos ao longo das aulas de Concreto Protendido.

## RESUMO

Nesta monografia será conduzida uma pesquisa bibliográfica sobre o processo de projeto e construção de edificações em estruturas de concreto pré-fabricadas, destacando cada fase do seu desenvolvimento, seguida pela apresentação de um estudo de caso. O estudo de caso envolverá a observação direta do acompanhamento da autora em uma construção de edifício de múltiplos pavimentos utilizando estrutura de concreto pré-fabricada. O objetivo é estabelecer a relação entre as teorias e conceitos pesquisados e sua aplicação prática na realidade da construção.

Palavras-chave: estruturas de concreto pré-fabricadas; projeto; produção; procedimentos de montagem.

## **ABSTRACT**

In this monograph, a literature review will be conducted on the design and construction of prefabricated concrete structures, highlighting each phase of their development. This will be followed by the presentation of a specific case study based on the writer's experience in monitoring the construction of a multi-story building using prefabricated concrete structures. The aim is to establish the relationship between the researched theories and concepts and their practical application in the context of construction.

Keywords: precast and prefabricated concrete structures; design; manufacturing; assembly procedures.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de painéis de concreto em produção no canteiro de obras.....	16
Figura 2 – Içamento de painel pré-moldado.....	17
Figura 3 – Exemplo de estrutura em pórticos.....	20
Figura 4 – Exemplo de estrutura em esqueleto.....	20
Figura 5 – Exemplo de edifício em painéis de concreto pré-fabricado.....	21
Figura 6 – Exemplo de elemento celular pré-fabricado.....	21
Figura 7 – Exemplo de viga calha e pilar condutor de água pluvial.....	23
Figura 8 – Hierarquia da normatização brasileira de concreto para estruturas de edifícios.....	25
Figura 9 - Exemplos de seções transversais comuns utilizadas em pilares.....	26
Figura 10 - Elementos de um pilar pré-fabricado de concreto.....	27
Figura 11 - Exemplificação de console curto.....	28
Figura 12 – Tipos de ligação pilar x pilar.....	28
Figura 13 – Exemplos de seções transversais comuns utilizadas em vigas.....	29
Figura 14 – Representação de seções transversais típicas para lajes pré-fabricadas.....	30
Figura 15 – Exemplos de seções transversais de painéis alveolares.....	31
Figura 16 – Seção transversal de painel alveolar.....	31
Figura 17 – Tipos de escadas pré-fabricadas com e sem patamar incluso.....	32
Figura 18 – Modelos de escadas pré-fabricadas em elementos únicos.....	33
Figura 19 – Representação da transmissão de esforços através do efeito diafragma nas lajes.....	35
Figura 20 – Representação da deformada de uma estrutura não contraventada.....	35
Figura 21 – Representação da espessura da capa de concreto sobre laje alveolar.....	36
Figura 22 – Capa de concreto sobre laje alveolar com contra flecha.....	36
Figura 23 – Exemplos de mecanismos de transferência de forças entre juntas de lajes.....	37
Figura 24 – Representação da rotação em uma ligação viga-pilar.....	39
Figura 25 – Representação de ligação viga-pilar rotulada.....	40
Figura 26 – Representação de uma ligação viga-pilar semirrígida com concretagem vertical.....	41

Figura 27 – Representação de ligação viga-pilar semirrígida com armadura de continuidade.....	41
Figura 28 – Representação de ligação viga-pilar semirrígida através de chapas soldadas.....	42
Figura 29 - Representação de ligação viga-pilar engastada através de armadura de arranque.....	42
Figura 30 – Representação da transferência de esforços em ligação viga-pilar.....	43
Figura 31 – Representação de apoio elastomérico e vergalhão inserido ao console	45
Figura 32 – Dimensões mínimas do console curto.....	45
Figura 33 – Representação de dente Gerber em ligação viga-viga e viga-pilar.....	46
Figura 34 – Exemplo de ranhuras na base do pilar.....	47
Figura 35 – Detalhes das superfícies dos cálices para ligação pilar-fundação.....	47
Figura 36 – Representação de ligação pilar – fundação através de chapa de base .	48
Figura 37 - Representação de ligação pilar – fundação através de bainha.....	48
Figura 38 – Representação de uma pista de protensão.....	54
Figura 39 – Representação de alguns dispositivos de içamento.....	56
Figura 40 – Perspectivas das fachadas da edificação.....	58
Figura 41 – Planta baixa do pavimento típico.....	59
Figura 42 – Corte longitudinal da edificação.....	59
Figura 43 – Locação da edificação.....	61
Figura 44 – Perspectiva da estrutura pré-fabricada da edificação – Plano 1.....	63
Figura 45 – Perspectiva da estrutura pré-fabricada da edificação – Plano 2.....	64
Figura 46 – Estrutura pré-fabricada após a montagem.....	64
Figura 47 – Desenho de locação dos pilares.....	65
Figura 48 – Detalhe dos cálices x marcação dos eixos no cálice do pilar P19.....	67
Figura 49 – Detalhe do projeto de reforço do bloco B9.....	67
Figura 50 – Execução de estaca raiz para reforço do bloco B9.....	67
Figura 51 – Ajuste do cálice do bloco com refazimento da armação.....	68
Figura 52 – Desenho de locação dos blocos e vigas de travamento.....	68
Figura 53 – Limitações existentes no campo.....	70
Figura 54 – Representação de veículos para transporte dos pré-fabricados.....	71
Figura 55 – Exemplo de programação de carregamento.....	72
Figura 56 – Exemplo de romaneio de carga de lajes.....	73

Figura 57 – Carreta carregada com lajes da estrutura pré-fabricada.....	74
Figura 58 – Carreta estabilizada ao solo.....	75
Figura 59 – Operação de içamento de pilar por guindaste sobre rodas.....	76
Figura 60 – Modelo de plataforma elevatória utilizada.....	77
Figura 61 – Posições de descarga utilizando guindaste sobre rodas.....	78
Figura 62 – Raio de isolamento recomendado para operação com guindastes.....	78
Figura 63 - Gráfico de alcance do guindaste 70 ton LIEBHERR LTM-1070.....	79
Figura 64 – Marcação das laterais do pilar e no fundo com prumo de centro.....	81
Figura 65 – Gabarito de madeira no interior do cálice.....	81
Figura 66 – Representação de acessórios para içamento de cargas.....	82
Figura 67 – Indicadores para substituição de cabos de aço.....	83
Figura 68 – Indicadores para substituição de cabos de aço.....	83
Figura 69 – Sequência de montagem dos pilares.....	84
Figura 70 – Representação de linhas de içamento dos pilares.....	85
Figura 71 – Controle de movimentação do pilar.....	85
Figura 72 – Inserção no cálice – detalhe da superfície ranhurada na base do pilar..	86
Figura 73 – Cunhas de madeira colocadas nas quatro faces do pilar.....	86
Figura 74 – Ajuste das cunhas para alinhamento do pilar.....	87
Figura 75 – Conferência de prumo e nível de pilar.....	87
Figura 76 – Detalhe de barra para ligação do aterramento estrutural no bloco e no pilar - SPDA.....	88
Figura 77 – Tolerâncias de montagem parte B por ABCIC.....	90
Figura 78 – Tolerâncias de montagem parte C por ABCIC.....	90
Figura 79 – Representação da posição de içamento de uma viga.....	91
Figura 80 – Detalhe do projeto e execução das alças de içamento das vigas.....	91
Figura 81 – Barras de espera das vigas baldrame aos blocos de fundação.....	92
Figura 82 – Operação de montagem de viga e detalhe de barra de espera.....	93
Figura 83 – Detalhes das ligações da escada – viga jacaré e degraus.....	94
Figura 84 – Exemplos de dispositivos para içamento de lajes alveolares.....	95
Figura 85 – Projeto de paginação indicando vão entre lajes.....	96
Figura 86 – Folga entre lajes alveolares após a montagem.....	97
Figura 87 – Detalhe de aberturas em lajes de canto.....	97
Figura 88 – Detalhe de quebra em laje durante seu posicionamento.....	98

Figura 89 – Detalhe de armadura passante em bainha no pilar.....	98
Figura 90 – Armadura complementar entre pilares sobre a laje alveolar .....	99
Figura 91 – Armadura complementar soldada entre pilares, sobre a laje .....	99
Figura 92 – Desnivelamento entre lajes em função da contra flecha .....	100
Figura 93 – Processo de equalização de lajes .....	100
Figura 94 – Chaveteamento utilizando concreto. ....	101
Figura 95 – Capeamento de laje pré-fabricada .....	103
Figura 96 – Detalhe do posicionamento da alvenaria na face externa da viga pré-fabricada.....	104
Figura 97 – Representação da interface alvenaria x pilar .....	104
Figura 98 - Levantamento de alvenaria de vedação .....	105
Figura 99 – Recomposições superficiais de peças pré-fabricadas.....	105
Figura 100 – Aplicação de selante na junta viga x pilar, face externa.....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCIC	Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto armado
CAA	Concreto auto-adensável
CAD	Concreto de alto desempenho
CP	Concreto protendido
fck	Resistência característica do concreto à compressão
Mpa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
RB	Baixa relaxação do aço
SPDA	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas
$\alpha_r$	Fator de restrição à rotação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>ESTRUTURA DE CONCRETO PRÉ-FABRICADA: ASPECTOS GERAIS</b>	<b>15</b>
3.1	Conceituação .....	15
3.2	Estrutura pré-fabricada no Brasil e as vantagens no seu emprego .....	17
3.3	Sistemas construtivos.....	19
<b>4</b>	<b>CONCEPÇÃO E PROJETO DE EDIFICAÇÕES COM ELEMENTOS DE ESTRUTURA DE CONCRETO PRÉ-FABRICADO</b>	<b>22</b>
4.1	Concepção arquitetônica.....	22
4.2	Concepção estrutural .....	24
4.2.1	Normatização brasileira.....	24
4.2.2	Elementos estruturais.....	26
4.2.3	Sistemas estruturais com elementos de eixo reto .....	33
4.2.4	Efeito diafragma das lajes de piso.....	34
4.2.5	Ligações .....	37
<b>5</b>	<b>PRODUÇÃO DE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO</b>	<b>49</b>
5.1	Etapa de fôrmas .....	49
5.2	Etapa de dosagem .....	51
5.3	Etapa de armação / protensão .....	53
5.4	Etapas de concretagem, adensamento e cura .....	54
5.5	Etapas de desmoldagem, transporte interno e armazenamento .....	56
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>58</b>
6.1	Introdução .....	58
6.2	Projeto arquitetônico.....	58

6.3	Projeto estrutural .....	61
6.4	Etapa de construção.....	65
6.5	Etapas que precedem a montagem.....	66
6.5.1	Execução e conferência de fundações.....	66
6.5.2	Inspeção de campo .....	69
6.5.3	Planejamento logístico – transporte e expedição das peças .....	71
6.5.4	Seleção dos equipamentos de movimentação de cargas .....	75
6.5.5	Plano de rigging.....	77
6.6	Montagem da Estrutura pré-fabricada .....	80
6.6.1	Preparação dos cálices .....	80
6.6.2	Mobilização e conferência de acessórios de içamento.....	81
6.6.3	Montagem de pilares .....	84
6.6.4	Montagem de vigas .....	91
6.6.5	Montagem de escadas .....	93
6.6.6	Montagem de lajes .....	94
6.7	Aspectos gerais das alvenarias e estrutura pré-fabricada.....	103
6.7.1	Posicionamento das alvenarias .....	103
6.7.2	Interface entre alvenaria de vedação e estrutura pré-fabricada .....	104
6.8	Acabamentos da estrutura pré-fabricada .....	105
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção de edificações é uma área fundamental e em constante evolução no campo da engenharia civil. A busca por métodos mais eficientes, sustentáveis e econômicos de construção tem levado a um aumento significativo no uso de estruturas de concreto pré-fabricadas. Estas estruturas representam uma mudança de paradigma na maneira como as edificações são projetadas, ao permitir que componentes de concreto sejam fabricados em ambiente apropriado com elementos de controle de qualidade e montados no local de construção. Esse método oferece inúmeras vantagens, desde a redução de prazos de execução até a minimização do desperdício de materiais.

O presente trabalho se dedica a explorar o processo completo da construção de edificações em estrutura de concreto pré-fabricada, desde a concepção inicial do projeto até a fase de montagem no canteiro de obras. O objetivo deste trabalho é analisar as etapas envolvidas nesse processo, tomando-se como objeto de estudo o caso real da construção de uma edificação de quatro pavimentos em estrutura pré-fabricada de concreto, identificando as fases da construção e também os principais desafios enfrentados, bem como as soluções para tal.

O trabalho pretende abordar os aspectos técnicos envolvidos na concepção, fabricação e montagem das estruturas pré-fabricadas, tomando-se como objeto de estudo de caso a construção de uma edificação de quatro pavimentos em estrutura pré-fabricada de concreto, identificando as etapas da sua implementação, os principais desafios enfrentados e também as melhores práticas para solução dessas dificuldades.

Os aspectos referentes ao dimensionamento dos elementos pré-fabricados serão abordados de forma concisa, apenas para destacar as diferenças principais entre as estruturas de concreto pré-fabricado em comparação com as estruturas de concreto armado convencionais.

## 2 OBJETIVO

A presente monografia tem como objetivo abordar de forma abrangente o processo de construção de edificações de múltiplos pavimentos em estrutura de concreto pré-fabricada, destacando cada etapa do seu desenvolvimento. O trabalho está organizado em capítulos que visam proporcionar uma compreensão geral das particularidades envolvidas nesse método construtivo.

No terceiro capítulo, "Estrutura de Concreto Pré-Fabricada: Aspectos Gerais", serão discutidos conceitos fundamentais, a situação da estrutura pré-fabricada no contexto brasileiro e as vantagens associadas ao seu emprego, bem como uma análise dos sistemas construtivos disponíveis.

O quarto capítulo, "Concepção e Projeto de Edificações com Elementos de Estrutura de Concreto Pré-Fabricado", dispõe sobre aspectos arquitetônicos e estruturais, incluindo normatização brasileira, elementos e sistemas estruturas, ligações entre elementos e aspectos gerais da estabilidade global da estrutura.

Na sequência, o quinto capítulo, "Produção de Elementos Pré-Fabricados de Concreto", aborda as diferentes etapas da fabricação dos elementos, desde as fôrmas até o transporte e armazenamento.

Por fim, o sexto capítulo apresenta um "Estudo de Caso", analisando o processo desde o projeto até a construção, com destaque para a etapa de montagem da estrutura pré-fabricada e demais aspectos relevantes até a interação da estrutura com a alvenaria e aspectos gerais de acabamento para a durabilidade da estrutura.

O objetivo final deste trabalho é fornecer uma visão abrangente da construção de edificações de múltiplos pavimentos em estrutura de concreto pré-fabricada, agrupando os aprendizados adquiridos pela autora em uma experiência da técnica construtiva.

### 3 ESTRUTURA DE CONCRETO PRÉ-FABRICADA: ASPECTOS GERAIS

#### 3.1 Conceituação

Inicialmente, de acordo com a norma ABNT NBR 9062:2017 que trata dos requisitos para o projeto, execução e controle de estruturas de concreto pré-moldados e pré-fabricados, duas diferenciações relacionadas ao tipo de estruturas devem ser feitas, sendo que:

a. A respeito do peso próprio dos elementos – estrutura leve e estrutura pesada:

De acordo com ABCIC (2023), as estruturas podem ser definidas como leve ou pesada, a depender do peso próprio dos elementos. Enquanto as estruturas leves possuem menor peso próprio, vencem menores vãos e por isso podem ser manipuladas e montadas com equipamentos de menor capacidade de carga, as estruturas pesadas possuem maior peso próprio já que possuem comprimento suficiente para vencer maiores vãos e são usualmente protendidas, por isso, necessitam de equipamentos com maior capacidade de carga para sua manipulação e montagem.

É possível a concepção de edificações com ambas as tipologias de estrutura (leve e pesada), sendo necessário a realização de estudo de viabilidade para o caso, de forma a considerar a logística, comprimento dos elementos, possibilidade de utilização de equipamentos e de montagem.

b. A respeito do processo de produção das peças - pré-fabricados x pré-moldados:

Embora a norma ABNT NBR 9062:2017 cite que ambos os elementos de estruturas pré-moldados e pré-fabricados sejam produzidos previamente e fora do local de utilização definitiva da estrutura, os pré-fabricados são executados com processo industrial, em instalações permanentes de uma empresa que se dedica a este fim, que possua mão de obra treinada e especializada, matéria prima submetida a inspeções e ensaios, com controle de qualidade e de produção. Já os elementos pré-moldados devem ser

executados conforme as prescrições das normas ABNT NBR 14931<sup>1</sup> e ABNT NBR 12655<sup>2</sup>, mas são dispensados de controle de qualidade em laboratório e execução em locais específicos a este fim, além de serem submetidos a exigências menos rigorosas do que os elementos pré-fabricados. Por este motivo, em termos de personalização do design, os elementos pré-moldados têm menor flexibilidade e adaptação do que os pré-fabricados.

A respeito do local de produção, também existem os elementos pré-moldados que são produzidos em canteiro, ou seja, junto ao seu local de utilização definitivo. Um exemplo de elementos produzidos através deste método são os painéis pré-moldados, utilizados como paredes de fechamento, que são moldados na posição horizontal no canteiro (Figura 1) e, após o atingimento da resistência necessária, são montados para a sua posição com o auxílio de equipamentos (Figura 2). A esse processo de construção dá-se o nome de *“tilt-up construction”*, comumente utilizado na construção de galpões.

Figura 1 - Exemplo de painéis de concreto em produção no canteiro de obras



Fonte: Walls and ceilings, 2017.

<sup>1</sup> ABNT NBR 14931 – Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras – Requisitos.

<sup>2</sup> ABNT NBR 12655 – Preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto.

Figura 2 – Içamento de painel pré-moldado.



Fonte: Concrete Construction, 2013.

As estruturas pré-fabricadas possibilitam as mais diversas maneiras de utilização, tais como:

- Elementos de lajes, vigas, pilares e escadas para estruturas reticuladas e estruturas de obras de arte especiais com utilização em infraestrutura;
- Painéis pré-moldados do sistema “*tilt-up*” para utilização em edificações;
- Elementos de vedação, paredes;
- Painéis para muros de arrimo;
- Blocos e estacas de concreto;
- Elementos para estruturas mistas de aço e concreto.

### **3.2 Estrutura pré-fabricada no Brasil e as vantagens no seu emprego**

De acordo com Vasconcelos (2002), a aplicação de elementos pré-moldados de concreto no Brasil teve início em 1926 com a construção do Hipódromo da Gávea, no Rio de Janeiro, com as peças produzidas no próprio canteiro. Posteriormente, no final da década de 50 em São Paulo, foram executados vários galpões pré-moldados no próprio canteiro de obra, aplicando-se pela primeira vez métodos iniciais de racionalização e industrialização do sistema construtivo, como

por exemplo a execução de peças empilhadas uma sobre a outra, separadas por um papel parafinado e com fôrmas nas laterais, de modo que não se fazia necessário aguardar o endurecimento da camada anterior para que se executasse a próxima.

Em relação do emprego do pré-fabricado em edifícios com estrutura reticulada, é citado como pioneiro o Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo (cidade universitária Armando Salles de Oliveira), em 1964, formado por doze prédios cada qual com doze pavimentos.

Conforme Pigozzo et al. (2006) *apud* ABCI (1980), a utilização da pré-fabricação como método de racionalização no Brasil foi se desenvolvendo entre os anos 60 e 90, variando entre ciclos de desestímulo e aprimoramento, sendo a partir dos anos 90 impulsionado pelos grandes investimentos que exigiam grande velocidade de construção, sobretudo no estado de São Paulo.

Atualmente, a estrutura de concreto pré-fabricada tem gama diversa de aplicação, podendo ser aplicada nos mais diversos segmentos da construção, tais como: construção industrial, construção habitacional, edificações comerciais, estádios, centros de distribuição e logística, infraestrutura rodoviária e obras de arte especiais.

Comparado aos métodos de construção tradicionais em estruturas de concreto moldadas in loco, o método de construção pré-fabricada possui muitas vantagens, como exemplifica-se em Van Acker (2002):

- Processo produtivo feito em fábrica que possibilita a produção mais eficiente e racional uma vez que se utiliza de maquinário apropriado e automatizado;
- Controle de qualidade devido à necessidade de ensaios periódicos e controle dos insumos;
- Otimização no uso de materiais devido ao emprego de equipamentos que controlam o preparo do concreto, sendo frequente a utilização de concreto de alto desempenho (com resistência à compressão superior a 50 MPa);
- Eficiência estrutural: alcance de maiores vãos através de peças com menor seção transversal e peças mais esbeltas quando aliado à utilização da protensão;

- Possibilidade de utilização da protensão, levando a maior resistência à flexão, maior momento de fissuração e maior carga de serviço;
- Adaptabilidade, uma vez que devido aos maiores vãos livres, as edificações aceitam reformas periódicas e modificações maiores;
- Tempo de construção bastante reduzido quando comparado ao método convencional, significando também retorno antecipado do investimento;
- Menor impacto ao meio ambiente uma vez que apresenta considerável redução dos entulhos gerados, além da redução do consumo de materiais e de energia;
- Seu emprego possibilita o aumento do grau de desenvolvimento tecnológico do país, já que implica na valorização da mão de obra qualificada e na oferta de equipamentos (EL DEBS, 2000).

Muito embora existam grandes vantagens com a sua utilização, a implementação da técnica no Brasil possui alguns dificultadores como citado por El Debs (2000): a oferta limitada de equipamentos, a baixa mecanização dos canteiros, o pouco conhecimento de alternativas em concreto pré-fabricado, os impostos incidentes sob taxaçaõ específica que penalizam o emprego dos elementos produzidos em fábricas e outros fatores culturais como a falta de mão de obra especializada e o custo em relação ao moldado in loco.

### **3.3 Sistemas construtivos**

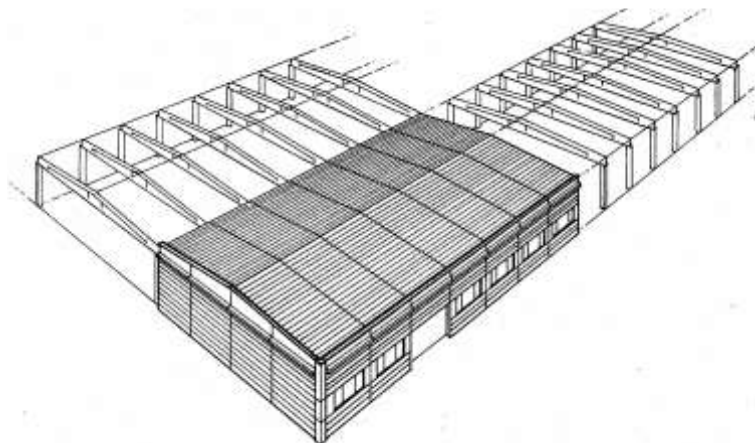
Dada a diversidade de empresas que atuam na indústria de pré-fabricados, há diversas soluções técnicas para as construções, entretanto, algumas tipologias construtivas são mais frequentes e adotam os elementos de pilares, vigas e lajes. Citam-se alguns sistemas construtivos mais comuns para estruturas em concreto pré-fabricado, conforme Van Acker (2002):

#### **a) Estruturas em pórticos:**

Constituídas de pilares e vigas de fechamento, aplicadas em construções que exigem vãos amplos entre as colunas e espaços internos flexíveis e abertos, como galpões. Se caracterizam pela utilização de pilares

que suportam a carga vertical e as transmitem à fundação. Estes são dispostos em um padrão regular de linhas ou grelhas, criando pórticos.

Figura 3 – Exemplo de estrutura em pórticos



Fonte: VAN ACKER, 2002.

b) Estruturas em esqueleto:

Constituídas de elementos de eixo reto (pilares e vigas) ou em pavimentos sem vigas (pilar-laje). Nesse tipo de estrutura, as vigas são utilizadas para conectar os pilares, criando uma grade / malha tridimensional.

Figura 4 – Exemplo de estrutura em esqueleto



Fonte: VAN ACKER, 2002.

c) Estruturas em painéis estruturais:

Constituído de componentes de painéis portantes verticais e painéis horizontais de lajes, que realizam o fechamento dos vãos. Oferecem a vantagem da rapidez na construção, isolamento acústico e resistência ao fogo.

Figura 5 – Exemplo de edifício em painéis de concreto pré-fabricado

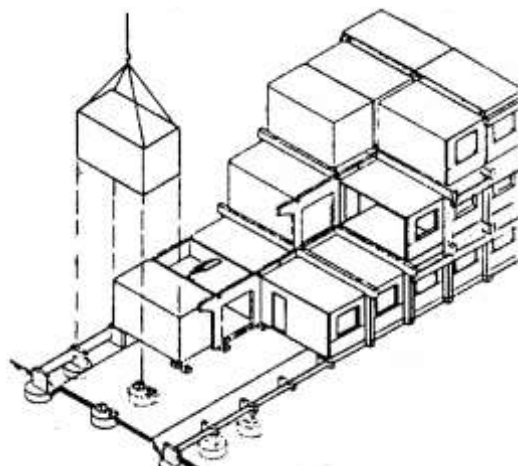


Fonte: CASSOL Pré-fabricados, 2019.

d) Sistemas celulares:

Os sistemas ou unidades celulares são constituídos de células de concreto pré-fabricado, utilizados mais frequentemente para partes de edificações como blocos de banheiros, cozinhas, galerias, garagens, shafts, dentre outros.

Figura 6 – Exemplo de elemento celular pré-fabricado



Fonte: VAN ACKER, 2002.

Os sistemas construtivos podem ser utilizados de forma mista, combinando um e outro tipo, como exemplo pode-se adotar a estrutura em esqueleto com estrutura em painéis estruturais para fachadas. Neste trabalho, será dado enfoque às estruturas em esqueleto, como será visto nos capítulos 0 e 6 a seguir.

## 4 CONCEPÇÃO E PROJETO DE EDIFICAÇÕES COM ELEMENTOS DE ESTRUTURA DE CONCRETO PRÉ-FABRICADO

### 4.1 Concepção arquitetônica

A construção pré-fabricada é adequada a muitas tipologias de edificações, sendo que seu desenvolvimento está condicionado à expertise dos arquitetos na harmonização do projeto arquitetônico com as especificidades das peças. Dessa forma, a elaboração de um projeto adequado de edificação parte da concepção arquitetônica associada ao conhecimento das limitações das estruturas. Nesse sentido, o ideal é que a estrutura pré-fabricada seja definida como a solução desde a fase inicial da concepção do projeto, em vez de ser tratada como uma adaptação posterior a uma estrutura de concreto armado convencional.

Uma vez que uma das grandes vantagens na utilização de estruturas pré-fabricadas é a racionalização do processo construtivo e a redução do tempo e economia na construção, a adoção de planos ortogonais e layouts padronizados são ideais pois facilitam a modulação de peças, padronização e repetição de soluções.

A concepção arquitetônica de uma edificação com elementos pré-fabricados deve considerar a adoção do maior número de elementos possível com dimensões padronizadas da seção transversal e vãos iguais, além de considerar as técnicas de montagem. Segundo Van Acker (2002), os seguintes critérios devem ser considerados nesta etapa:

- Padronização dos elementos internos para uma mesma produção e entre fabricantes;
- Padronização dos detalhes construtivos, o mais simples possível;
- Modulação de projeto, isto é: utilização de vãos com mesma ordem de grandeza;
- Projetos bem elaborados com os detalhes apropriados;
- Admitir tolerâncias para pequenas variações dimensionais entre as peças especificadas e as executadas entre os elementos para evitar falhas de montagem;
- Evitar modificações não previstas para que não haja prejuízo no planejamento da produção;

- Admitir tolerâncias para os fenômenos de movimentação devidos à retração, expansão térmica e dilatação. As tolerâncias devem ser sempre confirmadas com os fabricantes das peças.

A norma ABNT NBR 15873 orienta a respeito da coordenação modular que visa a compatibilidade dimensional entre os elementos construtivos especificados no projeto e os componentes pré-fabricados, além de estabelecer as tolerâncias dimensionais e folgas perimetrais entre os componentes. Para determinação das medidas de fabricação dos elementos considera-se os ajustes de coordenação que são as tolerâncias de fabricação, marcação e instalação e os procedimentos de montagem.

Ao realizar o lançamento da estrutura na planta, o critério da modulação é primordial para a padronização da produção, comportamento estrutural e também para o acabamento. São modulados os vãos dos elementos, com comprimento de básico de 3m, até 12m (por módulos) e também o posicionamento dos pilares e das vigas, sendo que o posicionamento dos elementos de canto deve ser feito ao longo das bordas de piso e para o meio da edificação, no cruzamento dos eixos.

Conforme Van Acker (2002), um outro aspecto a ser definido durante o projeto arquitetônico é a respeito da integração de tubulações e dutos de instalações prediais. Estas podem ser passadas no interior de vãos da estrutura pré-fabricada. Como exemplo, vide Figura 7, vigas calha / canaleta e pilares podem ser concebidos para coletar e direcionar o escoamento de água pluvial. Outras vantagens podem ser obtidas como a redução de carga térmica em pisos, a utilização de alvéolos das lajes para incorporar dutos e iluminação zenital.

Figura 7 – Exemplo de viga calha e pilar condutor de água pluvial



Fonte: PREFAB, 2023

## **4.2 Concepção estrutural**

### **4.2.1 Normatização brasileira**

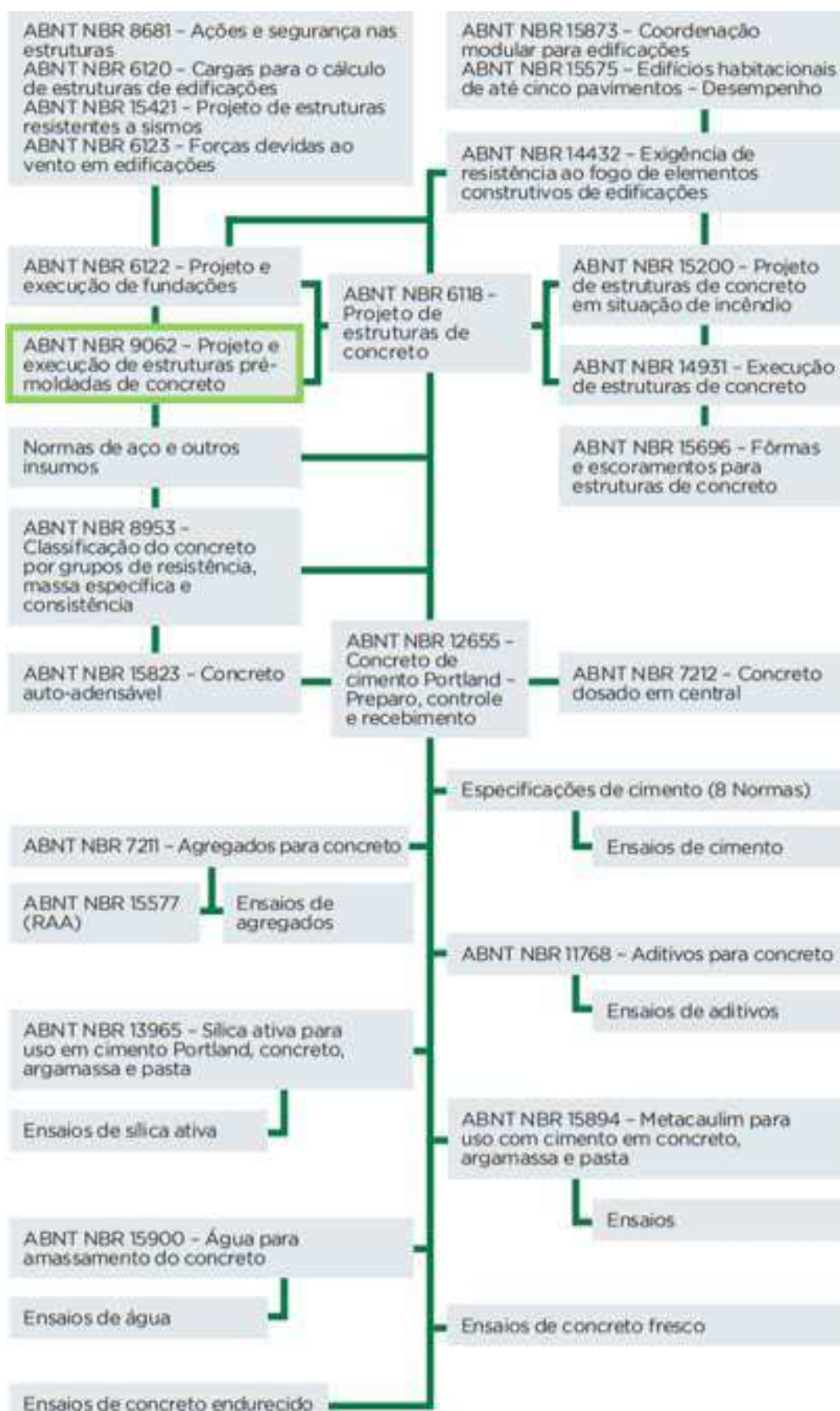
Conforme alerta Van Acker (2002), o conceito da construção utilizando elementos pré-fabricados de concreto é frequentemente mal interpretado, sendo erroneamente comparado a uma variante técnica das construções em concreto moldadas in loco, mas produzidas em usinas fora do canteiro para serem posteriormente montadas. Contrariamente, os sistemas pré-fabricados possuem características particulares como dimensões e tolerâncias específicas, sistemas de estabilidade, dentre outros.

Sobre o aspecto do dimensionamento estrutural, de maneira geral, as mesmas normatizações se aplicam tanto ao concreto armado moldado in loco quanto ao pré-fabricado, isto é, os carregamentos, esforços solicitantes e ações são definidos da mesma maneira, estando sujeitos aos requisitos e à hierarquia das normas técnicas brasileiras, conforme a Figura 8.

No que diz respeito a elementos pré-fabricados de concreto, existem normas específicas que são aplicáveis, incluindo as seguintes, entre outras:

- ABNT NBR 9062:2017 - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado
- ABNT NBR 16258:2014 - Estacas pré-fabricadas de concreto – Requisitos
- ABNT NBR 14861:2022 - Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido - Requisitos e procedimentos
- ABNT NBR 14861:2022 - Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido - Requisitos e procedimentos
- ABNT NBR 10835:2014 - Concreto Pré-Moldado - Determinação da Resistência à Compressão
- ABNT NBR 15961-1:2011 - Transporte e Montagem de Elementos Pré-Moldados de Concreto - Parte 1: Estruturas

Figura 8 – Hierarquia da normatização brasileira de concreto para estruturas de edifícios



Fonte: ABCIC, 2012.

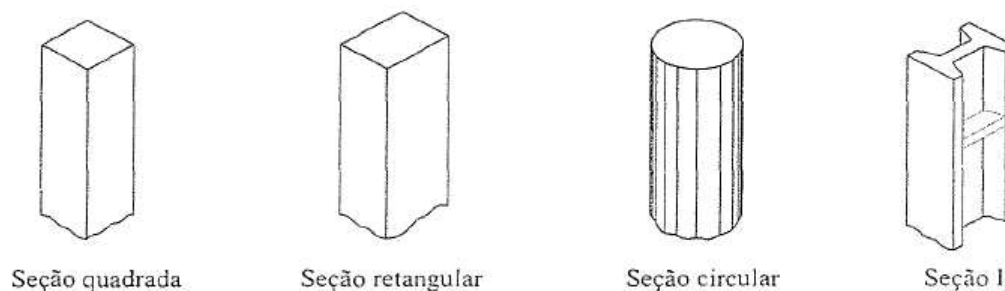
## 4.2.2 Elementos estruturais

Com relação aos elementos estruturais da estrutura tipo esqueleto, se compõem basicamente de pilares, vigas e lajes. A seguir serão tratados aspectos gerais de cada um deles, conforme verifica-se em El Debs (2000).

### a) Pilares

Os pilares podem ter seção transversal diversa conforme exemplificado na Figura 9: quadrada, retangular, circular, tipo I e tipo Vierendeel. Dessas, as mais utilizadas são as seções quadrada e retangular, podendo também serem vazadas. São em geral executados em concreto armado, ou seja, utilizam armadura passiva. No entanto, caso sujeitos a momentos elevados podem ser dimensionados utilizando-se armadura ativa - em concreto protendido.

Figura 9 - Exemplos de seções transversais comuns utilizadas em pilares



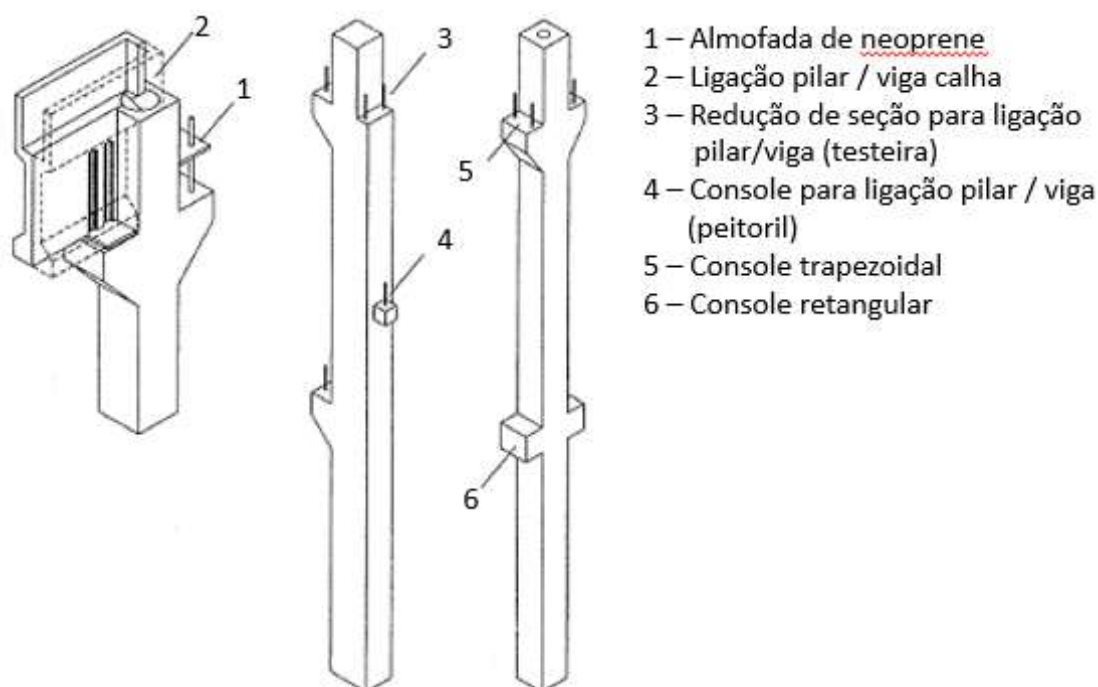
Fonte: EL DEBS (2000).

Conforme Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007) devido às especificidades de cada modulação da estrutura, devido às diferenças de geometria, os pilares são as peças menos padronizadas do sistema pré-fabricado e as mais complexas para definição em projeto e para produção na fábrica.

De forma geral, os pilares devem obedecer à variação dimensional em múltiplos de 10cm, sendo que a dimensão transversal mínima deve ser de 20 ou 30cm em um dos lados ou 40cm, de acordo com o dimensionamento. Estas dimensões devem-se ao sistema de fabricação da peça, já que os fundos de fôrma possuem dimensão mínima de 20cm de largura. Já com relação ao comprimento máximo dos pilares, este é condicionado ao tipo de transporte, sendo limitado a 30m.

Para receberem as vigas e a transferência de cargas, os pilares devem ser projetados com estruturas de apoio prismáticas denominadas consoles - Figura 10. Estes elementos complementares são descritos na NBR 6118 como elementos em balanço nos quais a distância de aplicação da carga aplicada à face do apoio ( $a$ ) é menor ou igual à altura útil do console ( $d$ ), conforme a Figura 11. Estes elementos são dimensionados mais comumente através do método de bielas e tirantes<sup>3</sup> para consoles curtos. Deve-se evitar a utilização de consoles nas quatro faces do pilar para facilitação da sua execução em fábrica.

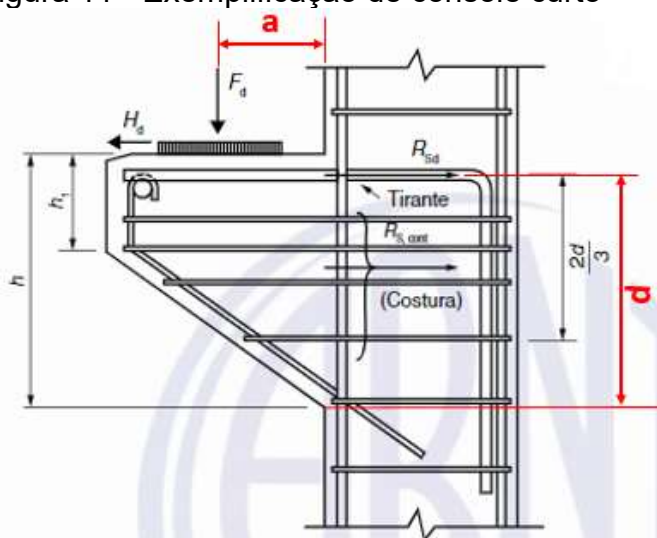
Figura 10 - Elementos de um pilar pré-fabricado de concreto



Fonte: Adaptado de EL DEBS (2000).

<sup>3</sup> Método de bielas e tirantes: abordagem usada na análise de estruturas de concreto armado, que se baseia na ideia de que uma estrutura pode ser considerada como composta por "bielas" e "tirantes". As bielas representam as áreas comprimidas da estrutura, enquanto os tirantes representam as áreas tracionadas. As bielas são formadas nas partes inferiores da seção transversal, onde ocorrem esforços de compressão, enquanto os tirantes estão nas partes superiores, onde ocorrem esforços de tração.

Figura 11 - Exemplificação de console curto



Fonte: Adaptado da NBR 6118, 2023, p. 189

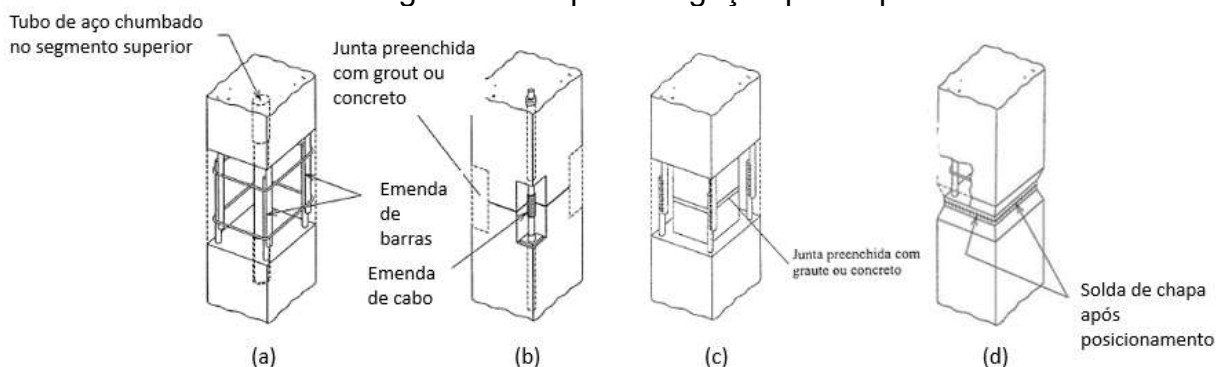
Para o caso de edifícios altos em que sejam necessários pilares muito longos, cujo comprimento total exceda a capacidade máxima de transporte (carretas muito extensas), torna-se indispensável a emenda entre segmentos de pilares. As formas de realização da emenda possuem várias técnicas, entretanto, seja qual for a técnica adotada, esta deve garantir que os elementos emendados formem um sistema coeso que garanta a estabilidade e integridade estrutural do edifício. Algumas técnicas para emendas entre pilares são mais comuns, como cita-se:

Conexão através de armaduras de emenda que são inseridas nos pilares durante a etapa de fabricação e, durante a montagem são conectadas através de solda ou armadura adicional – Figura 12 (a) e (c);

Conexão através de cabos de protensão. Conforme Munte Construções Industrializadas et al. (2007), adota-se usualmente a altura de 1 metro acima do pavimento da laje para se realizar a emenda, coincidindo com a seção de menor momento no pilar – Figura 12 (b);

Conexão através de juntas mecânicas como conectores parafusados e chapas de aço. Esse tipo de emenda é vantajoso devido a resistência imediata logo após a solda, o que dispensa o cimbramento provisório – Figura 12 (d).

Figura 12 – Tipos de ligação pilar x pilar



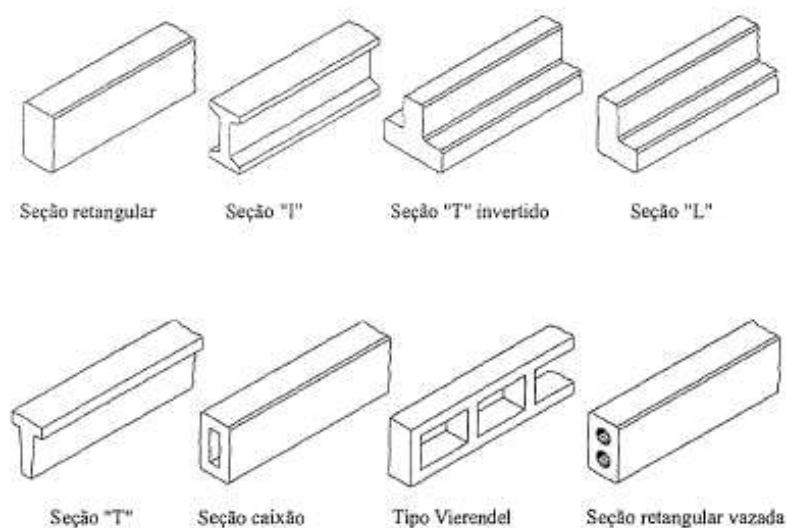
Fonte: Adaptado de EL DEBS (2000).

### b) Vigas

As vigas podem adotar seções transversais diversas, algumas são mostradas na Figura 13. Usualmente adota-se a protensão para as vigas, de modo a possibilitar vãos maiores. Importante citar que é aconselhável a utilização de seção transversal constante nas vigas para a racionalização da produção.

Segundo Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007), da mesma maneira que os pilares, é usual a adoção de seções transversais múltiplas de 10cm, para facilitação da produção das peças. A menor largura possível para as vigas retangulares é de 15cm, entretanto, é recomendável que sejam utilizadas larguras iguais ou maiores a 30cm.

Figura 13 – Exemplos de seções transversais comuns utilizadas em vigas

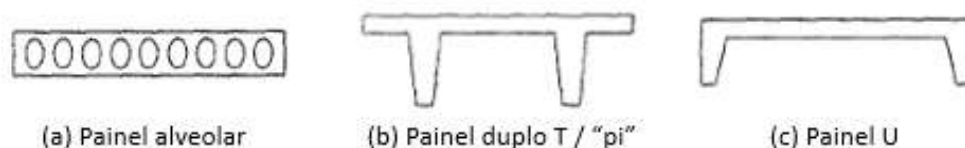


Fonte: EL DEBS (2000).

### c) Lajes

Conforme El Debs (2000), os tipos de laje pré-fabricados são diversos, sendo os mais comuns os painéis de lajes alveolares que podem ser protendidos ou não e lajes duplo T ou “pi”. Seja qual for o tipo de laje, todos são complementados com uma capa de concreto moldado in loco, de modo a promover a solidarização entre os elementos de laje e entre lajes-vigas. A capa produz melhoria do desempenho do conjunto, uma vez que ajuda a distribuir as cargas. A seguir, na Figura 14 estão apresentadas algumas seções transversais de lajes pré-fabricadas mais comumente encontrados no mercado.

Figura 14 – Representação de seções transversais típicas para lajes pré-fabricadas



Fonte: Adaptado de EL DEBS (2000).

- *Painéis alveolares (protendidos ou não):*

Constituem-se de uma seção transversal vazada com capa de concreto. São em geral produzidas em pistas de concretagem através de fôrmas deslizantes, sendo em seguida cortadas no comprimento necessário. A utilização da protensão é desejável uma vez que estes elementos possibilitam o alcance de grandes vãos livres que em geral vão de 5 a 20 metros. Quanto a largura, usualmente de 1,00 a 1,20 metros, mas podem atingir outras dimensões conforme a padronização do fabricante.

Em relação ao dimensionamento, as lajes em painéis alveolares são consideradas como lajes armadas em uma direção, simplesmente apoiados ou com pequenos balanços. A armadura dos painéis em concreto protendido é constituída apenas por armadura ativa na parte inferior e/ou na parte superior, sem armaduras transversais para resistir à força cortante, que deverá ser resistida pelo próprio concreto.

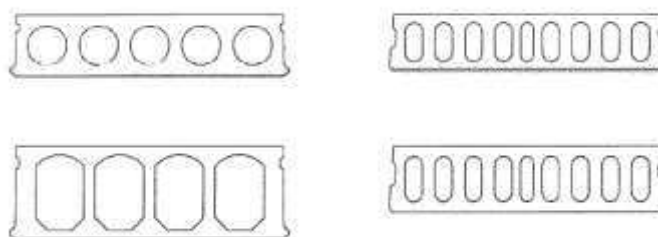
A espessura mínima das mesas é dada pela expressão:  $hf > 1,6\sqrt{h}$

A armadura de protensão deve se concentrar na região da alma, com espaçamento entre o triplo da bitola do cabo e no máximo 40cm ou o dobro da altura da laje.

Os painéis de laje, ao se encontrarem formam juntas longitudinais que deverão possibilitar o seu preenchimento, com abertura superior mínima de 30mm e inferior a mínima possível de modo que durante o preenchimento não haja escape do material de preenchimento.

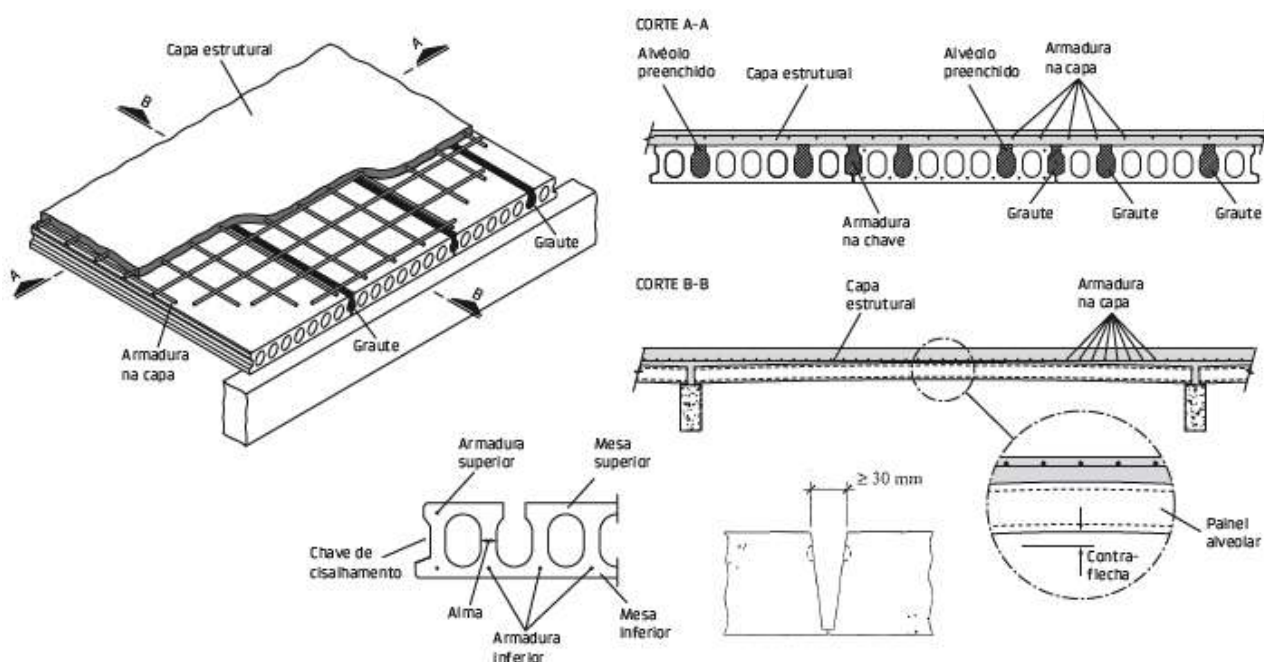
Com relação aos apoios nas vigas, deve-se considerar a largura mínima de 60mm, que em geral pode ir até 100mm ou a metade da altura da laje especificada no projeto.

Figura 15 – Exemplos de seções transversais de painéis alveolares



Fonte: EL DEBS, 2000.

Figura 16 – Seção transversal de painel alveolar



Fonte: Adaptado de EL DEBS (2000).

#### d) Escadas

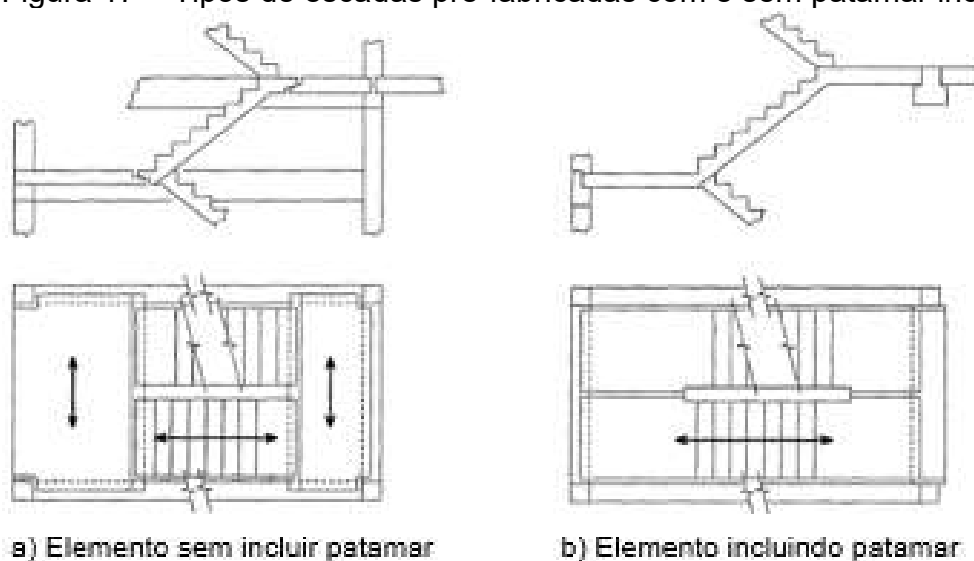
Conforme El Debs (2000), as escadas de concreto pré-fabricadas são vantajosas em estrutura pré-fabricada já que dispensam as etapas mais longas e trabalhosas quando se utiliza o concreto moldado no local.

Com relação à produção, as fôrmas das escadas pré-fabricadas consideram usualmente uma largura mínima de 120cm e a dimensão dos espelhos e pisos padronizados em geral de 17 a 18cm e 29 a 30cm, respectivamente. Para a espessura da laje, deve ser múltipla de 5cm, variando de 10 a 25cm (MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS *et al.*, 2007).

Os tipos de escadas pré-fabricadas são diversos, podendo ou não possuir o patamar entre lances. A fôrma utilizada também pode variar conforme os fabricantes podendo produzir escadas em elemento único (monolítico) ou em elementos dissociados (espelhos, pisos, patamares e vigas de apoio). Nas figuras a seguir serão apresentados alguns tipos conhecidos no mercado.

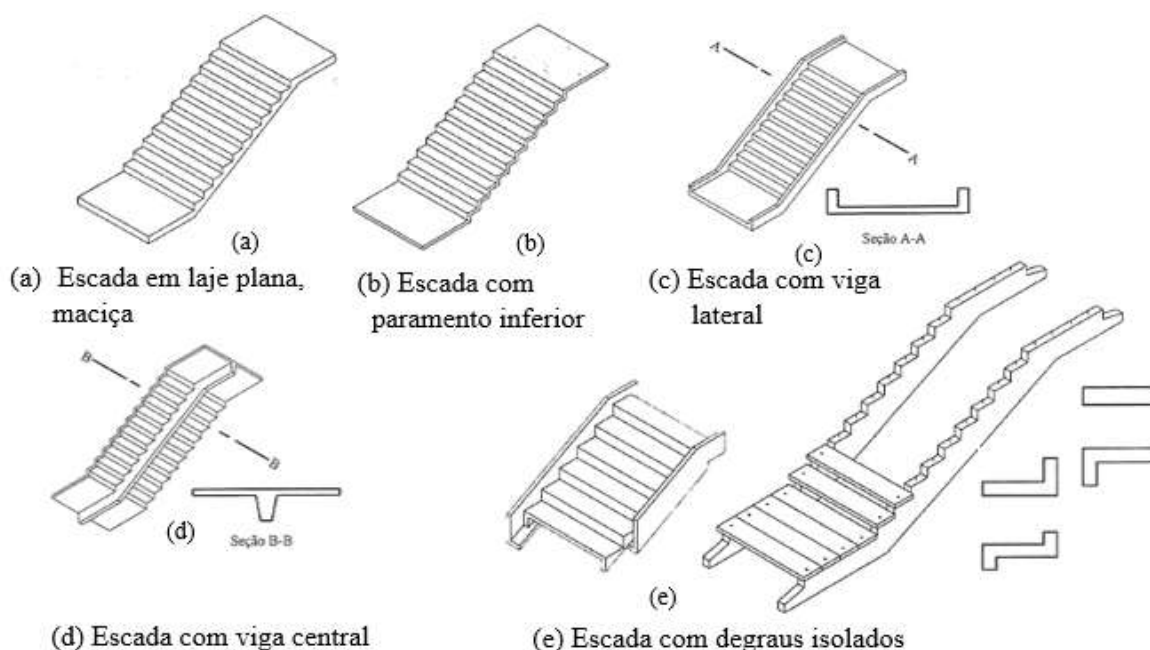
Como indicado em Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007), os apoios das escadas devem ser simples em junta seca, sem qualquer tipo de ligação por pino, argamassas ou aparelhos de apoio, para tanto, a superfície de contato deve ser de no mínimo 10cm.

Figura 17 – Tipos de escadas pré-fabricadas com e sem patamar incluso



Fonte: EL DEBS, 2000.

Figura 18 – Modelos de escadas pré-fabricadas em elementos únicos



Fonte: Adaptado de EL DEBS, 2000.

#### 4.2.3 Sistemas estruturais com elementos de eixo reto

Os sistemas estruturais correspondem ao modo como os elementos são arranjados para compor a estrutura da edificação (CARVALHO, 2017), com o objetivo de suportar os carregamentos que incidem sobre a estrutura e conduzi-los à fundação. Conforme a ABNT NBR 9062:2017, os sistemas estruturais são importantes para garantir a estabilidade global da edificação. Estes podem ser adotados em um projeto de forma isolada ou combinados entre si.

De acordo com a referida norma, em seu item 5.1.2, são quatro os tipos de sistemas estruturais:

a) sistema estrutural de pilares engastados na fundação:

estruturas onde a estabilidade é proporcionada pelo engastamento dos pilares à fundação, podendo estar associados a vigas articuladas ou engastadas. Esta forma é uma das mais empregadas pela facilidade de montagem e de realização das ligações.

b) sistema estrutural formado por pórticos no qual existe ligação entre vigas e pilares: estruturas onde a estabilidade é proporcionada por ação de pórtico

composto por pilares e vigas, interligados entre si por meio de ligações resistentes a momentos fletores. Neste tipo de sistema, adota-se um parâmetro associado à restrição à rotação nos apoios das vigas nos pilares que pode variar de 0 (isostática) a 1 (engastada). Através de softwares é possível projetar estruturas em que a redistribuição de esforços se aproxima mais da realidade e, assim, aproveitar o máximo dos materiais (MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS et al., 2007).

c) sistema estrutural com contraventamento formado por outros elementos:

estruturas verticais onde a estabilidade é proporcionada por outros elementos de contraventamento que não vigas e pilares, como paredes, elementos celulares e elementos de contraventamento tipo X, núcleos rígidos e/ou outros.

d) sistema estrutural com pisos formando diafragmas:

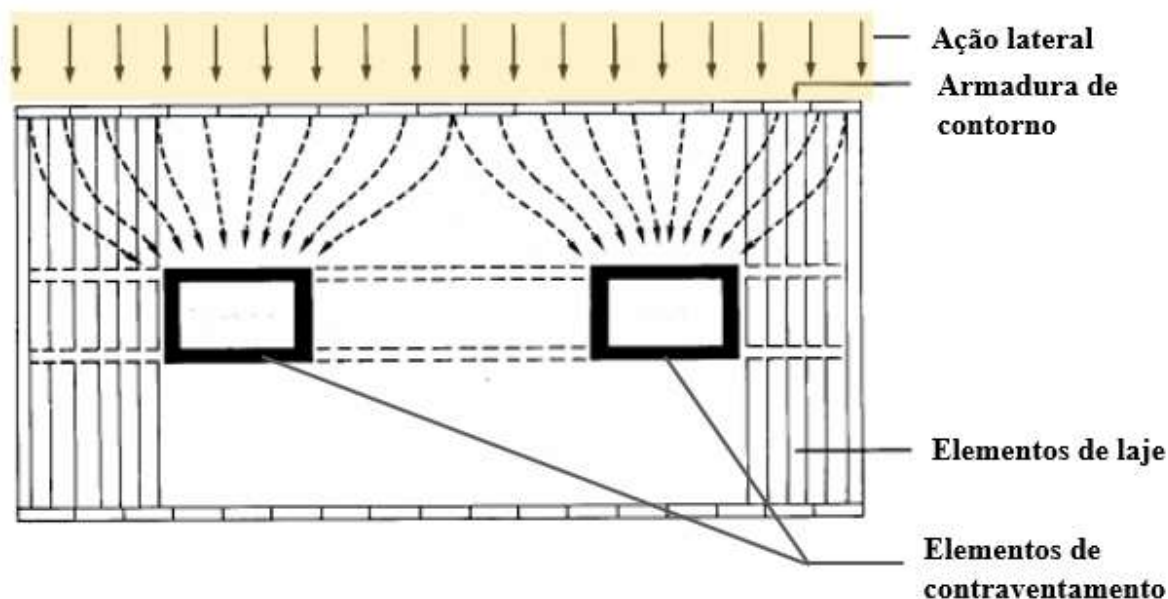
estruturas de pisos ou cobertura que formam diafragmas que garantem a transferência de esforços horizontais para os elementos verticais de sustentação e contraventamento.

#### **4.2.4 Efeito diafragma das lajes de piso**

Van Acker (2002) define o efeito diafragma como a transmissão dos esforços horizontais para as lajes de piso e de cobertura. Estes elementos de estruturas pré-fabricadas são projetados para resistir aos esforços horizontais, sejam de vento ou decorrentes de outras ações e impedir ou minimizar a deformação (Figura 20). Constituem-se, portanto, diafragmas – estruturas horizontais planas que recebem e transferem os esforços horizontais em diversos pontos da estrutura para os elementos de contraventamento vertical ou para os pilares, que são por fim, as estruturas projetadas para resistir a estes esforços, como demonstrado na Figura 19 através de dois núcleos rígidos.

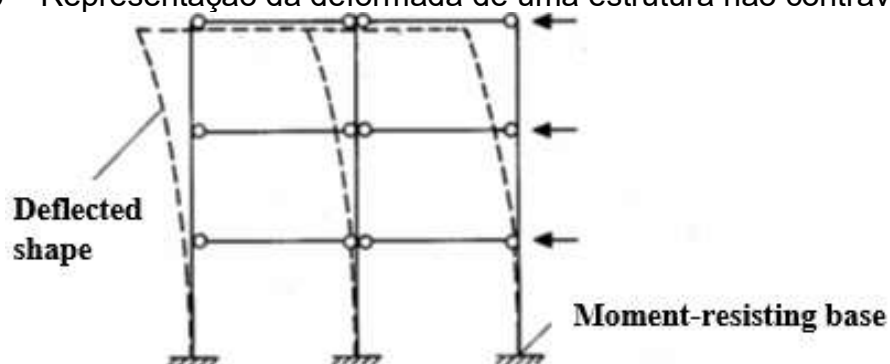
Os esforços horizontais atuam em todas as estruturas, mas podem ou não ser desprezados, a depender de fatores como a altura da edificação, existência de múltiplos pavimentos, inércia dos pilares e área da edificação. (MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS et al., 2007).

Figura 19 – Representação da transmissão de esforços através do efeito diafragma nas lajes



Fonte: Adaptado de VAN ACKER (2002).

Figura 20 – Representação da deformada de uma estrutura não contraventada



Fonte: VAN ACKER (2002).

Para resistir aos esforços de tração, são adotadas armaduras positivas no perímetro laje.

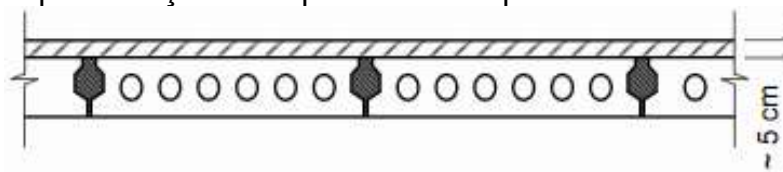
Já para resistir aos esforços de cisalhamento, adota-se a aplicação de uma capa de concreto sobre os elementos pré-fabricados da laje e o preenchimento (“grauteamento”) das juntas longitudinais entre os elementos. Adicionalmente, as armaduras transversais (negativas) sobre a capa também contribuem para a resistência às tensões de cisalhamento.

Conforme a norma ABNT NBR 9062:2017, quando adotado o capeamento de concreto, este deve ter espessura mínima de 5cm indicado em projeto, sendo que

em caso diverso em obra, permite-se para pontos isolados a espessura mínima de 3cm. A espessura da capa de concreto também pode variar devido à contra flecha das lajes, sendo a espessura maior nas extremidades, conforme indica a Figura 22. Elliot (1996, *apud* RAYMUNDO, 2012, p.124) cita que sempre que adotada a capa de concreto, deve-se prever armadura de reforço em malha de aço com área mínima de 0,13% da área de concreto da seção unitária da capa. Esta armadura, posicionada na média altura da capa, ancorada nas vigas de borda e passante (contínua) nas vigas centrais do pavimento. Em caso de trespasse, deve-se adotar o mínimo requerido de 30cm.

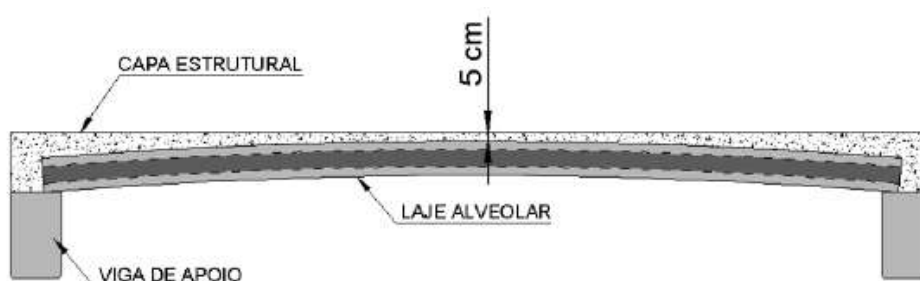
Com relação ao efeito diafragma, a depender da verificação de tensões podem ser adotados vários tipos de estratégias para levar à transmissão dos esforços cortantes e de cisalhamento. De forma geral, são adotados os exemplificados acima, entretanto, há também outros tipos de armaduras como exemplifica-se na Figura 23: as ancoragens em tirantes nas juntas longitudinais entre elementos de laje e ancoragem em barras de acoplamento / tirantes entre alvéolos quebrados.

Figura 21 – Representação da espessura da capa de concreto sobre laje alveolar



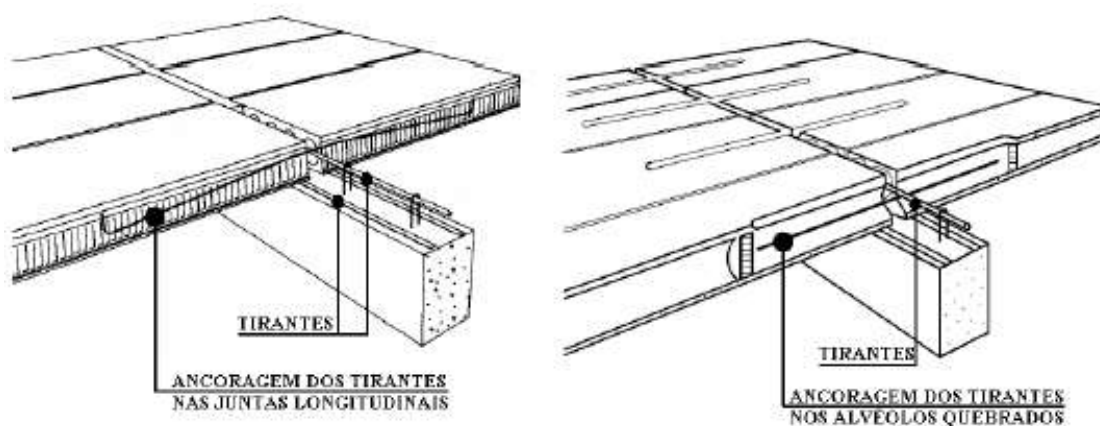
Fonte: ABNT NBR 9062 (2017).

Figura 22 – Capa de concreto sobre laje alveolar com contra flecha



Fonte: RAYMUNDO (2012).

Figura 23 – Exemplos de mecanismos de transferência de forças entre juntas de lajes



Fonte: RAYMUNDO (2012).

#### 4.2.5 Ligações

De acordo com a norma ABNT NBR 9062, o projeto das ligações entre os elementos pré-fabricados deve levar em consideração tanto a estabilidade global da estrutura após montada quando sujeitas as solicitações em serviço quanto a estabilidade durante a etapa de montagem. As solicitações provenientes de variações volumétricas da estrutura como retração, fluência, variação de temperatura, também devem ser consideradas. Seja qual for o tipo de ligação adotado, este deverá possuir a mesma durabilidade dos elementos da estrutura e, caso contrário, deverá ser previsto em projeto a inspeção e substituição de componentes da ligação, quando a inspeção indicar necessário.

O projeto de ligações deverá satisfazer os seguintes princípios (EL DEBS, 2000):

- As ligações devem garantir a rigidez e a estabilidade global da estrutura;
- As tolerâncias de fabricação e montagem devem ser levadas em consideração;
- A análise das ligações deverá se estender às adjacências dos elementos ligados;
- Deve ser considerado que até a ligação atingir sua capacidade, haverá acomodação da mesma.

Segundo o autor, no projeto de ligações de uma estrutura é ideal que o tipo de ligações seja padronizado, para minimizar possíveis incorreções na execução e diminuir incertezas.

A norma ABNT NBR 9062:2017 considera as ligações com comportamento semirrígido. Estabelece no item 5.1.2.9 outros critérios de projeto e execução de estruturas que devem ser atendidos.

Segundo El Debs (2000), as ligações podem ser classificadas segundo o tipo de vinculação, o tipo de esforço transmitido e quanto ao tipo de material. Para cada uma delas podem ser utilizados vários tipos de recursos como conectores metálicos, soldas, apoios elastoméricos, encaixes e recortes, dentre outros.

Quadro 1 – Classificação de ligações

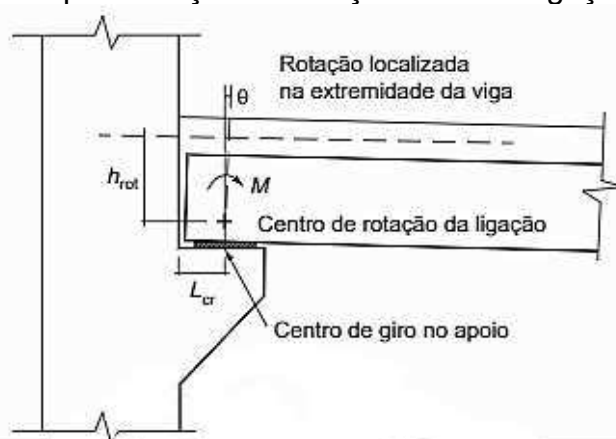
Quanto ao tipo de vinculação e transmissão de momento fletor:	Quanto ao tipo de solicitação	Quanto ao tipo de material:
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ligação articulada</li> <li>▪ Ligação rígida</li> <li>▪ Ligação semirrígida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Compressão</li> <li>▪ Tração</li> <li>▪ Flexão</li> <li>▪ Cisalhamento</li> <li>▪ Torção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Concreto / argamassa no local (seca ou úmida)</li> <li>▪ Solda</li> <li>▪ Com material de amortecimento</li> </ul>

Fonte: Adaptado de EL DEBS (2000) e ABNT NBR 9062 (2017).

#### 4.2.5.1 Tipos de vinculações

As vinculações têm relação com o grau de restrição à rotação e à capacidade de absorção dos momentos fletores. Conforme Marin (2009), a rigidez da ligação é a relação entre o momento e a rotação, sendo que quão maior for a restrição à rotação, mais rígida é a ligação e, por conseguinte, menor será o deslocamento e deformação. Assim, as ligações rígidas e semirrígidas têm capacidade para absorver momento fletor e as ligações articuladas, não o absorvem. De acordo com Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007), quanto mais eficiente é a ligação, maior é a complexidade, custo e eficiência estrutural. A Figura 24 ilustra a rotação de uma viga ligada a um pilar devido ao momento atuante.

Figura 24 – Representação da rotação em uma ligação viga-pilar



Fonte: ABNT NBR 9062 (2017).

A seguir serão apresentados os tipos de ligação segundo a vinculação e citados exemplos práticos de como são aplicadas, tomando-se como base as descrições constantes em Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007).

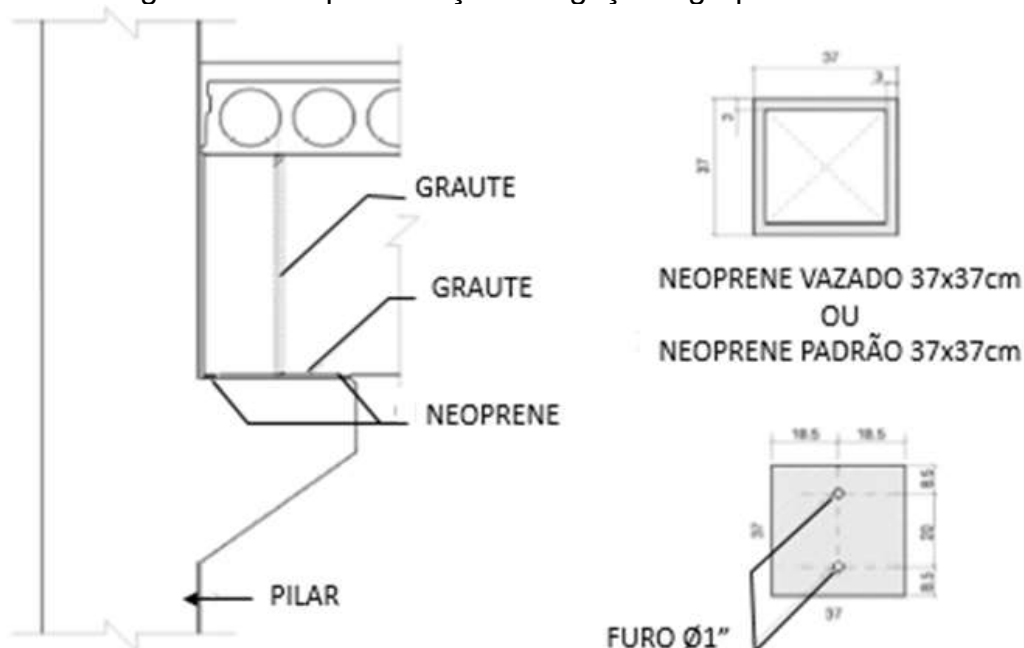
#### a) Ligação articulada

As ligações articuladas caracterizam-se pela transmissão das cargas verticais e dos esforços horizontais entre as peças. Nesta situação, limita-se o fator de restrição à rotação ( $\alpha_r$ ) a 0,15.

$$\alpha_r < 0,15$$

De forma prática, para a transmissão dos esforços, utiliza-se de uma almofada de elastômero (neoprene) e um pino (furo na viga) preenchido com graute. Também pode ser utilizado pino de aço CA-25 com diâmetro de 12,5 ou 25mm, ou mesmo cordoalhas de aço para concreto protendido com 12,5 ou 9,5mm de diâmetro (CP 190 RB). Enquanto não é feito o preenchimento do furo com o graute, não é permitida a montagem do pano de laje sobre a viga, já que as cargas provenientes da montagem das peças serão inteiramente resistidas pelo neoprene até que ocorra a cura do graute.

Figura 25 – Representação de ligação viga-pilar rotulada



Fonte: MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS *et al.* (2007)

b) Ligação semirrígida

As ligações semirrígidas caracterizam-se pela possibilidade de transmissão parcial dos momentos fletores. Esta pode variar de rotulada a engastada, a depender do seu fator de restrição à rotação ( $\alpha_r$ ) que deve estar compreendido entre os parâmetros:

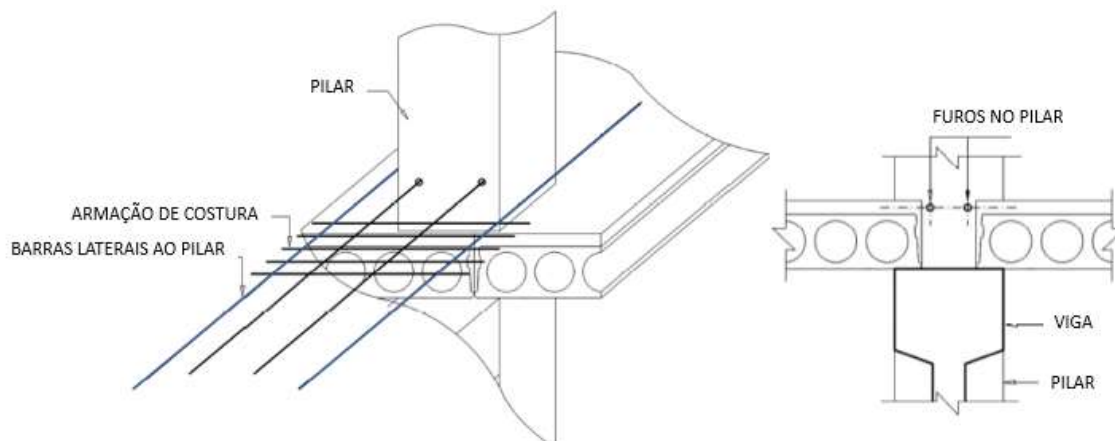
$$0,15 < \alpha_r < 0,85$$

A transmissão de esforços, na realidade, pode ocorrer por algumas das formas de ligação exemplificadas abaixo:

▪ *Através de concretagem vertical e armadura passante:*

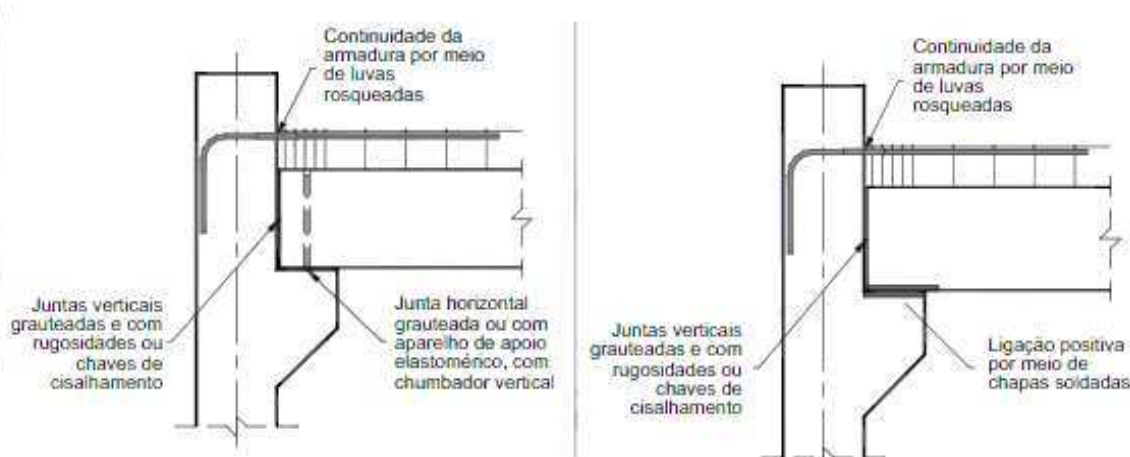
O espaço entre o pilar e a viga é concretado. Como a região inferior da viga em contato com o pilar é caracterizada por esforços de tração não resistentes, os momentos negativos de compressão devem ser combatidos por armadura negativa da viga, formando um nó com o pilar. Esta armadura pode ser feita através de furos passantes, luvas ou bainhas metálicas no pilar, por onde atravessam as barras de ligação (negativas), que, após instaladas, devem ser grauteadas ou coladas com adesivo epóxi. A Figura 26 representa os furos passantes em um pilar.

Figura 26 – Representação de uma ligação viga-pilar semirrígida com concretagem vertical



Fonte: Adaptado de MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS *et al.* (2007)

Figura 27 – Representação de ligação viga-pilar semirrígida com armadura de continuidade

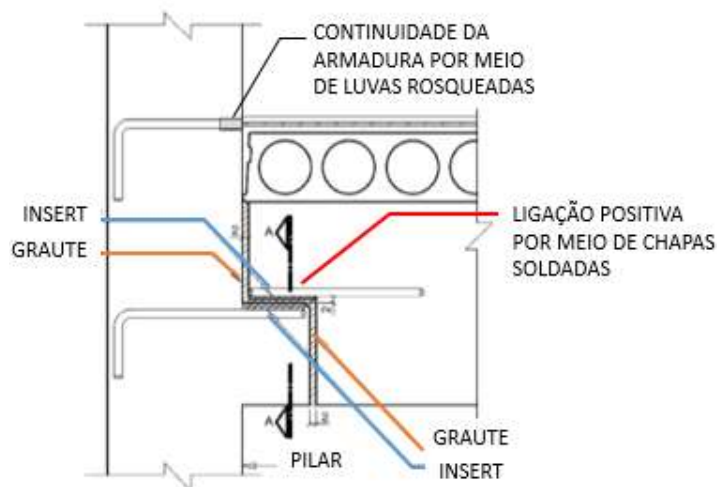


Fonte: ABNT NBR 9062 (2017).

- **Através de concretagem vertical e solda:**

Com relação à concretagem vertical, é feita da mesma forma como no exemplo anterior, entretanto, são inseridas chapas de aço na região inferior da viga, soldadas sobre outra chapa colocada sobre o apoio. As chapas quando soldadas realizam a transmissão dos esforços de tração. A chapa inferior com espessura mínima de 10mm, é concretada ao console e soldada à armadura dele. A Figura 28 representa o tipo de ligação através das chapas soldadas aos inserts colocados no interior da viga e do console e soldadas entre si.

Figura 28 – Representação de ligação viga-pilar semirrígida através de chapas soldadas



Fonte: Adaptado de MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS *et al.* (2007)

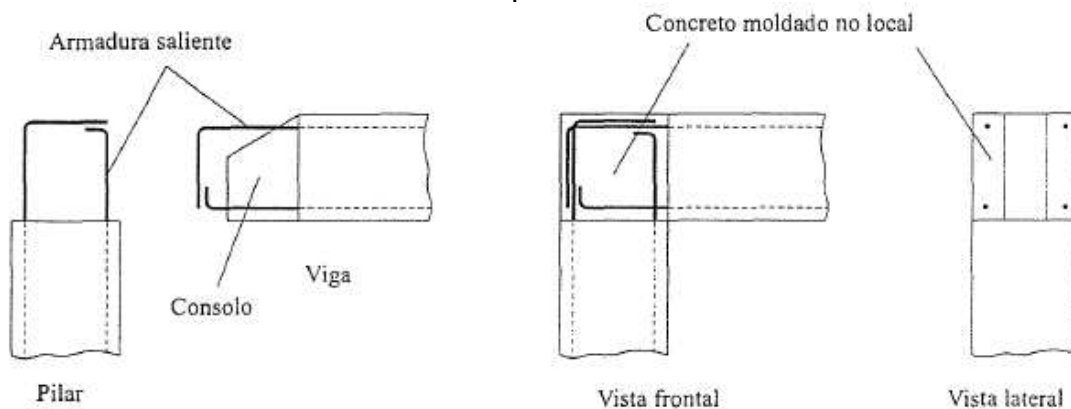
c) Ligação engastada

As ligações engastadas caracterizam-se pela transmissão completa dos momentos fletores. Assim, o fator de restrição à rotação ( $\alpha_r$ ) é considerado maior que 0,85.

$$\alpha_r > 0,85$$

Para obter o efeito do engastamento entre pilar e viga, o nó entre os mesmos é concretado. Para isso, deixam-se armaduras de arranque (armadura de espera) nos elementos (viga e pilar) e concretam-se o conjunto no local da obra, tornando um elemento único após a consolidação.

Figura 29 - Representação de ligação viga-pilar engastada através de armadura de arranque



Fonte: Adaptado de EL DEBS (2000).

#### 4.2.5.2 Tipos de solicitação

Os mecanismos de transferência de forças se dão sobretudo pelo tipo de solicitação a que a ligação está sujeita. Sendo as mais comuns: por compressão, tração e cisalhamento, que, conforme cita El Debs (2000), podem ser transferidas através dos seguintes métodos:

a) Transferência de forças de compressão

- Contato direto entre elementos, caso as tensões de contato sejam baixas;
- Utilização de argamassa de assentamento, elastômeros ou chapas metálicas entre os elementos.

b) Transferência de forças de tração

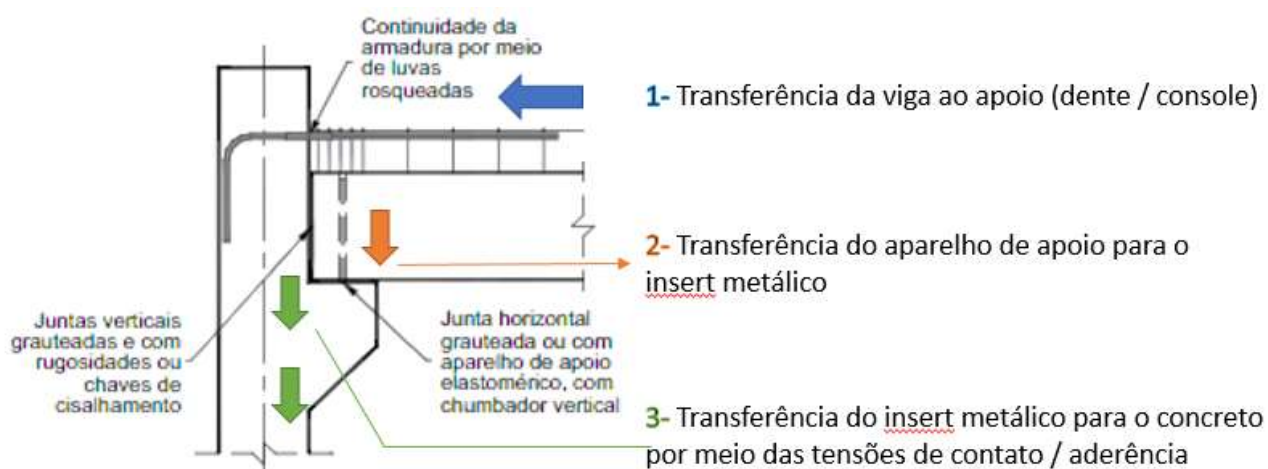
- Emendas de armaduras;
- Elementos metálicos inseridos ao concreto como os dispositivos de içamento e fixadores.

c) Transferência de forças de cisalhamento

- Através do concreto por adesão, atrito ou chaves de cisalhamento;
- Através de armadura ou conectores metálicos.

Os mecanismos de transferência de forças entre os elementos viga e pilar ocorrem em geral seguindo o seguinte caminho, representado em uma ligação exemplificada na figura abaixo:

Figura 30 – Representação da transferência de esforços em ligação viga-pilar



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9062 (2017).

### 4.2.5.3 Componentes das ligações

Conforme visto acima, as ligações são formadas por componentes especificados em detrimento dos esforços solicitantes e do sistema estrutural escolhido. Alguns elementos estão presentes regularmente em projetos estruturais de pré-fabricados, como juntas de argamassa, aparelhos de apoio de elastômero, chumbadores, consoles de concreto e metálicos, dentes de concreto e metálicos. A seguir serão explanados alguns deles, com base em El Debs (2000).

#### a) Juntas de argamassa

As argamassas são utilizadas no intuito de contribuírem para o nivelamento da superfície e distribuírem as tensões de contato entre elementos. São utilizadas quando há predominância de forças de compressão.

A argamassa a ser inserida pode ser seca, tendo de ser pressionada para preencher o espaço ou pode ser em forma de graute, vertida sobre o local confinado. A espessura da camada de argamassa deve ser a menor possível, inferior a 10% da menor dimensão da seção transversal dos elementos a serem conectados.

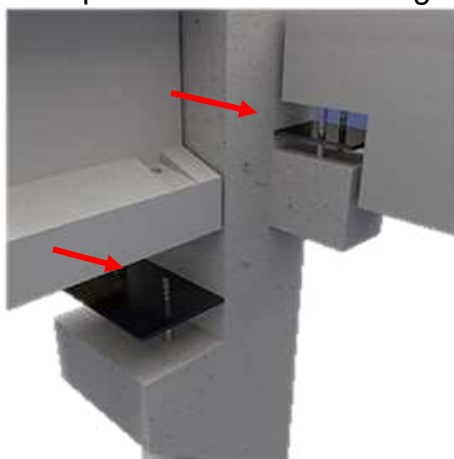
#### b) Aparelhos de apoio em elastômero

Os aparelhos de apoio elastoméricos têm a função de distribuir as tensões de contato nas ligações e permitir movimentos de translação e rotação. São utilizados com frequência os apoios elastoméricos em policloropreno, comumente conhecido por “neoprene”. Para as vigas são adotados apoios com espessura mínima de 10mm.

#### c) Chumbadores e vergalhões

Os chumbadores mecânicos são utilizados em ligações para transferência de forças de tração. Devem ser respeitadas as distâncias mínimas de borda de  $4\varnothing$ . Para os vergalhões, a profundidade de embutimento no concreto deverá ser de  $8\varnothing$  até  $20\varnothing$ .

Figura 31 – Representação de apoio elástico e vergalhão inserido ao console



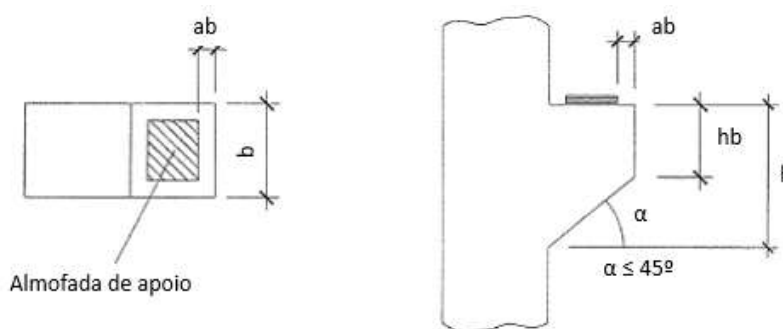
Fonte: TOP TEC, 2023.

d) Consoles de concreto

Os consoles de concreto são elementos em balanço que se projetam dos pilares para servir de apoio às vigas, conforme visto no item 4.2.2. A norma ABNT NBR 9062:2017 estabelece que a altura mínima da face externa do console ( $hb$ ) deve ser superior a metade da altura do console no engastamento:

$$hb \geq \frac{h}{2} - ab$$

Figura 32 – Dimensões mínimas do console curto



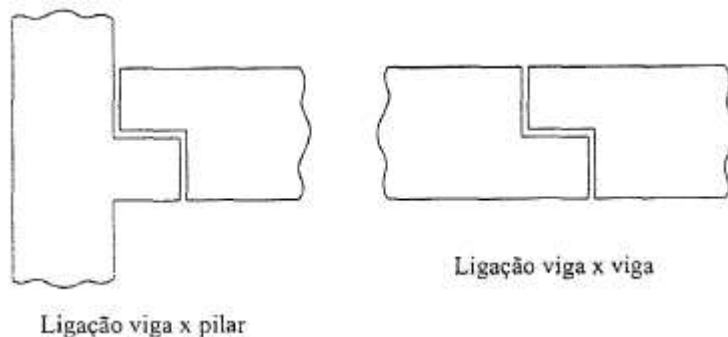
Fonte: EL DEBS (2000).

e) Dentes de concreto / dentes Gerber

Da mesma maneira como os consoles são elementos que se projetam dos pilares para o apoio das vigas, os dentes de concreto denominados dentes Gerber são recortes nas vigas que propiciam a ligação ao console ou a ligação entre vigas.

Estes elementos se caracterizam pelas elevadas tensões de cisalhamento devido à redução da altura da viga no apoio

Figura 33 – Representação de dente Gerber em ligação viga-viga e viga-pilar



Fonte: EL DEBS (2000).

#### 4.2.5.4 Interface pilar-fundação

Segundo Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007), as ligações viga-pilar são as mais consideradas na literatura técnica, visto que determinam o comportamento da estrutura com relação ao seu equilíbrio estático – ora isostática, ora hiperestática. Entretanto, também é importante num caso de edificações de múltiplos pavimentos, a interface entre o pilar e a fundação, neste caso, citam-se dois tipos de situações:

##### a) Pilar engastado à fundação por sistema de cálice

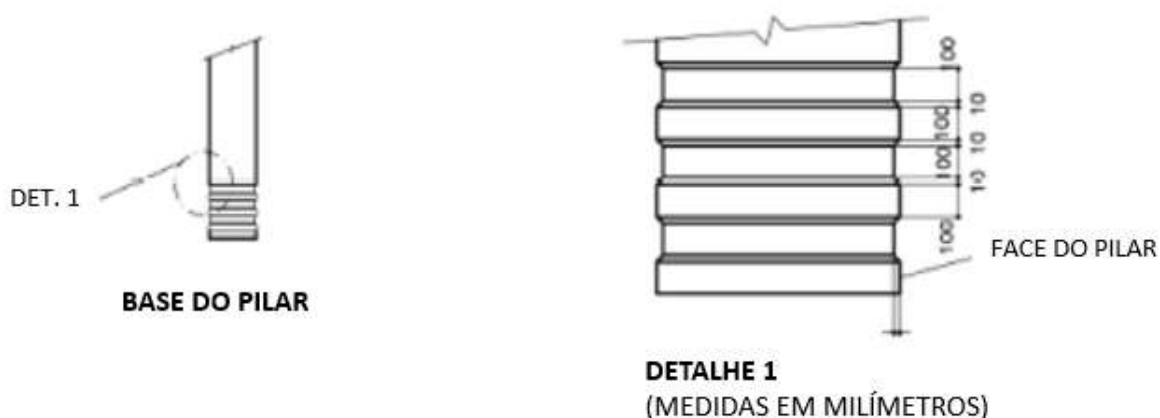
Neste caso, o pilar é encaixado no interior da região superior do bloco, denominada cálice. Os pilares são produzidos com ranhuras (Figura 34) em sua base, que garantem o engastamento na região interna do bloco. Para tanto, os cálices são dimensionados para resistir aos esforços normais, horizontais e momentos transmitidos pelos pilares. Esta interação entre o pilar e a fundação é considerada para todos os efeitos como um engaste perfeito.

A superfície do interior do cálice pode ter face lisa, rugosa ou com chaves de cisalhamento - Figura 35, da mesma maneira, a base do pilar deverá possuir ranhuras na base para melhoria da aderência – vide Figura 34. A espessura do colarinho do cálice e da fundação abaixo do pilar após assentado não podem ser inferior a 15cm e 20cm, respectivamente.

Algumas restrições ao tipo de face são feitas no item 7.7.2 a 7.7.4 da ABNT NBR 9062 (2017), a depender do comprimento de embutimento do pilar.

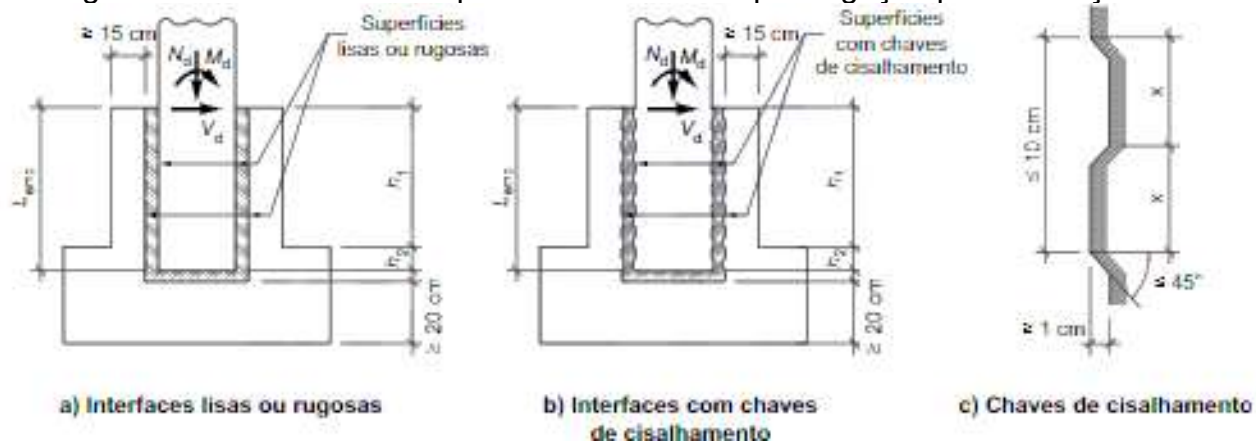
Posteriormente à inserção do pilar, o espaço vazio entre o pilar e o cálice é preenchido com concreto ou graute, com no mínimo a mesma característica do concreto do bloco, sendo que o agregado a ser previsto deve permitir a vibração e concretagem adequadas da região (ABNT NBR 9062, 2017).

Figura 34 – Exemplo de ranhuras na base do pilar.



Fonte: MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS *et al.* (2007)

Figura 35 – Detalhes das superfícies dos cálices para ligação pilar-fundação



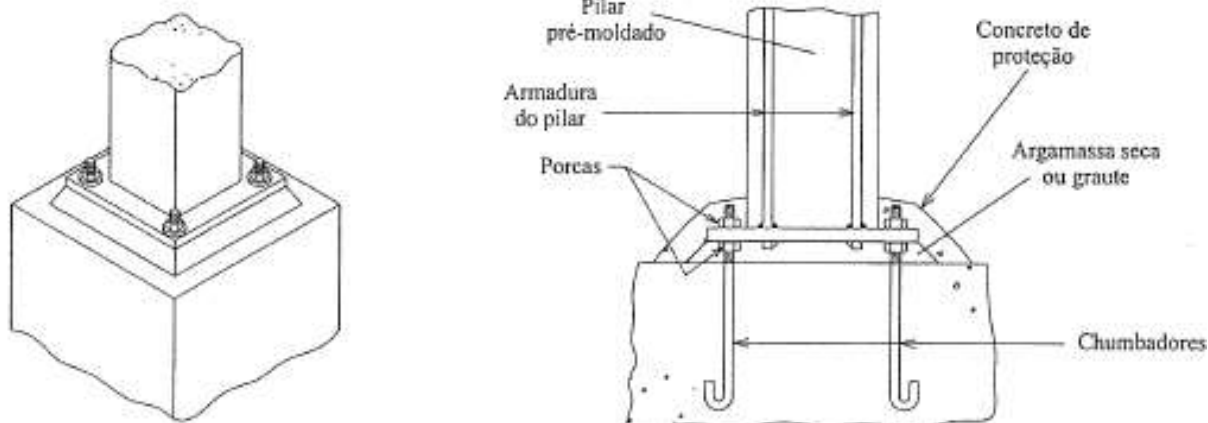
Fonte: ABNT NBR 9062 (2017).

#### b) Pilar ligado à fundação por meio de chapa de base

Neste tipo de sistema, a ligação é feita por meio de uma chapa de base conectada à armadura principal do pilar e conectada à fundação através de chumbadores, porcas e argamassa de enchimento ou graute para assentamento.

Sobre a chapa de base é realizada uma cobertura de concreto para proteção, como mostra a Figura 36 abaixo.

Figura 36 – Representação de ligação pilar – fundação através de chapa de base

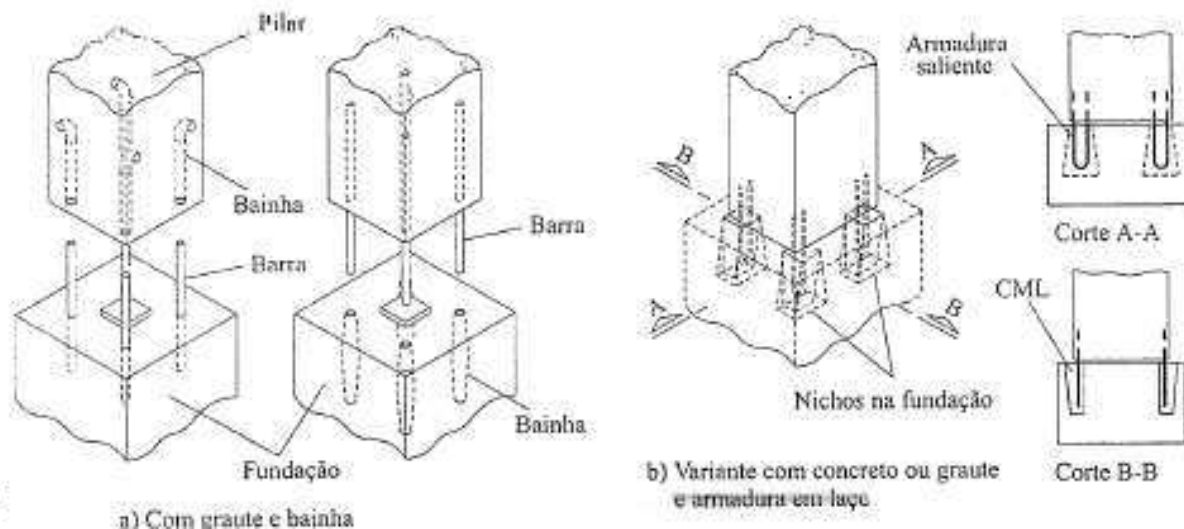


Fonte: EL DEBS (2000).

c) Pilar ligado à fundação por meio de armadura saliente e bainha

Neste tipo de sistema, é prevista uma armadura saliente / de espera no pilar ou na fundação que se projeta para fora. Durante a montagem, a armadura é inserida à uma bainha prevista no elemento adjacente e o nicho entre os elementos é preenchido com graute, conforme a Figura 37. Esta ligação se caracteriza pela capacidade de resistência ao momento fletor e transformação dos elementos em uma peça praticamente monolítica. A desvantagem, entretanto, é a complexidade durante a execução, sendo possíveis desvios de posicionamento entre a armadura e a bainha e necessidade de escoramento provisório.

Figura 37 - Representação de ligação pilar – fundação através de bainha



Fonte: EL DEBS (2000).

## 5 PRODUÇÃO DE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO

Neste capítulo serão abordadas algumas etapas da produção de elementos pré-fabricados de concreto em fábrica e instalações com controle de qualidade.

Os procedimentos de execução variam em detrimento do quão industrializada é a fábrica em relação à tecnologia em equipamentos para a produção.

El Debs (2000) cita que a produção dos elementos pré-fabricados envolve três etapas principais:

- A primeira relacionada à preparação das matérias primas (agregados, concreto, armadura de aço);
- A segunda relacionada à execução das sub etapas de produção, como a montagem e preparação de fôrmas, montagem de armaduras e insertos, protensão, moldagem e cura do concreto, desmoldagem e liberação dos elementos das fôrmas;
- A terceira relacionada ao transporte interno no pátio de armazenagem, realização de acabamentos finais e estocagem.

A seguir serão abordados alguns cuidados necessários em cada uma das etapas:

### 5.1 Etapa de fôrmas

De forma geral, segundo El Debs (2000), os processos de produção dos elementos podem seguir os seguintes tipos:

- Execução em fôrma estacionária: quando a fôrma permanece na mesma posição até a desmoldagem da peça;
- Execução em fôrma móvel: quando a fôrma é movimentada segundo as etapas de execução;
- Execução em pista de concretagem: quando os elementos são produzidos sequencialmente, sobretudo quando utilizada a protensão.

É crucial que durante a fabricação dos elementos as tolerâncias previstas na norma (Quadro 2) sejam rigorosamente observadas.

As fábricas utilizam principalmente as fôrmas de aço, com a vantagem de propiciarem melhor acabamento final das peças, serem mais duráveis e com dimensões mais precisas. Entretanto, a norma ABNT NBR 9062:2017 também permite que sejam constituídas de alumínio, concreto ou madeira, revestidas ou não de chapas metálicas, fibras, plástico ou outros materiais.

Quadro 2 – Tolerâncias de produção de elementos pré-fabricados de concreto

Grupo de elementos pré-moldados	Seção ou dimensão		Tolerância
Pilares, vigas, pórticos e elementos lineares	Comprimento	$L \leq 5 \text{ m}$	$\pm 10 \text{ mm}$
		$5 \text{ m} < L \leq 10 \text{ m}$	$\pm 15 \text{ mm}$
		$L > 10 \text{ m}$	$\pm 20 \text{ mm}$
	Seção transversal		$- 5 \text{ mm e } + 10 \text{ mm}$
	Distorção		$\pm 5 \text{ mm}$
Linearidade		$\pm L/1\ 000$	
Painéis, lajes, escadas e elementos em placa	Comprimento	$L \leq 5 \text{ m}$	$\pm 10 \text{ mm}$
		$5 \text{ m} < L \leq 10 \text{ m}$	$\pm 15 \text{ mm}$
		$L > 10 \text{ m}$	$\pm 20 \text{ mm}$
	Espessura		$- 5 \text{ mm, } + 10 \text{ mm}$
	Planicidade	$L \leq 5 \text{ m}$	$\pm 3 \text{ mm}$
		$L > 5 \text{ m}$	$\pm L/1\ 000$
	Distorção	Largura ou altura $\leq 1 \text{ m}$	$\pm 3 \text{ mm cada } 30 \text{ cm}$
Largura ou altura $> 1 \text{ m}$		$\pm 10 \text{ mm}$	
Linearidade		$\pm L/1\ 000$	
Telhas e/ou elementos delgados	Comprimento	$L \leq 5 \text{ m}$	$\pm 10 \text{ mm}$
		$5 \text{ m} < L \leq 10 \text{ m}$	$\pm 15 \text{ mm}$
		$L > 10 \text{ m}$	$\pm 20 \text{ mm}$
	Espessura	$e \leq 50 \text{ mm}$	$- 1 \text{ mm e } + 5 \text{ mm}$
		$e > 50 \text{ mm}$	$- 3 \text{ mm e } + 5 \text{ mm}$
Distorção		$\pm 5 \text{ mm}$	
Linearidade		$\pm L/1\ 000$	
Estacas	Comprimento		$\pm L/300$
	Seção transversal (ou diâmetro)		$\pm 5 \%$
	Espessura da parede para seções vazadas		$+13 / - 6 \text{ mm}$
	Linearidade		$\pm L/1\ 000$
onde $L$ é o comprimento do elemento pré-moldado.			

Fonte: ABNT NBR 9062 (2017).

Com relação à qualidade da fôrma antes da concretagem e da peça após a concretagem, é ideal que sua superfície interna esteja limpa e seja estanque para impedir fugas de argamassa e nata de cimento. Além disso, El Debs (2000) também cita que os cantos vivos e bordas com ângulos agudos devem ser evitados, já que são suscetíveis a danos durante o manuseio e transporte dos elementos.

Quando da desfôrma das peças, o uso de desmoldantes para facilitação do processo é permitido, mas conforme alerta Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007), em fôrmas metálicas os desmoldantes a base de água não devem ser aplicados. Devido ao risco de oxidação, recomenda-se desmoldantes à base de óleo.

## **5.2 Etapa de dosagem**

A dosagem é a etapa crucial de todo o processo pois determina a principal vantagem oferecida pelo processo de produção industrializado. Nesta etapa, as especificações dos agregados e aglomerantes quando atendidas determinam as propriedades do concreto, como trabalhabilidade, durabilidade, viscosidade, plasticidade, fluidez, dentre outras.

Quanto ao preparo do concreto, aplicam-se as exigências na ABNT NBR 7212<sup>4</sup>, o concreto é dosado em central, não sendo permitido o amassamento manual do concreto.

Alguns cuidados básicos durante a dosagem são recomendados por Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007), e propiciam homogeneidade nos elementos, como o de se utilizar na mesma obra sempre cimentos da mesma marca e tipo e agregados da mesma procedência.

Em relação ao concreto utilizado, ABCIC (2012, p.97) cita que o desenvolvimento do concreto de alto desempenho (CAD) e do concreto auto adensável (CAA) foram aprimoramentos que contribuíram para o aumento da durabilidade e resistência mecânica dos concretos endurecidos, além da melhor trabalhabilidade do concreto fresco. Caracterizam-se como:

---

<sup>4</sup> ABNT NBR 7212:2021 – Concreto dosado em central – Preparo, fornecimento e controle

a) Concreto de alto desempenho (CAD):

Evolução tecnológica do concreto tradicional à qual são incorporados aditivos químicos e adições minerais e são reduzidos os agregados em volume e massa. Muito embora o custo do concreto de alto desempenho seja superior ao concreto convencional, as vantagens obtidas são várias e compensam os custos, como:

- Aumento de resistência mecânica;
- Elevada durabilidade / vida útil, sendo que, conforme comenta Paulo Helene em ABCIC (2012, p.97) “enquanto uma estrutura de pilares de concreto de 40 Mpa pode ter vida útil de projeto prevista para 60 a 100 anos, a mesma estrutura com concreto com fck de 80Mpa pode ter vida útil prevista superior a 350 anos”;
- Maior sustentabilidade já que se utiliza menor quantidade de agregado e menor consumo de água e aço, portanto menor volume de concreto;
- Redução das seções dos elementos estruturais implicando no aumento dos vãos livres nas edificações.

b) Concreto auto adensável (CAA):

Concreto no qual se aplicam as seguintes propriedades, conforme EFNARC (2001, *apud* Munte Construções Industrializadas *et al.* (2007):

- *Filling ability*: capacidade de preencher todos os espaços no interior da fôrma;
- *Passing ability*: capacidade de passar através de pequenas aberturas, como espaçamento entre barras de aço;
- *Segregation resistance*: capacidade de permanecer coesa e uniforme durante o processo de lançamento e transporte.

A aplicação do concreto auto adensável é vantajosa já que (ABCIC, 2012):

- Redução da mão de obra durante a concretagem já que dispensa vibração e desgasta menos fôrmas, assim é mais sustentável já que consome menos energia;

- Produção de peças melhor acabadas já que reduz consideravelmente ou até elimina a necessidade de retoques de superfície e reduz os ninhos de concretagem;
- Possibilita o uso de agregados reciclados e adições como sílica e metacaulim que inibem a reação álcali-agregado.

### **5.3 Etapa de armação / protensão**

No detalhamento e disposições construtivas das armaduras aplica-se o disposto na ABNT NBR 6118<sup>5</sup>. De acordo com o dimensionamento das peças, podem ser utilizadas ou não armaduras protendidas.

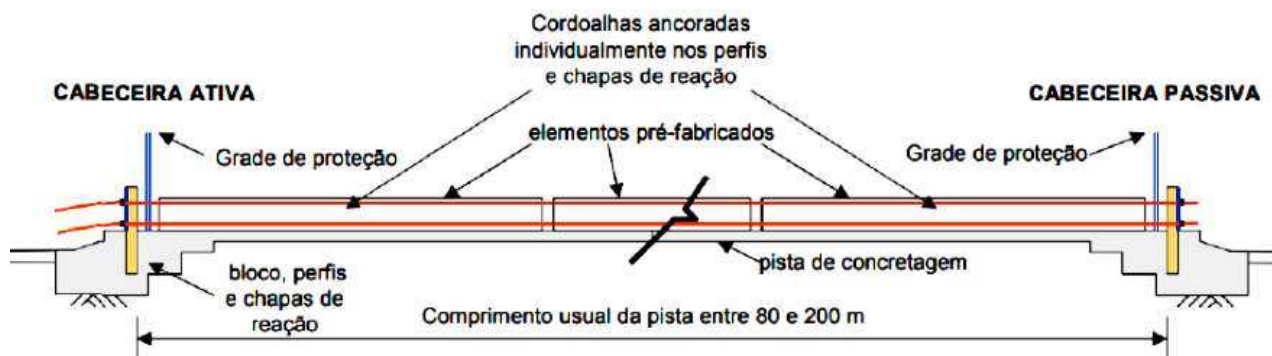
Quando utilizadas armaduras não protendidas, também denominadas por armaduras passivas ou “armaduras frouxas”, a armadura não é submetida a tensões iniciais para produzir forças de protensão. Neste caso, a execução de armaduras não protendidas nos elementos pré-fabricados segue a mesma metodologia das estruturas de concreto moldado no local, entretanto, a produção em série possibilita facilidades de execução devido á maior mecanização da fábrica.

Quando utilizadas armaduras protendidas, também denominadas por armaduras ativas, El Debs (2000) comenta que para os elementos pré-fabricados de concreto via de regra é adotada a pré-tração da armadura, isto é, o pré-alongamento da armadura é feito utilizando-se apoios independentes do elemento estrutural, antes do lançamento do concreto, sendo os apoios desfeitos após o endurecimento do concreto, de modo que a ancoragem se dá por aderência. Neste caso, a execução da armação protendida é realizada em pistas de proteção com comprimento de 60 a 200 metros que permitem a execução sucessiva de vários elementos, como ilustra a Figura 38.

---

<sup>5</sup> ABNT NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto

Figura 38 – Representação de uma pista de protensão



Fonte: ROSAS, 2018.

A respeito do cobrimento das armaduras, a NBR 9062:2017 especifica que para concretos com resistência à compressão  $f_{ck} \geq 40$  Mpa os comprimentos nominais mínimos devem ser de:

- 15mm para lajes em concreto armado;
- 20mm para lajes alveolares protendidas e para demais peças em concreto armado (vigas / pilares);
- 25mm para peças em concreto protendido (vigas / pilares).

#### 5.4 Etapas de concretagem, adensamento e cura

Após as etapas anteriores de fôrma, armação, colocação de inserts e elementos de içamento, é realizado o lançamento de concreto sobre as fôrmas.

Durante ou imediatamente após o lançamento do concreto, este deve ser adensado por vibração (interna ou externa), centrifugação ou prensagem, de forma que preencha todo o espaço da fôrma, sem ninhos de concretagem ou segregação de materiais.

Alguns cuidados devem ser tomados durante o adensamento, conforme a NBR 9062:2017:

- Quando utilizados vibradores de imersão (tipo agulha), deve-se evitar o contato do vibrador com a armadura para que não haja prejuízo da aderência aço/concreto;

- Quando utilizados vibradores de fôrma externos, estes devem ser dispostos em quantidades e distâncias entre si que garantam o adensamento uniforme do concreto;
- Quando utilizado concreto auto adensável, é dispensada a utilização de vibração, desde que seja garantido o preenchimento de toda a fôrma e a inexistência de ninhos de concretagem.

Após realizado o adensamento do concreto, a próxima etapa é a cura do material. Quanto mais rápida a cura se dá, mais rapidamente a fôrma é liberada para produção de outras peças. A cura pode se dar de duas formas: cura normal e cura acelerada, assim definidos conforme a NBR 9062 (2017):

a) Cura normal:

Enquanto é aguardado o tempo necessário para o endurecimento satisfatório do concreto, este é protegido contra variação brusca de temperatura, secagem, chuva forte, agentes químicos e choques e vibrações que possam produzir fissuração da argamassa. Para proteger contra a secagem prematura do concreto, podem ser utilizados os seguintes métodos:

- Cura por aspersão: as superfícies expostas são mantidas úmidas;
- Cura por imersão: a peça é submergida em tanques de água;
- Cura com película impermeabilizante: a peça é envolta em película que impede a exsudação.

b) Cura acelerada:

O endurecimento do concreto é antecipado através de tratamento térmico (cura térmica) no qual o concreto é submetido por aumento controlado de temperatura, acelerando as reações químicas entre o cimento e a água. Este processo não dispensa os métodos de hidratação do concreto.

El Debs (2000) comenta que há também aditivos capazes de acelerar o endurecimento do concreto, mas na prática têm uso limitado.

Seja qual for o método da cura, especial atenção deve ser dada à formação de fissuras na superfície do concreto em detrimento da retração.

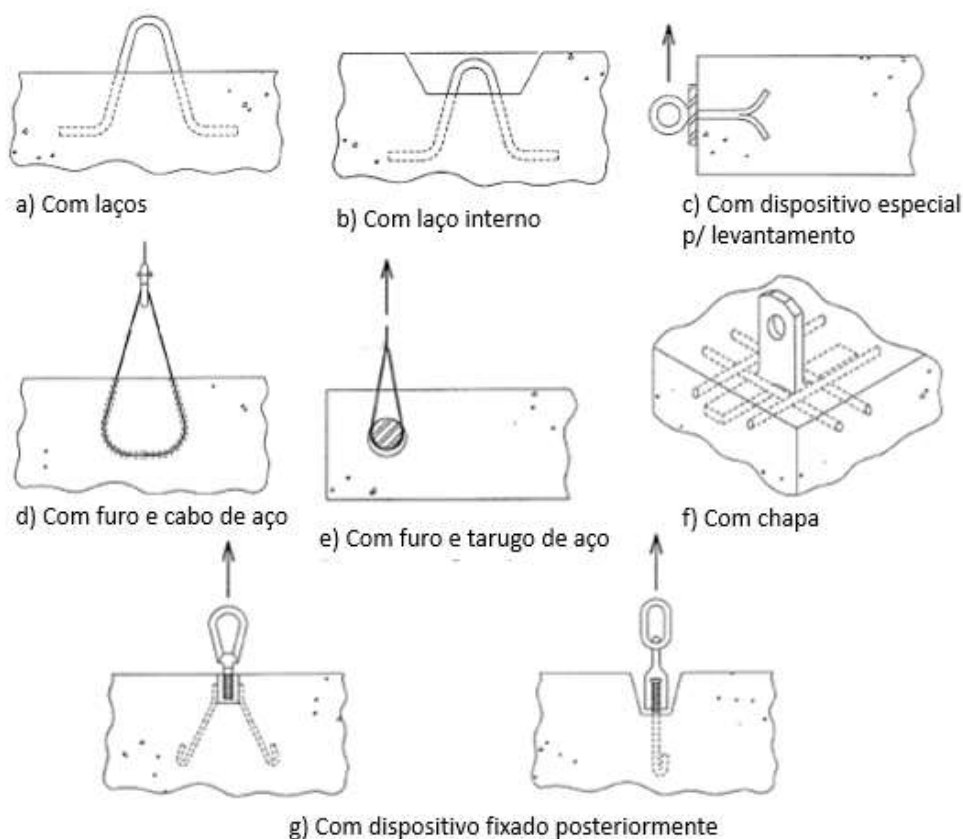
## 5.5 Etapas de desmoldagem, transporte interno e armazenamento

Após a cura da peça é realizada a desmoldagem da fôrma, sendo normalmente realizada por meios mecânicos como os dispositivos de içamento.

El Debs (2000) explica que para que a desmoldagem seja feita, deverá ter ocorrido ganho de resistência do concreto, a qual depende das solicitações as quais o elemento será submetido em seguida. Na prática, sugere-se que a resistência do concreto seja de pelo menos a metade da resistência de projeto, mas nunca inferior a 10 Mpa. Isto porque quando a desmoldagem é feita com peça a baixa resistência, podem ocorrer falhas como quebras de cantos e bordas, deformações excessivas e perda de resistência por fissuração prematura.

O manuseio das peças após desmoldagem é realizado com equipamentos como pontes rolantes, carrinhos de rolamento e monotrilhos, através dos dispositivos auxiliares internos ou externos, como os exemplificados na Figura 39 a seguir.

Figura 39 – Representação de alguns dispositivos de içamento



Fonte: Adaptado de EL DEBS, 2000.

O armazenamento das peças consiste na retirada dos elementos da área de produção / fabricação e armazenagem em local apropriado do qual será posteriormente carregado e transportado ao local de utilização.

Cuidados especiais devem ser tomados durante o armazenamento dos elementos, como definido pela NBR 9062:2017:

- As peças não devem ser dispostas diretamente sobre o solo, devem ser empregados dispositivos de apoio, assentes sobre terreno plano e firme;
- Os elementos podem ser empilhados, desde que intercalados com dispositivos de apoio para que não haja o contato direto entre elementos superpostos;
- É recomendável que não sejam utilizadas mais que duas linhas de apoio (EL DEBS, 2000);
- Deve ser observada a possibilidade de deformações excessivas devido à pouca idade do concreto, estofamentos devido à variação de temperatura e retração.

## 6 ESTUDO DE CASO

### 6.1 Introdução

Para apresentar um exemplo prático das teorias e conceitos discutidos ao longo dos capítulos anteriores, o objeto do presente estudo de caso é a construção de uma edificação de múltiplos pavimentos em estrutura de concreto pré-fabricada. A seguir será descrito o projeto da edificação, bem como as técnicas adotadas durante as etapas de projetos arquitetônico e estrutural, fabricação, transporte e montagem. A análise desse projeto específico visa contribuir para uma compreensão mais profunda da eficiência e outros benefícios que a estrutura pré-fabricada pode oferecer no cenário da construção contemporânea.

### 6.2 Projeto arquitetônico

O objeto de estudo de caso trata-se de uma edificação de quatro pavimentos construída com elementos da superestrutura pré-fabricados: pilares, vigas, lajes e escadas. A edificação serve ao uso educacional, sendo constituída de quatro salas de aula por pavimento, com módulo central de banheiros, sala técnica e de apoio, corredores, hall e vão aberto para elevador. No perímetro da estrutura, a edificação possui área construída total de 1582m<sup>2</sup> e possui altura total de 16,48m. Os pavimentos são típicos, isto é, se repetem do primeiro ao último pavimento, diferenciando-se somente a laje de cobertura, como mostram as Figura 40, 41 e 42, a seguir.

Figura 40 – Perspectivas das fachadas da edificação

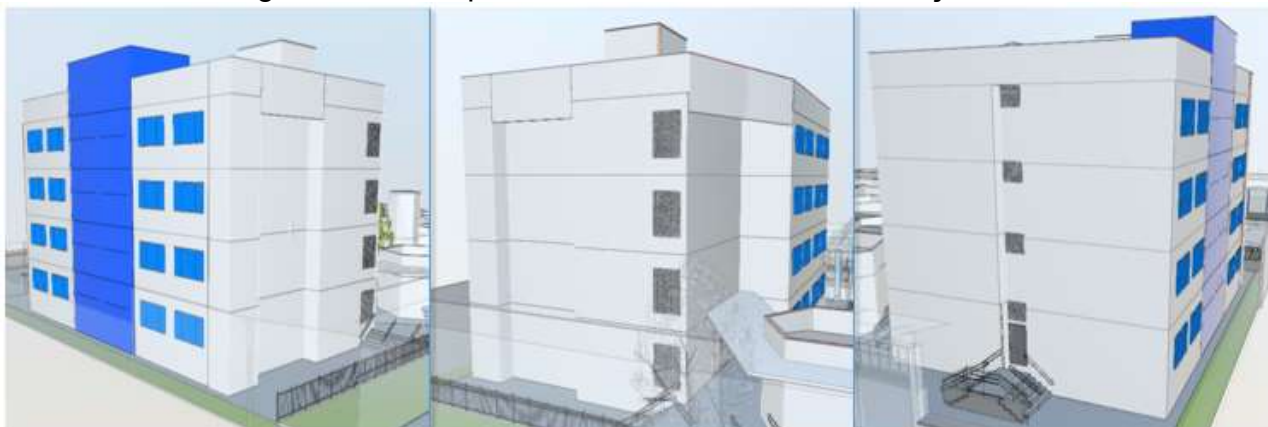


Figura 41 – Planta baixa do pavimento típico

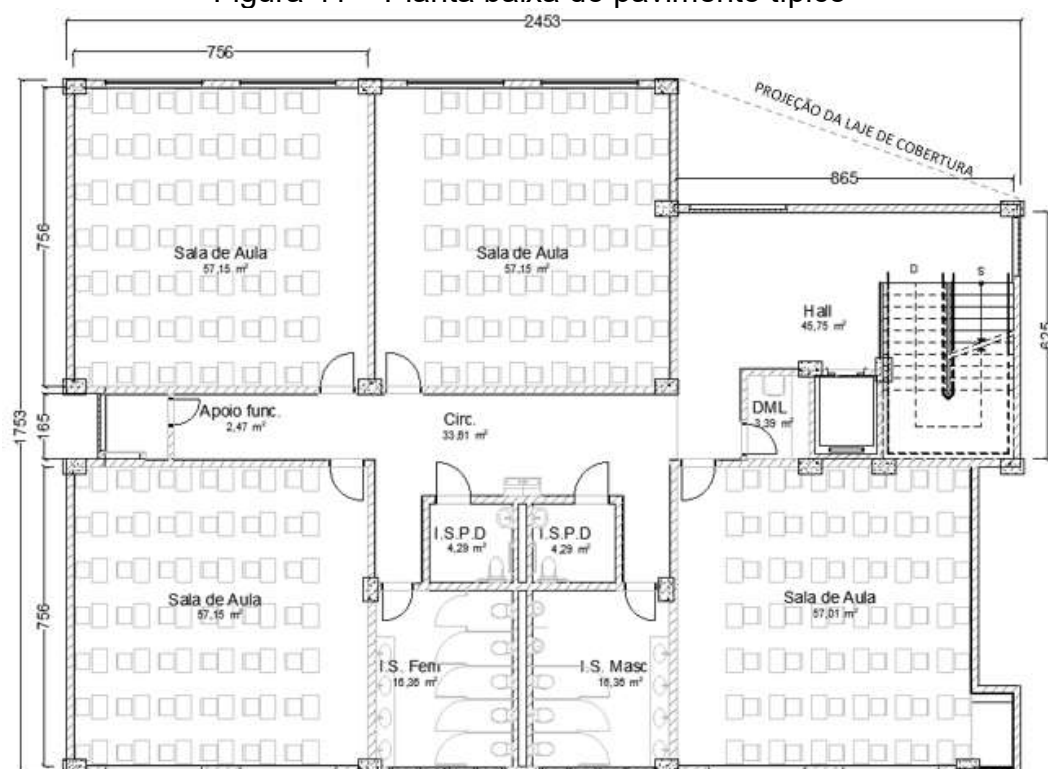
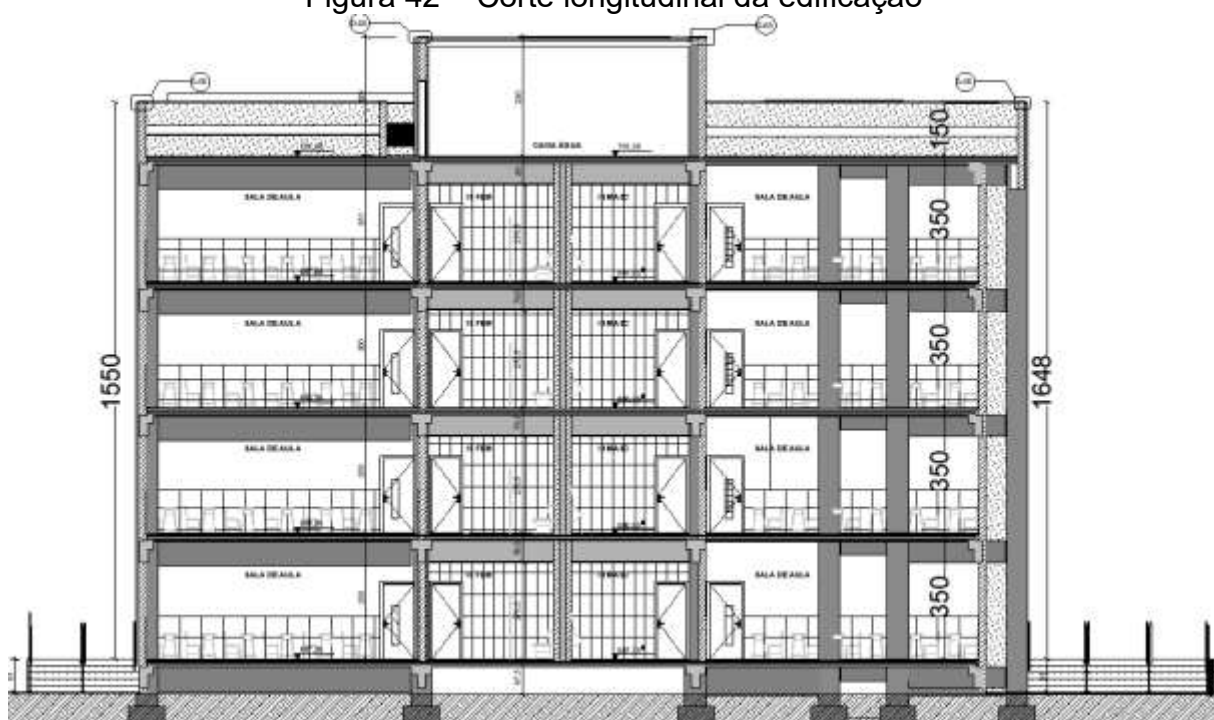


Figura 42 – Corte longitudinal da edificação



O projeto arquitetônico foi elaborado já considerando a construção em estrutura de concreto pré-fabricada com o objetivo de redução do prazo de obra e liberação mais rápida ao uso. O layout dos pavimentos é típico, sendo as linhas de

pilares dispostas quase simetricamente e os ambientes com o mesmo vão, favorecendo assim a aplicabilidade do projeto pré-fabricado.

A edificação foi locada em uma área no qual antes existia uma quadra poliesportiva descoberta - Figura 43. Uma vez que se previu uma edificação com o seu pavimento térreo nivelado com o piso externo da edificação existente e com o mesmo pé-direito interno entre pavimentos, as vigas baldrame foram executadas aéreas, sobre os cálices de fundação, conforme mostra o corte da edificação, na

Figura 42. A execução da primeira laje elevada em relação ao piso existente foi uma definição de projeto arquitetônico, a qual possui vantagens e desvantagens associadas, como por exemplo:

Quadro 3 – Vigas e primeira laje aéreas – vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eliminação das etapas de demolição de concreto de trechos do piso existente, escavação, fôrmas e armação de vigas baldrame moldadas in loco, bem como impermeabilização das mesmas;</li> <li>▪ Diminuição do volume de escavação;</li> <li>▪ Ganho em prazo de obra pela eliminação de etapas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maior custo associado já que o pavimento térreo inteiro foi em laje alveolar;</li> <li>▪ Custo maior para a primeira laje e viga baldrame pré-fabricados;</li> <li>▪ Necessidade de fechamento do vão entre a face inferior da viga “suspensa” e o solo.</li> </ul>

No projeto arquitetônico foram previstos três detalhes importantes nas lajes, a saber:

- O nível das lajes dos banheiros que são rebaixadas 20cm para o embutimento das caixas de esgoto, dispensando recortes ou quebra de trechos das lajes.
- No último pavimento (4º nível), a circulação entre salas de aula previu vão livre (sem laje), para melhoria da iluminação (zenital) e circulação de ar naturais;
- Projetou-se um detalhe arquitetônico na laje de cobertura, conectando os dois vértices entre os pilares entre as fachadas frontal e lateral direita da edificação (Figura 41 e Figura 44).

Figura 43 – Localização da edificação



Para o sistema de fechamento das fachadas, o projeto considerou alvenaria de vedação em tijolo cerâmico. Especial atenção deve ser dada ao travamento da alvenaria junto aos pilares pré-fabricados, conforme será explanado no item 6.7.

Quanto às aberturas de janelas, definiu-se as esquadrias das janelas das salas de aula com vão até a viga pré-fabricada, eliminando a necessidade de construção de vergas. Sobre as janelas na face externa considerou-se a instalação de brises horizontais com inclinação de 45°, para diminuição da incidência solar direta.

Quanto à cobertura, para redução do peso próprio e redução de custo comparado às coberturas em concreto pré-fabricado, foi considerada estrutura metálica para o engradamento e telhamento em telhas de aço galvanizado. A cobertura apoiada sobre a última laje com fechamento da platibanda em alvenaria de vedação, em todo o perímetro do prédio.

### 6.3 Projeto estrutural

O projeto estrutural da edificação considerou as fundações moldadas in loco (com exceção da viga baldrame) e os elementos da superestrutura pré-fabricados

armados e/ou protendidos, como será visto adiante. As figuras 44 e 45 apresentam os desenhos obtidos na modelagem espacial.

A modulação básica dos vãos entre eixos de pilares é de 7,56m x 7,75m para as salas de aula, 1,91m x 7,75m na circulação e exceção para a sala de aula situada atrás do elevador, com vão básico de 8,63m x 7,75m. O pé-direito entre lajes é de 3,50m.

Os pilares possuem seção transversal padronizada em 30cm x 60cm e possuem consoles curtos em concreto armado para apoio das vigas (maiores informações a respeito das ligações serão tratadas no item 6.6.4). Foram dimensionados em concreto armado, considerando resistência característica à compressão –  $f_{ck} \geq 50\text{Mpa}$ . No projeto dos pilares também se considerou o embutimento de conectores do sistema de proteção contra descargas atmosféricas – SPDA (REBAR) e aterrisers conectados às barras na face externa do pilar, para realização dos ensaios de continuidade elétrica das armaduras, detalhe que será apresentado na Figura 76. São projetados para solidarização à fundação através do embutimento nos cálices dos blocos.

As vigas possuem seção transversal diversa, variando de 15x40cm, 15x70cm, 20x50cm e sendo as dimensões das vigas principais de fachada e travamento mais utilizadas de 20x70cm e 25x70cm. As vigas que recebem as lajes foram projetadas com consoles corridos. Foram dimensionadas em concreto armado e concreto protendido, considerando resistência característica à compressão –  $f_{ck} \geq 50\text{Mpa}$  e utilizando armadura inativa aço CA-50 e armadura ativa aço CP-190RB.

As lajes são do tipo alveolares protendidas, com espessura de 15cm em geral e de 26cm para a laje dos reservatórios de água (Figura 85). Quanto ao comprimento, este varia de 1,43m nos patamares das escadas, 1,61m e 3,83m nas áreas de circulação e 7,46m no restante do pavimento. A paginação das lajes na transversal variou de 0,73m, 0,85m, 1,22m e 1,25m. Quanto à armação foram especificados cabos CP-190RB e aço CA-50. Para a armação do capeamento, definiu-se tela de aço soldada CA-60, tipo Q-138 em geral e tipo Q-196 para a laje do reservatório.

O projeto estrutural compõe-se dos seguintes desenhos:

Projeto de fundação:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Desenho de locação de fundações (estacas / blocos)</li> <li>▪ Detalhamento de fundações – fôrma e armação</li> </ul>
Projeto de lajes alveolares:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Desenho de paginação de lajes</li> <li>▪ Desenhos de fôrma e armação</li> <li>▪ Desenho de capeamento de lajes</li> <li>▪ Desenho de armação complementar (para vãos entre lajes)</li> </ul>
Projeto de vigas e projeto de pilares:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plantas dos pavimentos com posicionamento de vigas e pilares</li> <li>▪ Desenhos de fôrma e armação de vigas</li> <li>▪ Detalhamentos diversos como alças de içamento</li> </ul>

As figuras 44 e 45 a seguir apresentadas são as perspectivas do projeto da estrutura, projetada em tecnologia BIM (*Building Information Modeling*), e a Figura 46 representa a estrutura após montada.

Figura 44 – Perspectiva da estrutura pré-fabricada da edificação – Plano 1

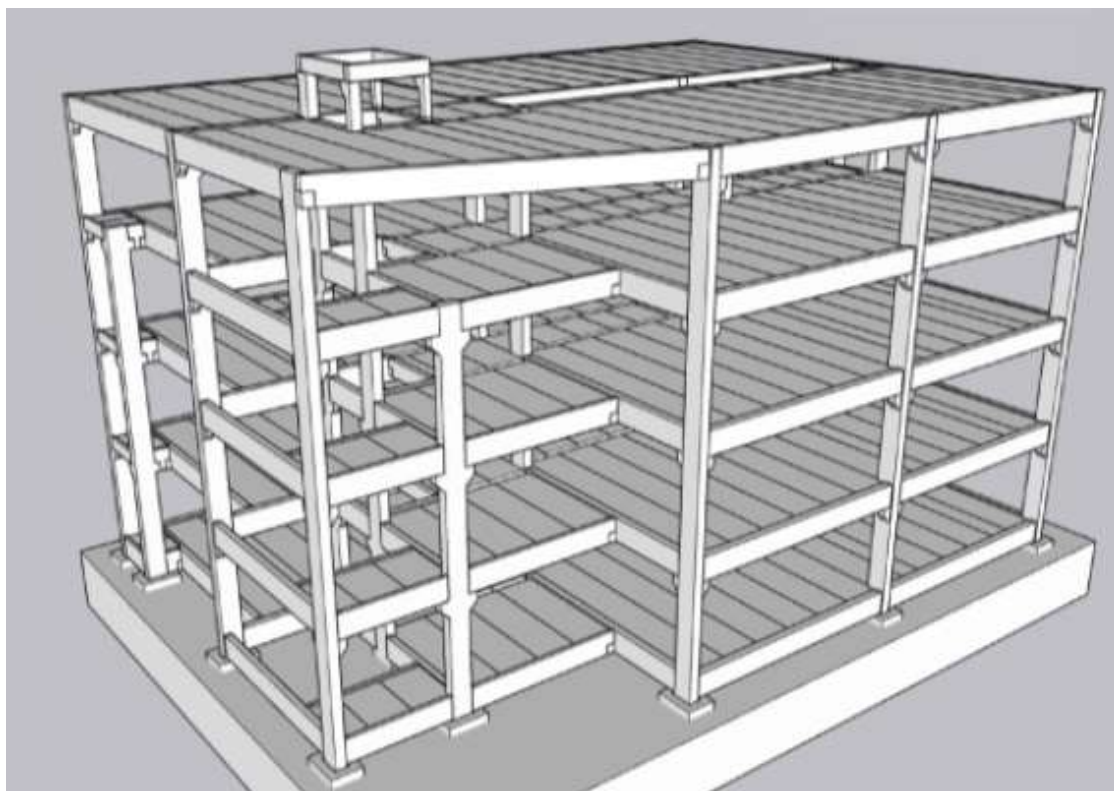


Figura 45 – Perspectiva da estrutura pré-fabricada da edificação – Plano 2

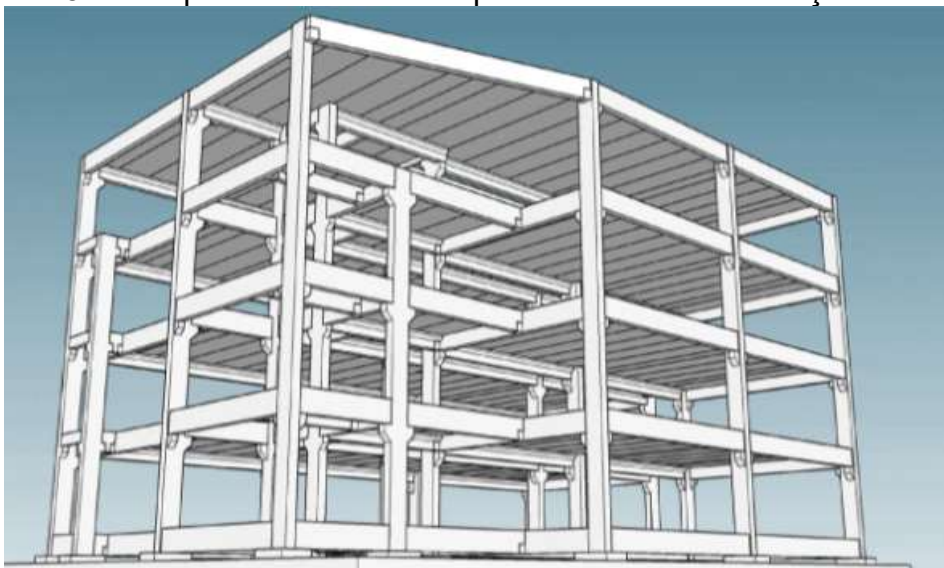


Figura 46 – Estrutura pré-fabricada após a montagem (vistas 1 e 2)





## 6.5 Etapas que precedem a montagem

### 6.5.1 Execução e conferência de fundações

A fundação definida para a edificação constitui-se blocos de fundação estaqueados cada qual com grupo de duas ou três estacas (Figura 52), e as estacas tipo hélice contínua com profundidade variando de 8 a 9 metros e com diâmetros de 40 e 50cm.

Durante a execução da fundação alguns cuidados devem ser tomados para evitar incorreções que possam provocar retrabalhos e incompatibilidade durante a montagem dos pilares, como citado a seguir:

- Devem ser executados gabaritos para locação e nivelamento corretos da fundação. É importante que o ponto de amarração ou ponto de partida topográfico esteja marcado em gabarito para que, após a execução das fundações e dos cálices dos pilares, seja feita a conferência sem desvios;
- Deve ser observado no projeto de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) a descida de barras de aterramento no interior das fundações ou mesmo utilização da própria armadura da fundação para tal e a conexão destas com as descidas nos pilares;
- Devem ser conferidas as cotas de assentamento dos cálices, do pilar no interior do cálice e cota de topo dos cálices com base no projeto e nas cotas de amarração;
- Após a cura do concreto e remoção das fôrmas, o interior do bloco de fundação deverá ser limpo;
- Após certificação dos níveis, deverá ser marcado o nível da mestra e também os eixos nos dois sentidos do bloco, como demonstrado na Figura 48. Este procedimento visa o posicionamento correto de pilares no interior dos cálices com o alinhamento do projeto.

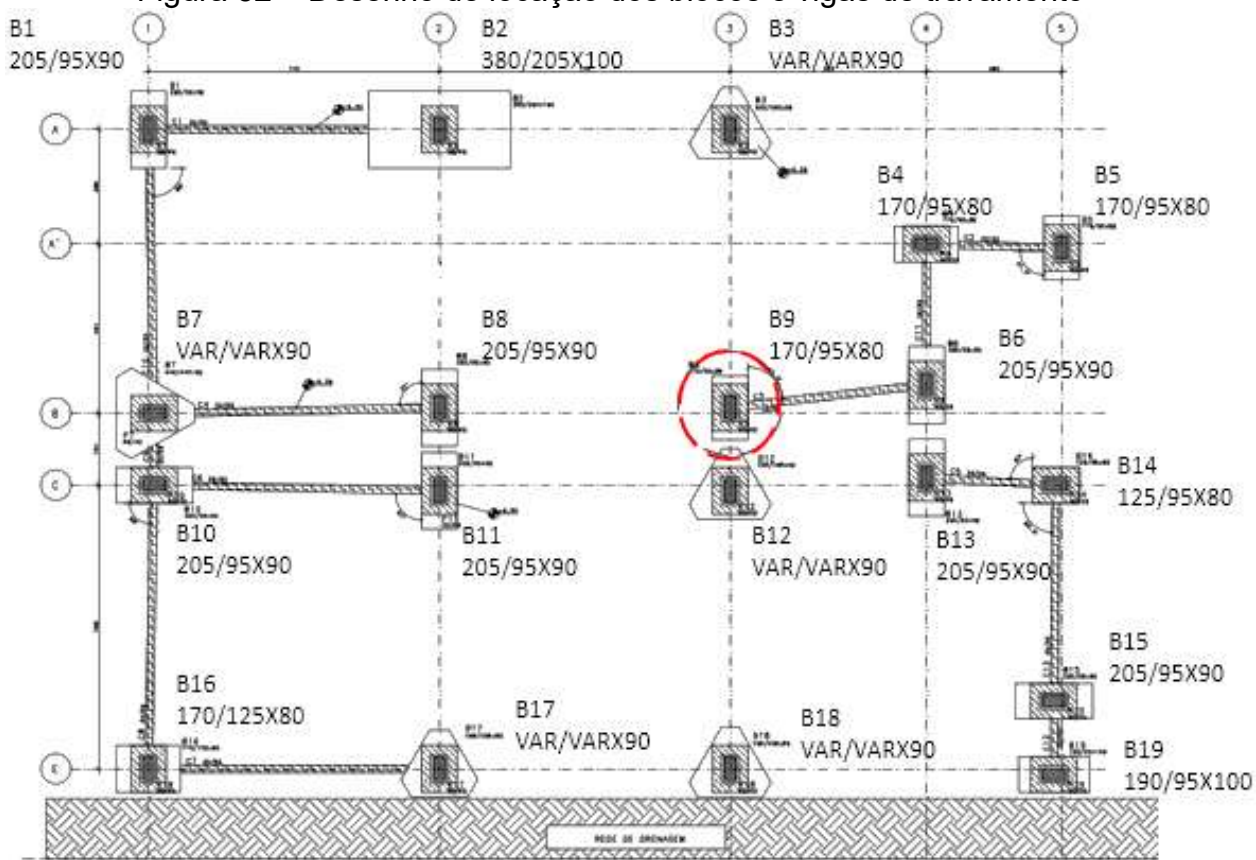


Além disso, falhas no nivelamento da fundação levaram à necessidade de refazimento dos cálices, que tiveram que ser reforçados, como mostra a Figura 51.

Figura 51 – Ajuste do cálice do bloco com refazimento da armação



Figura 52 – Desenho de locação dos blocos e vigas de travamento



### 6.5.2 Inspeção de campo

A inspeção de campo no local da obra é uma etapa crucial anterior à elaboração do planejamento logístico e de montagem. A inspeção visa verificar as condições de acesso nas vias públicas e no interior da obra, horários de funcionamento e existência de horários com restrição de ruído, interferências existentes no pátio que possam impedir ou limitar o trânsito de equipamentos de içamento e veículos de transporte, limitação física do canteiro de obras, dentre outras condições.

Rocha, Livi e Leite (2019) mencionam algumas condições que deverão ser observadas durante a visita técnica, como:

- Os acessos até a obra. Observar se as vias de acesso possuem largura e raio de giro suficiente para o trânsito das carretas;
- Os acessos no interior do canteiro. Observar se é possível delimitar os caminhos de tráfego dentro do canteiro de obras;
- Condições de acesso no interior do canteiro. Deve ser observado se o acesso é nivelado, se está devidamente compactado e firme;
- Existência de tubulações subterrâneas na área de circulação de equipamentos;
- Existência de limitações como árvores ou instalações fixas como postes, torres de transmissão de energia, muros, dentre outros, que possam afetar o plano de içamento;
- Necessidade de paralisação de atividades nas edificações vizinhas durante atividades de içamento;
- Disponibilidade de energia para funcionamento de equipamentos;
- Espaço disponível no pátio para armazenamento de peças.

No caso da obra estudada, foram identificados dois fatores limitadores mas não impeditivos para a realização das atividades de montagem, a saber:

- Espaço limitado para montagem: conforme verificado na Figura 53, o espaço disponível para o trânsito das carretas carregadas com as peças era limitado, entretanto não impossibilitou as atividades;

- Limitações físicas: devido aos cálices dos blocos de fundação se encontrarem acima do nível do piso e devido à existência de valas abertas no piso, foi necessário maior cuidado para o trânsito dos equipamentos no interior do canteiro;
- Existência de casa de gases muito próxima à área de circulação das carretas que teve que ser desativada e realocada para evitar interferências danosas;
- Planejamento de montagem em período chuvoso: a execução dos serviços de montagem iniciou em um mês com alto índice pluviométrico. Durante as fortes chuvas houve encharcamento do solo, que precisou ser britado e compactado para melhoria da condição de suporte;
- Espaço limitado em pátio para armazenamento de peças recebidas: falhas na programação de entrega de cargas levaram à necessidade do armazenamento de grande número de peças em um período da montagem.

Figura 53 – Limitações existentes no campo



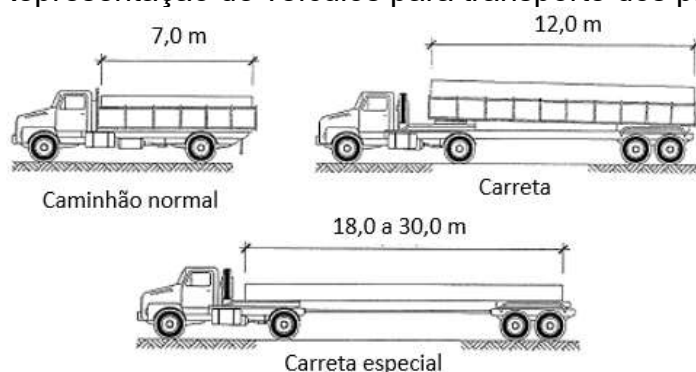
### 6.5.3 Planejamento logístico – transporte e expedição das peças

#### 6.5.3.1 Programação de carregamento

O transporte das peças da fábrica até o local de montagem é uma das etapas críticas da execução de estruturas pré-fabricadas, muito embora muitas vezes negligenciado pelas empresas fabricantes. Antes do carregamento das peças deve ser realizado um planejamento de expedição de peças, coerente com o cronograma de montagem e com o planejamento geral da obra. O envio das peças deve ser feito conforme a programação, de modo que sejam evitados atrasos no cronograma e rejeição de peças, falhas que acabam acarretando em prejuízo financeiro considerável, uma vez que os custos associados à locação de equipamentos e frete são altos.

No Brasil, o transporte das peças pré-fabricadas se dá por via rodoviária, através de caminhões, carretas e carretas especiais, sendo estas últimas empregadas quando os longos comprimentos dos elementos inviabilizam a utilização de veículos de menor porte - Figura 54. Além da limitação pelo comprimento das peças, a carga também é limitada ao peso dos elementos e da distância a percorrer. (EL DEBS, 2000).

Figura 54 – Representação de veículos para transporte dos pré-fabricados



Fonte: EL DEBS (2000).

Quando da definição da empresa fabricante das peças é importante analisar a distância da fábrica até o local de execução da obra: se localizada em centros urbanos próximos às vias de trânsito principais ou não e a condição das estradas que conduzem ao empreendimento.

Tomando-se como exemplo a obra do presente estudo de caso, com relação à localização do empreendimento, este situa-se em Minas Gerais, em centro urbano, próximo de rodovias interestaduais e rodovias urbanas. Já com relação ao local de produção das peças, estas foram fabricadas por duas empresas distintas: as lajes alveolares foram fabricadas no estado de São Paulo à distância de 552 km do local da obra; os pilares, vigas e escadas foram fabricados no estado de Minas Gerais, à distância de 259 km do local da obra.

A programação de carregamento foi adequada à produtividade de montagem das peças e ao cronograma e obra, sendo constantemente atualizado ao longo da montagem a depender de fatores não previstos como atrasos na obra, ocorrência de incidentes com equipamentos, dentre outros. Por isso, o gestor de produção da fábrica deve estar ciente e acompanhar o cronograma junto à equipe de montagem, realizando o ajuste de cargas. A programação de carregamento deve indicar as peças que serão transportadas, seu peso e comprimento, o peso total da carga (ajustado segundo à carga máxima de transporte por eixo permitida na legislação), o tipo de veículo de transporte e as datas de carregamento e chegada na obra. A Figura 55 a seguir mostra um exemplo de programação realizado para a obra em questão.

Figura 55 – Exemplo de programação de carregamento

Montagem de Peças ( pilares vigas e escadas )							
Peças	Peso	Comprime	Carga	Quantida	Carreta	Data de Carregamento	Data na ot
VLE402	3,690	7,43	14		CARRETA COMUM (não graneleira)	01/02/2023	03/02/2023
VLE401	3,690	7,43				01/02/2023	03/02/2023
VR403	2,480	7,09				01/02/2023	03/02/2023
VTE402	3,080	7,13				01/02/2023	03/02/2023
VLE502	3,690	7,43				01/02/2023	03/02/2023
VLE501	3,690	7,43				01/02/2023	03/02/2023
VR502	2,480	7,09				01/02/2023	03/02/2023
VLE504	3,550	7,13				01/02/2023	03/02/2023
total	26,350						
					carga 3	LAJES ALVEOLARES	06/02/2023
					carga 4	LAJES ALVEOLARES	06/02/2023
					carga 5	LAJES ALVEOLARES	07/02/2023
					carga 6	LAJES ALVEOLARES	07/02/2023

Outro documento importante que deve ser ajustado conforme a programação e antes do carregamento é o romaneio de cargas. Este deve ser elaborado pela empresa fabricante antes do carregamento e deve acompanhar as peças para que,

ao chegarem no local da obra, possam ser descarregadas em ordem o mais condizente possível com a sequência de montagem.

Figura 56 – Exemplo de romaneio de carga de lajes

ROMANEIO DE CARGAS								
Obra: 2586   2586 - ESCOLA						Impressão: Planilha 06/02/21 - 17:14 Usuário		
Endereço:						Motorista: _____		
Carga 5 - Rev.: 2						Placa: _____		
Transportadora: TRANSPORTE						Equipe: _____		
C. COMUM (BICO)T26						Resp. Carga: _____		
Data programação: 06/02/2023						Resp. Expedição: _____		
Obra	Peça	Código	Grupo	Peso Real	Volume	Área	Comprimento	Campos Ad.
2586	LJ-1004	00010411224 58	H15	553	0,230	2,44	2,22	R L = 1,10
2586	LJ-1005	00010411224 62	H15	303	0,125	1,33	2,22	R L = 0,66
2586	LJ-2012	00010411226 51	H15	2112	0,878	9,33	7,46	-
2586	LJ-2012	00010411226 52	H15	2112	0,878	9,33	7,46	-
2586	LJ-2021	00010411226 66	H15	1247	0,513	5,45	7,46	R L = 0,73
2586	LJ-2020	00010411226 64	H15	2103	0,874	9,28	7,46	R P = 2
2586	LJ-1015	00010411225 24	H15	2112	0,878	9,32	7,46	-
2586	LJ-1015	00010411225 25	H15	2112	0,878	9,32	7,46	-
2586	LJ-1015	00010411225 27	H15	2112	0,878	9,32	7,46	-
2586	LJ-1031	00010411225 84	H15	2079	0,864	9,18	7,46	R L = 1,32
2586	LJ-1015	00010411225 26	H15	2112	0,878	9,32	7,46	-
2586	LJ-1032	00010411225 85	H15	2110	0,877	9,31	7,46	R P = 2
2586	LJ-1015	00010411225 29	H15	2112	0,878	9,32	7,46	-
2586	LJ-1015	00010411225 21	H15	2112	0,878	9,32	7,46	-
-	Total: 14	-	-	25,3 t	10,507 m <sup>3</sup>	111,87 m <sup>2</sup>	93,96 m	-

Na obra em questão ocorreram desvios com a programação de carregamento e também erros no lançamento do romaneio, com peças que foram consideradas no mesmo e não foram carregadas e também a situação inversa – peças que foram carregadas e não estavam contempladas no romaneio. Estes desvios levaram a atrasos na montagem de peças já que o espaço limitado do pátio restringiu o descarregamento de peças, tendo sido realizada considerável movimentação de peças que implicaram em retrabalho. É importante que todas as ocorrências que fogem ao planejamento da obra sejam anotadas em diário de obras, para que se tenha o histórico de toda a execução.

Outro detalhe importante a respeito do carregamento das peças é que este deve ser feito o mais precisamente possível quanto à ordem de montagem do dia, atendendo a direção, sequência e planejamento global de montagem (ROCHA, LIVI e LEITE, 2019). As peças a serem carregadas por último serão as primeiras a serem montadas. Esta organização contribui para a melhoria da produtividade durante a

montagem e evita o descarregamento desnecessário de peças, sobretudo quando se trata do içamento das lajes, feito diretamente a partir das carretas.

### 6.5.3.2 Acondicionamento de peças no veículo de transporte

O acondicionamento das peças nas carrocerias das carretas e caminhões deve ser feito com cuidado, para não comprometer sua estabilidade durante o traslado. Alguns cuidados deverão ser tomados, tais como:

- As peças deverão ser dispostas sobre apoios e nunca uma diretamente sobre a outra para evitar o atrito das superfícies e outros danos, da mesma maneira como no armazenamento;
- Devem ser distribuídas de acordo com os eixos do veículo;
- Devem ser amarradas com cinta catraca ou cabo de aço;
- Devem ser contidas lateralmente e, quando excederem o comprimento ou largura da carroceria, deverão ser sinalizadas para evitar acidentes de trânsito. Neste caso deverá também ser avaliada a indicação de escolta por veículo batedor.

Figura 57 – Carreta carregada com lajes da estrutura pré-fabricada.



Quanto à chegada da carreta / caminhão no local da obra, é importante que seja dada atenção ao seu local de parada que deve ser plano e isolado. Deve ser realizado o “patolamento” do guindaste, ou seja, deve ser estabilizado no solo através dos braços de estabilização completamente estendidos apoiados em pranchões / dormentes de madeira nivelados ao solo, conforme indica a

Figura 58. O patolamento do guindaste é importante para que a carga seja transmitida para as patolas, ao invés dos pneus.

Figura 58 – Carreta estabilizada ao solo.



#### 6.5.4 Seleção dos equipamentos de movimentação de cargas

Outra etapa que compõe o planejamento de montagem da estrutura é a definição dos equipamentos que serão utilizados no içamento das peças e no transporte vertical da mão de obra durante a realização dos serviços em altura.

Para os equipamentos de içamento, Rocha, Livi e Leite (2019) comentam que a geometria das peças, peso e posição de alças são fatores que indicam o tipo de equipamento a ser contratado. Também devem ser levados em consideração os seguintes fatores:

- Número de levantamentos a realizar e frequência de operações;
- Espaço disponível e condições topográficas do canteiro;
- Limitações de segurança dos equipamentos;
- Disponibilidade e custo de equipamentos na região da obra.

Segundo El Debs (2000), comumente são utilizados guias de torre (guindaste de torre) e guindastes sobre plataforma móvel podendo ser sobre pneus ou sobre

esteiras e com lança fixa ou lança telescópica. No caso de obras com elementos pré-fabricados leves, pode-se utilizar também caminhões convencionais que possuem guindastes acoplados, já que apresentam baixa capacidade de carga.

Na obra do presente estudo de caso, utilizou-se guindastes sobre pneus com lança telescópica e com capacidade de carga de 70 toneladas, favoráveis pela facilidade de mobilidade e também devido à limitação de espaço físico no pátio determinar a necessidade de um guindaste com maior alcance de lança.

Figura 59 – Operação de içamento de pilar por guindaste sobre rodas



Já com relação aos equipamentos de transporte vertical da mão de obra montadora, deve-se satisfazer os requisitos das normas regulamentadoras NR-35 – Trabalho em altura e NR-18 - Segurança e saúde no trabalho na indústria da construção. A NR 35 define trabalho em altura como a atividade realizada em plano de trabalho acima de 2,00 metros onde haja risco de queda. Assim, para edifícios de múltiplos pavimentos, torna-se necessário a adoção de plataformas de trabalho elevatórias que podem ser estacionárias, auto propelidas, tipo tesoura, articuladas, telescópicas, dentre outras. Os operários deverão ser obrigatoriamente treinados para operação das plataformas, bem como possuir certificado de treinamento presencial em NR-35.

Para a obra estudada, foram adotadas duas plataformas elevatórias articuladas a diesel, sendo que cada uma utilizada por um montador para os serviços de posicionamento das vigas e lajes.

Figura 60 – Modelo de plataforma elevatória utilizada



#### 6.5.5 Plano de rigging

A norma ABNT NBR 9062:2017 define o termo “plano de rigging” quanto ao “projeto técnico das operações necessárias durante a movimentação de cargas com equipamentos de transporte móveis, como guias e guindastes”. Consiste no planejamento das operações de içamento incluindo posições de descarga e montagem das peças, análise das condições do solo, ações de vento e estudo das cargas a serem içadas. O objetivo é a segurança, preservação das vidas, dos equipamentos e das cargas e redução de imprevistos. Conforme ABCIC (2019), no Plano de Rigging, regulamentado pela NR-12 (Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos), algumas informações e cuidados são definidos, como por exemplo:

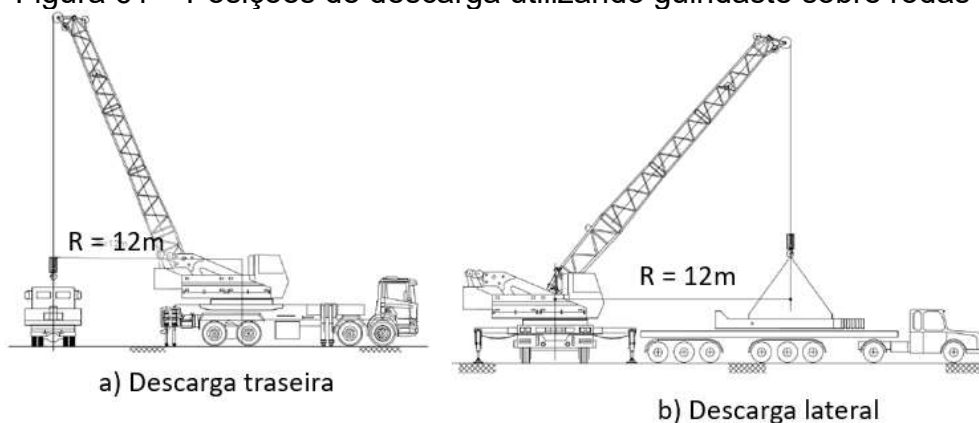
a) Informações:

- Posição e raio de descarga traseira e descarga lateral no içamento das peças, vide Figura 61;
- Posição, raio e comprimento de lança para montagem das peças;
- Especificação das características da carga (dimensões e peso) e dos equipamentos (modelo, capacidade de carga, raio de operação, comprimento da lança, fator de utilização, etc.), altura do içamento;
- Tabela ou gráfico de carga do equipamento – exemplificado na Figura 63.

b) Cuidados na operação:

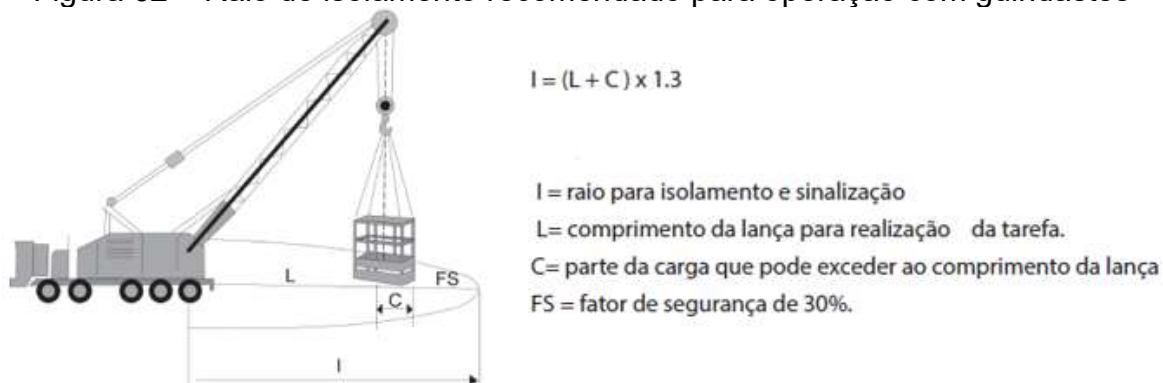
- Tipos e usos de acessórios de içamento e amarração de cargas;
- Sobrecarga adequada do equipamento;
- Planejar operações para o máximo de 80 a 90% da capacidade de carga tabelada do equipamento;
- Patolamento adequado do guindaste;
- Raio de operação para impedir contato com obstáculos como rede elétrica energizada, edificações, dentre outros;
- Amarração e uso dos acessórios de içamento adequados;
- Inspeção de acessórios de amarração como cabos para evitar ruptura dos mesmos;
- Recolhimento de lança na ocorrência de descargas elétricas;
- Proibição de içamento sob condições climáticas de forte vento ou chuva;
- Sinalização da área de manobra e proibição de trânsito no raio de operação do equipamento, quando do içamento de cargas.

Figura 61 – Posições de descarga utilizando guindaste sobre rodas



Fonte: Adaptado de Rocha, Livi e Leite (2019).

Figura 62 – Raio de isolamento recomendado para operação com guindastes



Fonte: Adaptado de Rocha, Livi e Leite (2019).



## **6.6 Montagem da Estrutura pré-fabricada**

### **6.6.1 Preparação dos cálices**

Após todas as etapas que precedem a montagem, é o momento de se colocar em prática o planejamento de montagem.

- 1º. Deve-se primeiramente proceder uma verificação cuidadosa das fundações, incluindo:
- 2º. Conferir o deslocamento de eixos e ângulos entre pilares;
- 3º. Certificar que os blocos possuam a resistência suficiente para a montagem caso tenham sido recentemente executados;
- 4º. Conferir as dimensões dos cálices, espessura do colarinho e nível de fundo (cota de assentamento) de acordo com a referência topográfica;
- 5º. Identificar e marcar todos os pilares a serem engastados nos blocos com marcação permanente;
- 6º. Realizar a limpeza dos cálices;
- 7º. Verificar se a superfície interna do cálice possui a rugosidade projetada para aderência do concreto ou graute;
- 8º. Fazer as marcações que permitam o apoio dos pilares no nível e posição previstos e realizar o grauteamento do espaço livre no entorno do gabarito;
- 9º. Aguardar a cura do concreto / graute para iniciar pela montagem dos pilares.

Na obra em questão, durante a conferência dos cálices foi identificado que o fundo de alguns cálices estavam cerca de 1cm elevados, necessitando a demolição da camada e regularização do fundo. Antes da montagem foi certificado que todos os critérios acima estavam conferidos. Foi executado gabarito de madeira para delimitação da dimensão do pilar na base do cálice. As figuras 64 e 65 abaixo ilustram o processo de checagem e preparação dos cálices antes da montagem dos pilares:

Figura 64 – Marcação das laterais do pilar e no fundo com prumo de centro



Figura 65 – Gabarito de madeira no interior do cálice.



### 6.6.2 Mobilização e conferência de acessórios de içamento

Após a mobilização dos equipamentos de carga, é momento de colocar em prática o Plano de Rigging. Primeiramente, devem ser conferidos os cabos e acessórios de montagem para certificar que estejam em condição adequada à operação.

Para elevação da carga podem ser utilizados cabos de aço, correntes e cintas, sendo os cabos de aço mais comuns.

Figura 66 – Representação de acessórios para içamento de cargas



Fonte: Adaptado de Rocha, Livi e Leite (2019).

De acordo com Rocha, Livi e Leite (2019), os cabos de aço são certificados pelo fabricante que também define as cargas de trabalho em função da classe do material (IPS ou EIPS), tipos de construção, tipo da alma (de aço ou de fibra), bitola, número de pernas e ângulos de trabalho. Os cuidados a seguir devem ser tomados:

- Os comprimentos dos laços dos cabos de aço devem ser suficientes para o fácil engate e deslizamento nos acessórios de conexão (como manilhas ou ganchos);
- Para a distribuição da carga nos cabos deve-se levar em conta a posição do centro de gravidade (CG) da peça e as distâncias relativas de cada cabo em relação ao CG;
- Verificar se o número e distanciamento dos grampos nos cabos está de acordo com a sua bitola;
- Inspeccionar visualmente a integridade dos cabos, devendo-se recusar e solicitar substituição os cabos com fios rompidos, ondulações, "gaiola de passarinho", dobras, nós, corrosão e deformação.

A figura abaixo apresenta alguns indicadores em inspeção visual que indicam a necessidade de substituição do cabo de aço:

Figura 67 – Indicadores para substituição de cabos de aço



Fonte: Adaptado de Rocha, Livi e Leite (2019) e ACRO CABO (2022).

Outras ferramentas comumente utilizadas para elevação das peças pré-fabricadas são os balancins e pinos de içamento.

- **Balancins:** possuem a função de melhorar o posicionamento dos laços de cabos, mantendo-os na posição vertical. Podem ter comprimento fixo ou ajustável à distância entre os cabos de içamento, como verifica-se na Figura 68.

Figura 68 – Indicadores para substituição de cabos de aço



Fonte: Adaptado de Rocha, Livi e Leite (2019).

- **Pinos de içamento:** possuem a função de transferir a carga da peça içada para os cabos de içamento, passados através de furos previamente projetados em pilares e vigas, facilitando a operação de montagem. A Figura 75 ilustra uma operação de içamento de pilar utilizando pino e cabos de aço.

### 6.6.3 Montagem de pilares

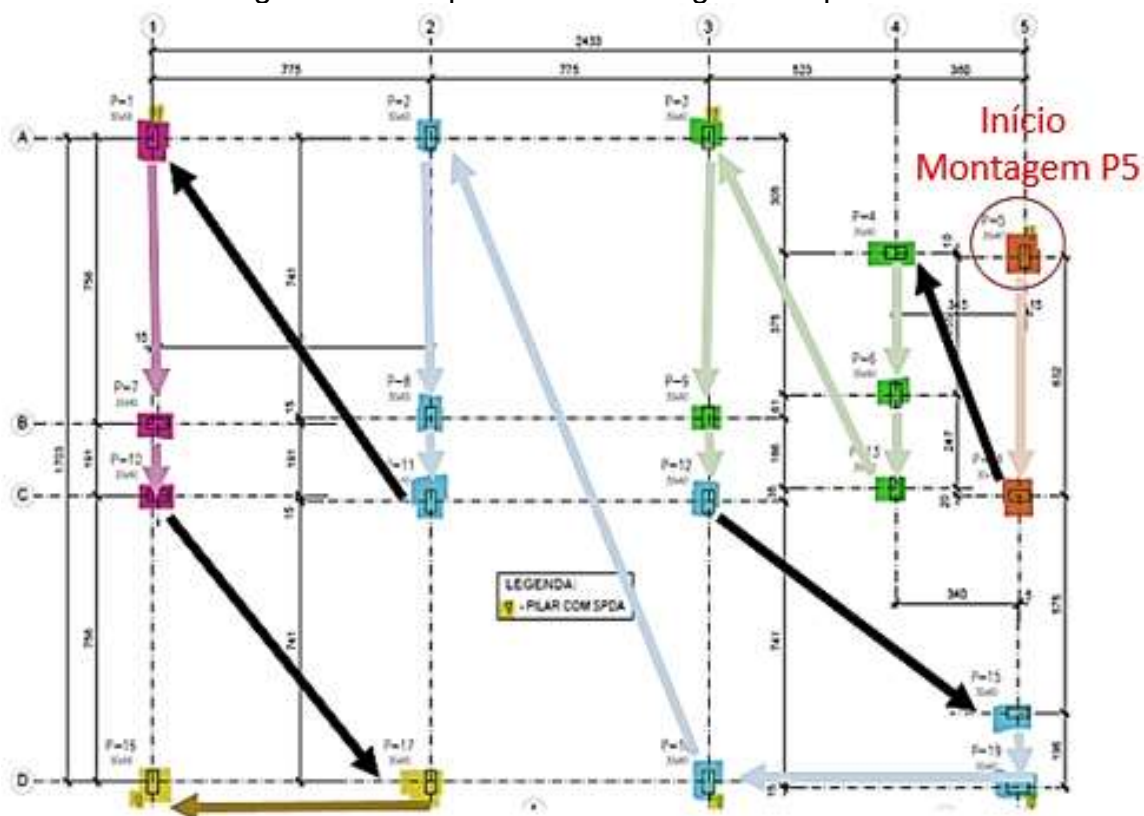
#### 6.6.3.1 Sequência de montagem

A montagem dos elementos pré-fabricados começa pelos pilares, os quais precisam ser montados com precisão, pois falhas no posicionamento podem resultar em acúmulo de erros e retrabalhos de toda a montagem.

O ponto de partida é a definição da sequência de montagem de modo a evitar deslocamentos desnecessários do guindaste e interferência com peças já montadas.

Devido à limitação de espaço para acesso, o plano de montagem da obra priorizou a montagem dos elementos mais distantes da entrada do pátio, de modo que o guindaste se deslocasse somente para trás, com a lança alcançando todos os elementos a partir de somente um alinhamento e deslocando-se somente para frente e para trás. Assim, no primeiro dia de montagem a operação teve início com a montagem do pilar P5, o último do eixo vertical 5, conforme identificado na Figura 69 que identifica o grupo de pilares montados no mesmo dia através da mesma coloração e a sequência de montagem através das setas.

Figura 69 – Sequência de montagem dos pilares

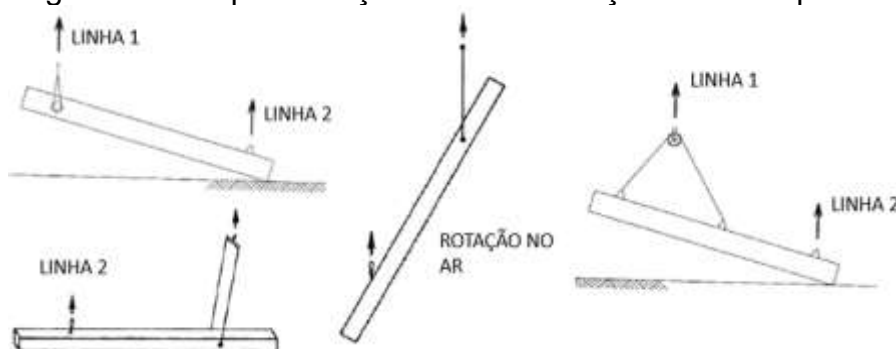


### 6.6.3.2 Operação de içamento

Após o recebimento das carretas carregadas com os pilares, é feita a movimentação dos mesmos para a montagem. Como são transportados na posição horizontal, se faz necessário o descarregamento a partir das carretas para o piso, sobre pranchão de madeira para evitar que sejam danificados por atrito com o piso após o giro. Durante o içamento do pilar este deve ser elevado e rotacionado, sendo que, de acordo com Rocha, Livi e Leite (2019), a rotação pode se dar por um ponto em caso de guindaste único e por dois pontos se houver um segundo guindaste, esta condição em caso de pilares de elevado comprimento (Figura 70). No primeiro caso, o engate ao pilar é feito utilizando uma linha de carga e erguido à posição vertical.

É fundamental que seja dada atenção especial à posição dos pontos (linhas) de içamento do pilar, para que durante a operação este não seja submetido a esforços superiores aos que resiste, buscando-se o equilíbrio de momentos.

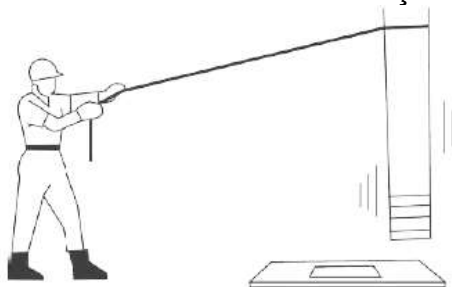
Figura 70 – Representação de linhas de içamento dos pilares



Fonte: Adaptado de Rocha, Livi e Leite (2019).

Durante a operação o içamento dos pilares, deve ser utilizada uma corda guia para controlar a movimentação até a posição final, como mostra a Figura 71.

Figura 71 – Controle de movimentação do pilar



Fonte: Rocha, Livi e Leite (2019).

### 6.6.3.3 Embutimento de pilares nos cálices

O posicionamento do pilar no interior do cálice de fundação é feito tomando-se como base os alinhamentos realizados no cálice e os gabaritos no fundo do mesmo, conforme mostrado na Figura 65.

Ainda com o pilar preso aos cabos de içamento, é feito o encunhamento no nicho de concretagem entre as faces do pilar e as faces internas do cálice utilizando-se pelo menos duas cunhas de madeira por face (Figura 73). As cunhas são então ajustadas à medida que o prumo e alinhamento do pilar é conferido nos sentidos transversal e longitudinal, através de gabaritos colocados superiormente ao pilar no qual são fixados esticadores metálicos (Figuras 74 e 75).

Figura 72 – Inserção no cálice – detalhe da superfície ranhurada na base do pilar.



Figura 73 – Cunhas de madeira colocadas nas quatro faces do pilar



Figura 74 – Ajuste das cunhas para alinhamento do pilar



Figura 75 – Conferência de prumo e nível de pilar.



Após a conferência de prumo, faz-se a conferência do alinhamento e distância entre os vãos dos pilares próximos, obedecendo à tolerância de montagem de 1,0cm, conforme indicado no item 6.6.3.4 a seguir. Deve-se observar situações que exigem translação de eixos entre pilares na planta de locação. Todos os desvios observados durante a conferência deverão ser anotados para a rastreabilidade das informações.

Conferidas as distâncias entre pilares, alinhamentos, nível e prumo, é liberada a concretagem do pilar para garantir seu engastamento à fundação. Esta concretagem deverá ser feita com concreto ou *grout* até a altura do nível da cunha, de modo que no dia seguinte à concretagem, após estabilização do pilar ao cálice, possam ser retiradas e a concretagem completa até o topo do bloco, com preenchimento total do nicho.

Um detalhe importante nos cálices da obra estudada é o afloramento das barras de aço utilizadas como condutores de descida do sistema de proteção contra descargas atmosféricas – SPDA. Neste caso, foi projetado o sistema do tipo estrutural, em que a própria armação dos pilares é conectada à armação da fundação para formar a malha de aterramento da edificação, responsável por fazer a dispersão da energia para o solo. Assim, os cálices das extremidades possuem barras que devem ser conectadas à armação do pilar por meio dos conectores aterrinsert.

Figura 76 – Detalhe de barra para ligação do aterramento estrutural no bloco e no pilar - SPDA



#### 6.6.3.4 Tolerâncias e imperfeições de montagem

A norma ABNT NBR 9062:2017 estabelece as seguintes tolerâncias de montagem dos elementos pré-fabricados:

- a) a tolerância para montagem em planta é de  $\pm 1,0\text{cm}$  entre apoios consecutivos, não podendo exceder o valor acumulado de 0,1% do comprimento da estrutura;
- b) a tolerância em relação à verticalidade é de  $\pm 1/300$  da altura até o máximo de 2,5cm, verificada logo após a montagem do elemento pilar;
- c) a tolerância em relação ao nível dos apoios é de  $\pm 1,0\text{cm}$ , não podendo exceder o valor acumulado de 3,0cm, quaisquer que sejam as dimensões longitudinal e transversal da estrutura, exceto para caminhos de rolamento, quando este valor é de 2,0cm;
- d) a tolerância em planta e em elevação para montagem dos pilares é de  $\pm 1,0\text{cm}$ ;
- e) a tolerância em planta para montagem dos blocos pré-moldados sobre a fundação é de  $\pm 4,0\text{cm}$ ;
- f) na montagem de elementos que tenham um contorno justaposto a um contorno semelhante, a tolerância de justaposição é de  $\pm 2,0\text{cm}$ .

No caso da montagem dos pilares, possíveis desaprumos devem ser considerados na etapa de dimensionamento. Ao se verificar tal situação após a montagem, a excentricidade de desaprumo deve ser inferior a  $H/400$ , em que "H" é a altura do pilar.

Já o selo de qualidade da ABCIC (Associação Brasileira de Construção Industrializada em Concreto), especifica as seguintes tolerâncias dimensionais de montagem, considerando uma diferença em relação à NBR 9062, que são comumente praticadas, como pode ser verificado nas Figuras 77 e 78 a seguir:

Figura 77 – Tolerâncias de montagem parte B por ABCIC

**PARTE B - TOLERÂNCIAS DE MONTAGEM - ESTRUTURA FINAL (OBRA)**

TIPO DE TOLERÂNCIAS OU INTERFACE ENTRE ELEMENTOS MONTADOS (quando aplicável)		tolerâncias (mm)
Posição dos pilares da extremidade da estrutura (item b1 do requisito 1.3.8)	Por elemento (em relação aos eixos)	± 15
	Relativo (entre pilares)	± 10
Posição dos pilares da extremidade da estrutura (item b1 do requisito 1.3.8)		± 15
Posição e nível de monoblocos (item b2 do requisito 1.3.8)		± 10
Nível de viga sobre os apoios 0 ver desenho m (item b3 do requisito 1.3.8)	Viga de suporte (por elemento)	± 10
	Viga de rolamento (por exemplo)	± 20
Nível de lage alveolar sem vinculação (somente apoiada) - nos pontos de apoio (item b3 do req. 1.3.8)		± 20
Nível dos demais elementos sobre os apoios - painel, lage maciça, lage alveolar vinculada, escada (item b3 req. 1.3.8)	Por elemento	± 10
	Acumulado (diferenças)	30
Prumo de painel ou pilar de extremidade - ver desenho n (item b4 do requisito 1.3.8)	Até 7,5 m	± L/300*
	Superior a 7,5 m - isolado	± 25
	Superior a 7,5 m - com carga	± 20
Juntas entre elementos aparentes ou com calafetação - ver desenho o (item b5 do requisito 1.3.8)		± 10

(\*) L=comprimento da peça

Fonte: Rocha, Livi e Leite (2019).

Figura 78 – Tolerâncias de montagem parte C por ABCIC

**PARTE C - TOLERÂNCIAS DE MONTAGEM - ELEMENTOS DA ESTRUTURA**

TIPO DE TOLERÂNCIAS OU INTERFACE ENTRE ELEMENTOS MONTADOS (quando aplicável)		tolerâncias (mm)
Posição de estacas (item b1 do requisito 2.3.3)		± 50
Posição de blocos pré-moldados sobre fundação (item b1 requisito 2.3.3)		± 50
Posição dos pilares internos da estrutura (item b1 do requisito 2.3.3)	Por elemento (em relação aos eixos)	± 15
	Relativo (entre pilares)	± 10
Posição de elementos sobre apoios (se dimensões diferentes) - ver desenho p (item b1 do requisito 2.3.3)	Entre apoios	± 10
	Acumulado	C/1000**
Prumo de pilar interno - ver desenho q (item b2 do requisito 2.3.3)	Até 7,5 m	± L/300*
	Superior a 7,5 m - com carga	± 25
	Superior a 7,5 m - com carga	± 20
Juntas entre elementos internos - ver desenhos r (item b3 do requisito 2.3.3)		± 15
Alinhamento entre elementos - ver desenhos s (item b4 do requisito 2.3.3)	Aparentes	± 10
	Internos	± 15

(\*) L=comprimento da peça; (\*\*) C = comprimento de toda a estrutura

Fonte: Rocha, Livi e Leite (2019).

### 6.6.4 Montagem de vigas

Na sequência de montagem posterior aos pilares, as vigas são montadas. Inicialmente deve-se fazer as mesmas verificações iniciais, isto é: checagem do plano de montagem, checagem do posicionamento das vigas pela observação da orientação dos elementos de apoio (consolas), verificação e limpeza de furos nas vigas e do posicionamento de apoios elastoméricos e checagem das condições dos acessórios de montagem.

Os cabos de içamento das vigas devem ter comprimento e diâmetro adequado. Ao elevar a peça, deve-se garantir que o ângulo formado entre o cabo de aço e a horizontal deve ser de no mínimo  $45^\circ$ , como mostra a Figura 79. Com relação aos dispositivos de içamento, as vigas foram projetadas com duas alças embutidas, em cordoalha CP-190 RB de 12,7mm, protegidas com tubo de aço de 18mm de diâmetro (Figura 80).

Figura 79 – Representação da posição de içamento de uma viga

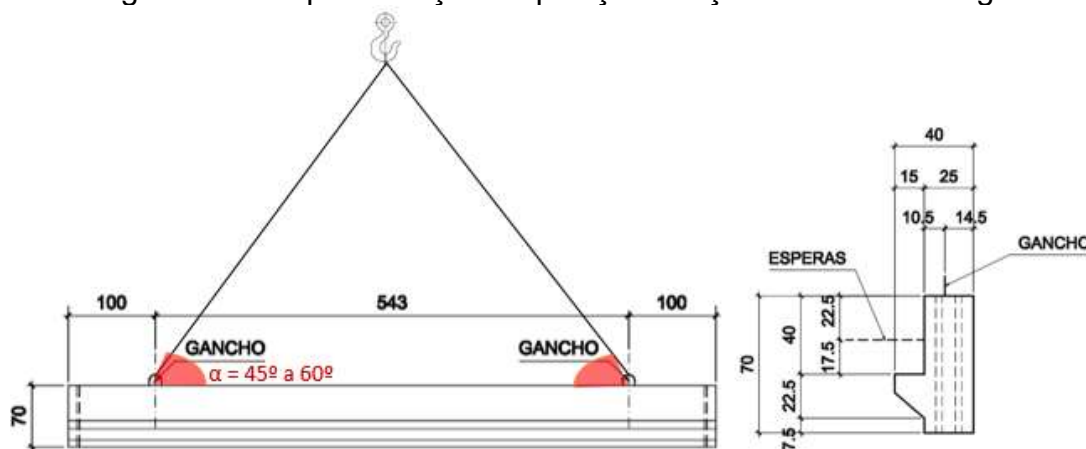
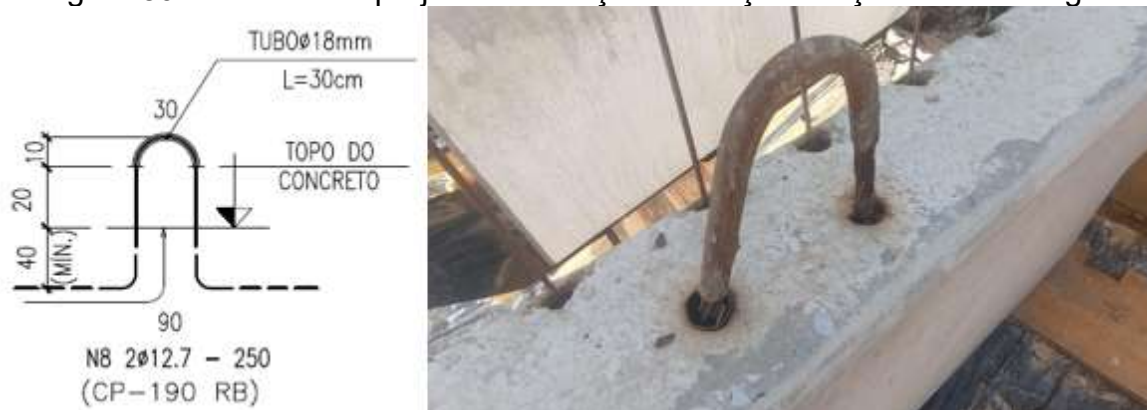


Figura 80 – Detalhe do projeto e execução das alças de içamento das vigas



Na obra do presente estudo de caso, as vigas do pavimento térreo foram montadas elevadas - sobre apoio de neoprene colocado na superfície aparente dos cálices dos blocos. Foram previstos no projeto nichos no bloco com diâmetro de 50 mm e profundidade de 20 cm para o engastamento das vigas através de barra de aço nervurada com bitola de 16mm. Após posicionadas as barras, verteu-se *grout* fluido de alto desempenho (MC Bauchemie - Emcecrete 40) que proporciona resistência à compressão de 40 Mpa em 24 horas e 70Mpa em 28 dias.

Figura 81 – Barras de espera das vigas baldrame aos blocos de fundação



A sequência de montagem das vigas segue o sentido ascendente, ou seja, as últimas vigas a serem montadas são as do último pavimento. São montadas formando pórticos entre os pilares, de modo que seja possibilitado montar as lajes sobre as vigas em seguida, fechando os vãos. Na obra estudada, devido ao espaço de operação limitado, foram montadas primeiramente as vigas do eixo mais afastado, seguindo a sequência dos pavimentos no sentido ascendente e intercalando com a montagem das lajes dos andares. Este planejamento de montagem deve ser feito com cautela uma vez que, conforme Rocha, Livi e Leite (2019), a adição de novos elementos à montagem pode introduzir excentricidades aos pilares, motivo pelo qual deve ser feita a conferência de prumo a cada peça montada.

Previamente ao içamento da viga, realiza-se a inserção dos pinos de ligação ao console do pilar e grauteamento completo dos furos. Deve-se conferir o

alinhamento e prumo das esperas antes do grauteamento. Posteriormente, as almofadas de elastômero (“neoprene”) devem ser posicionadas sobre os consoles para o apoio da viga nas duas extremidades.

Quando do içamento, a aproximação dos montadores só é permitida após a viga encontrar-se próxima ao local de montagem. Deve-se então encaixar as duas extremidades das vigas sobre os pinos de espera dos consoles e, antes de se realizar o grauteamento dos nichos das esperas, garantir o alinhamento, prumo, nivelamento dos apoios e que as folgas das vigas em relação à face dos pilares estão de acordo com as tolerâncias de norma (10mm de acordo com NBR 9062 e 15mm de acordo com ABCIC).

Somente após o grauteamento os cabos de içamento podem ser desprendidos das alças.

Figura 82 – Operação de montagem de viga e detalhe de barra de espera



#### 6.6.5 Montagem de escadas

No caso da obra estudada, as escadas também foram pré-fabricadas. Constituem-se de degraus individualizados, os quais são apoiados soldados sobre a viga central do tipo “jacaré” assim denominada devido aos seus dentes de sustentação.

A sequência de montagem inicia pela montagem da viga jacaré, que, da mesma maneira como as demais vigas, foi projetada com nichos para inserção e grauteamento sobre as barras de espera dos consoles das vigas que a recebem. Para o apoio dos degraus, o projeto considerou chapas de aço (250x50x10mm) soldadas em chumbadores de bitola 12,5mm inseridos no concreto. Os degraus são então assentados nos dentes da viga central e soldados entre si. A Figura 83 ilustra o tipo de ligação soldada utilizada para os elementos da escada.

Os patamares da escada são também pré-fabricados, dimensionados como lajes maciças de concreto apoiadas às vigas laterais.

Figura 83 – Detalhes das ligações da escada – viga jacaré e degraus



### 6.6.6 Montagem de lajes

As lajes podem ser elevadas diretamente das carretas para sua posição final, contanto que o planejamento logístico e a expedição sigam a sequência de montagem estabelecida no local. Na obra analisada, as falhas no romaneio das lajes foram a principal causa de atraso no cronograma de montagem, uma vez que algumas peças necessárias para a montagem não foram incluídas no carregamento. Isso resultou na espera da carreta carregada até a conclusão da montagem da carreta anterior, além da necessidade de armazenar lajes no pátio, que já apresentava restrições de espaço.

Na obra estudada utilizou-se lajes alveolares protendidas. Neste caso, o procedimento de montagem deve ser por içamento em pontos próximos às

extremidades das lajes, através de dispositivos como garras, cabo de aço, balancim e cinta, como ilustrado na Figura 84.

Os cabos ou cintas de içamento devem ser posicionados na transversal da peça, no máximo a 60 cm da extremidade da peça e, conforme exemplificado na Figura 79, devem formar no mínimo ângulo de 45° com a horizontal.

Figura 84 – Exemplos de dispositivos para içamento de lajes alveolares



- a) Montagem de laje alveolar com balancim e cinta - b) Montagem com garras



- c) Montagem com garras e alça de segurança -  
d) Montagem com cabos e laço tipo choker

Fonte: Rocha, Livi e Leite (2019).

Da mesma maneira como os pilares, as lajes devem ser orientadas através de uma corda conduzida por um montador durante o içamento. Por segurança, o operário não deve transitar na linha de queda da laje.

As lajes só devem ser montadas um dia após o grauteamento das vigas, tomando-se o cuidado para que não haja mudança de posição da viga (rotação) após o apoio das lajes (Rocha, Livi e Leite, 2019). Ao posicionar as lajes sobre os consoles corridos das vigas, deve-se observar a igualdade no espaçamento junto

aos apoios, que, conforme citado no item 4.2.2 – c, deve estar entre 6 e 10cm, sendo no mínimo a metade da altura da laje.

Para a montagem eficiente das lajes alveolares, algumas situações merecem atenção durante a etapa do projeto e execução:

- a) Paginação de lajes: a paginação de lajes deve seguir as dimensões de largura adequada às fôrmas disponíveis na fábrica. Para otimização da produção e da montagem, devem ser paginadas sempre que possível na mesma largura, evitando desvios na fábrica e durante a montagem. Entretanto, deve-se considerar uma divisão tal que não permita vãos abertos após a montagem, já que necessitam de moldagem no local para fechamento, o que prejudica a produtividade. Na obra analisada, tal situação ocorreu em algumas lajes, como pode-se observar na Figura 86. Para vãos entre lajes entre 10 a 15cm teve que ser elaborado projeto de armação complementar pelo projetista. A Figura 85 apresenta o projeto de um pano de lajes em que foi deixado um vão aberto de 15cm para preenchimento in loco com fôrma, armação e concretagem.

Figura 85 – Projeto de paginação indicando vão entre lajes

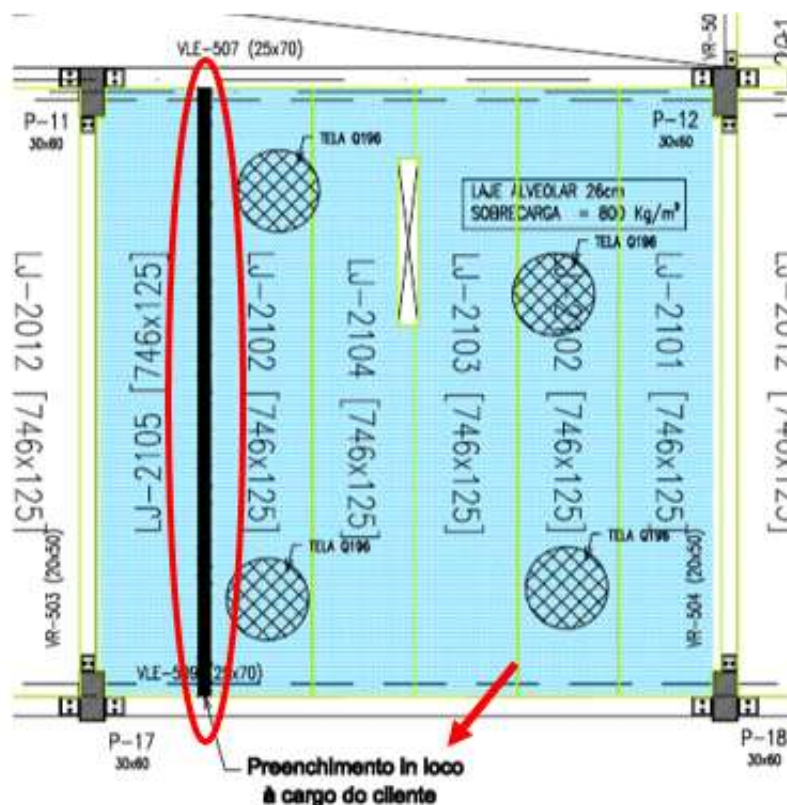


Figura 86 – Folga entre lajes alveolares após a montagem



- b) Detalhes de lajes de canto: o projeto e execução das lajes de canto deve considerar o recorte em fábrica do dente para o correto posicionamento da peça junto aos pilares. Erros na produção de lajes de canto (Figura 87) podem causar necessidade de quebras e cortes em campo, situação que, além de prejudicar a produtividade de montagem, também leva a falhas de acabamento das peças e necessidade de realizar fôrmas na face inferior das lajes para o preenchimento do vão. Na obra analisada, erros de produção de algumas lajes só foram percebidos quando do recebimento em obra, tendo que ser feita locação de equipamento especial para realizar o recorte lateral; além disso, a produtividade da montagem foi afetada já que as lajes previstas para serem carregadas tiveram que ser cortadas logo antes do seu carregamento.

Figura 87 – Detalhe de aberturas em lajes de canto



- c) Posicionamento de lajes e tolerâncias dimensionais: durante o posicionamento das lajes, pode-se utilizar de alavancas para adequar o espaçamento necessário entre peças. Esta atividade deve ser feita com cautela, evitando danificar as peças no manuseio da alavanca, como exemplificado na Figura 88.

Figura 88 – Detalhe de quebra em laje durante seu posicionamento.



- d) Detalhes em projeto de lajes alveolares: durante a montagem dos panos de laje deve-se verificar exigências de armaduras complementares no projeto de armação. Na obra estudada, o projeto previu armaduras de continuidade passantes em bainhas entre pilares da região central do pavimento (Figura 89) e armaduras complementares (CA-50, Ø12,5mm) sobre laje alveolar, soldada aos pilares através de inserts em chapa metálica, para melhoria do travamento e estabilidade da estrutura (Figuras 90 e 91).

Figura 89 – Detalhe de armadura passante em bainha no pilar



Figura 90 – Armadura complementar entre pilares sobre a laje alveolar

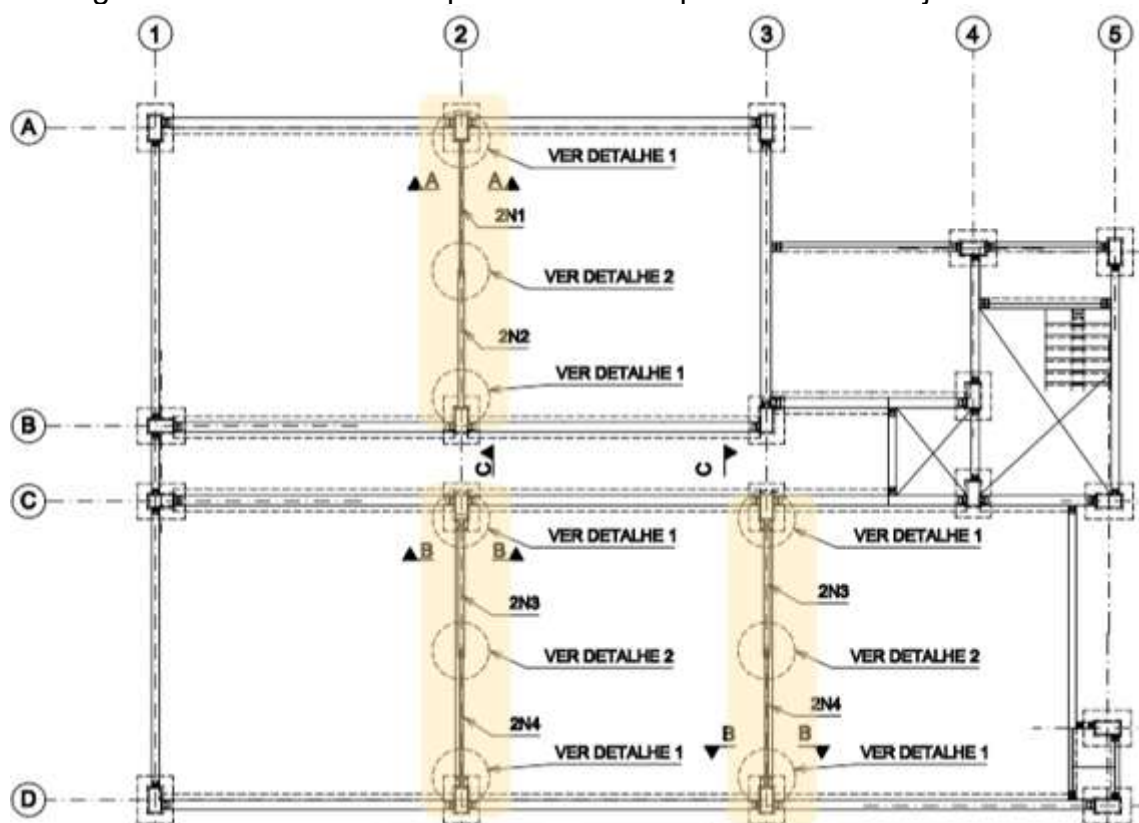


Figura 91 – Armadura complementar soldada entre pilares, sobre a laje



Após a montagem do pano de lajes, procede-se aos ajustes necessários no espaçamento entre juntas e ajuste das contra flechas, processo este conhecido como equalização (Figura 93). Para a equalização das lajes, utiliza-se de escoras reguláveis ou torniquetes, também conhecidas no contexto prático como agulhas, que são inseridas na folga entre as chavetas das lajes adjacentes e fixados

pontaletes nas faces inferior e superior, podendo ser utilizadas também cunhas de madeira. Após o ajuste é feito a concretagem da folga para a solidarização. Após a equalização, deve-se garantir a tolerância de nivelamento entre as lajes adjacentes de no máximo 10mm.

No caso da obra analisada, o tempo longo decorrido (cerca de 12 meses) entre o processo de produção e a montagem intensificou as contra flechas das lajes, a qual já é esperada a ocorrência de contra flecha devido à protensão em detrimento do alívio de tensões.

Figura 92 – Desnívelamento entre lajes em função da contra flecha



Figura 93 – Processo de equalização de lajes



Após o procedimento de equalização das contra flechas, é realizada a preparação para o capeamento das lajes. Primeiramente, é realizado a concretagem ao longo das juntas longitudinais entre as lajes (chavetas / chaves de cisalhamento), processo comumente denominado de “chaveteamento”, no qual, segundo a norma

ABNT NBR 14861:2022, é proporcionada a rigidez da ligação, de forma que não ocorram deslocamentos relativos considerando-se o seu efeito diafragma, o qual foi abordado no item 4.2.4.

As chavetas devem ser preenchidas com concreto, argamassa ou graute, para efetivar a solidarização e transmissão dos esforços de cisalhamento entre as lajes. Segundo a norma NBR 14861 (2022), os seguintes procedimentos devem ser adotados, em sequência:

- 1º. Realizar a limpeza de todas as juntas longitudinais com jato de ar ou água sobre pressão;
- 2º. Caso especificado em projeto, as armaduras complementares nas chavetas devem ser executadas;
- 3º. Molhar e saturar com água as juntas;
- 4º. Lançar o material de preenchimento, garantindo o completo espalhamento na junta. Para a obstrução da face inferior pode ser utilizado material concreto com agregado graúdo (granulometria inferior a 20mm), de consistência seca, aplicado com colher de pedreiro, de modo a evitar a colocação de fôrma inferiormente, mas evitar a fuga do material.

Figura 94 – Chaveteamento utilizando concreto.



A norma recomenda que após o chaveteamento, durante o período de cura, não se imponham carregamentos ou trepidações sobre a laje.

Após o chaveteamento realiza-se o posicionamento das armaduras previstas no projeto estrutural. No caso de armaduras contínuas entre lajes passadas através de nichos no pilar (ocorrência do presente estudo de caso), o espaço entre a armadura e a face interna do furo / nicho / bainha deve ser totalmente preenchido com concreto isento de cloretos em sua composição, antes da concretagem do capeamento. As armaduras de esperas previstas para ligação entre vigas e lajes devem ser alinhadas na obra durante o posicionamento das demais armaduras de distribuição (negativas) em tela de aço. Deve-se observar as recomendações do projeto a respeito do trespasse entre armaduras, que deve ser nos dois sentidos e, no caso da obra do presente estudo de caso, de no mínimo 20cm. Especificou-se tela de aço CA-60, Q-138 abrangendo todas as lajes. Outra recomendação feita pela ABNT NBR 14861 (2022) é com relação aos espaçadores que devem ser adotados com alturas variáveis devido à contra flecha, sendo maiores nas extremidades das lajes.

O capeamento é realizado em seguida após conferência das armaduras e cura do concreto das juntas longitudinais, conforme mostra a Figura 95. As seguintes etapas devem ser seguidas:

- 1º. Limpeza das superfícies das lajes através de jato de ar ou água sobre pressão, eliminando partículas soltas;
- 2º. Lançamento do concreto, conforme especificações no projeto estrutural. Para o presente estudo de caso especificou-se concreto de resistência mínima de 30Mpa, com espessura de 5cm no centro do vão das lajes, podendo variar entre 6 e 7cm nas extremidades, devido à contra flecha;
- 3º. Adensamento do concreto com vibradores de imersão ou régua vibratórias, no alinhamento dos pilares;
- 4º. Posicionamento das juntas de concretagem posicionadas na direção transversal da laje, no terço central do vão;
- 5º. Realização de cura química ou cura úmida por período de pelo menos sete dias consecutivos.

Figura 95 – Capeamento de laje pré-fabricada



## **6.7 Aspectos gerais das alvenarias e estrutura pré-fabricada**

### **6.7.1 Posicionamento das alvenarias**

O projeto da estrutura de concreto pré-fabricada deve considerar a sobrecarga das alvenarias internas sobre o capeamento. Para alvenarias situadas nas bordas longitudinais de lajes alveolares, é obrigatória a previsão de vigas de apoio, não sendo permitida a execução de lajes diretamente sobre as lajes alveolares.

Outro aspecto importante a ser definido durante a etapa de concepção e projeto é o posicionamento das alvenarias externas (de fachada) sobre as vigas. Na obra do presente estudo de caso, definiu-se a execução das alvenarias (de vedação) descentralizadas ao eixo das vigas, com a face externa da alvenaria recuada de cerca de 1,5cm a 2,0cm da face externa da viga, mas alinhada ao detalhe de chanfro existente na face superior da viga (Figura 96). Este detalhe construtivo contribui para a durabilidade tanto da pintura da fachada.

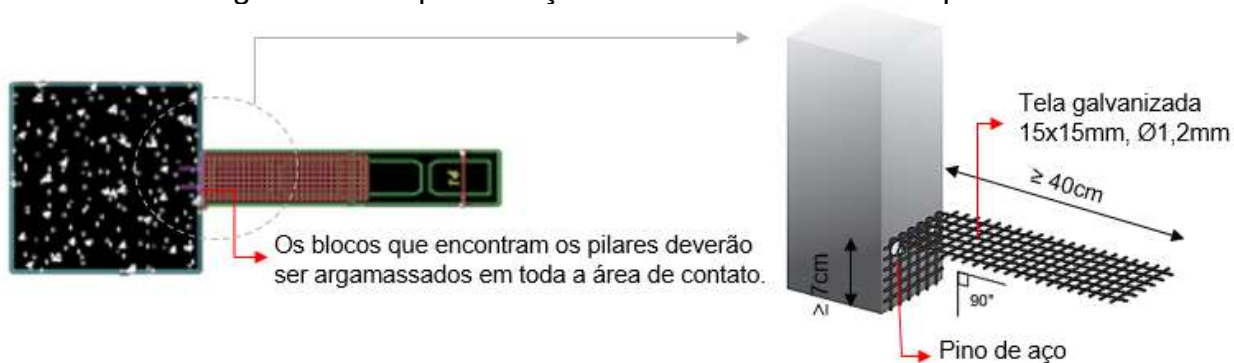
Figura 96 – Detalhe do posicionamento da alvenaria na face externa da viga pré-fabricada



### 6.7.2 Interface entre alvenaria de vedação e estrutura pré-fabricada

A ligação entre alvenaria e os pilares da estrutura pré-fabricada deve ser especificada em projeto para prevenir possíveis deslocamentos. Conforme Thomaz et al. (2009) e ilustrado na Figura 97, recomenda-se a ligação através de telas metálicas aplicadas a cada duas fiadas e fixadas no concreto com pelo menos um pino metálico caso a parede tenha espessura de até 9cm e dois pinos metálicos para espessura superior. A tela, eletrosoldada e galvanizada, com malha quadrada de 15mm, deve ser dobrada a 90° entre as fiadas de alvenaria, entre a argamassa de assentamento a ser utilizada. Para melhoria da aderência, recomenda-se que a face do pilar receba uma camada de chapisco rolado ou industrializado (“colante”).

Figura 97 – Representação da interface alvenaria x pilar



Fonte: Adaptado de Thomaz *et al.* (2009).

Figura 98 - Levantamento de alvenaria de vedação



a) Ancoragem alvenaria x estrutura com tela de aço      b) Vergas em bloco canaleta sobre alvenaria

## 6.8 Acabamentos da estrutura pré-fabricada

### a) Recomposições e quinas

Durante o transporte e montagem, podem acontecer danos superficiais nas peças pré-fabricadas, que, se não impactarem na integridade da peça e sua resistência, podem ser tratados após a montagem. Da mesma forma, os furos previstos para içamento devem ser recompostos e pequenas áreas com segregação do concreto devem ser estucadas. Tais recomposições devem ser feitas com argamassa modificada com polímeros, com elevada aderência e resistência, de baixa retração e acabamento fino. Não é recomendada a utilização de argamassa convencional de cimento e areia, já que esta poderá destacar-se da superfície com facilidade, apresentar retração e acabamento rugoso, diferente do aspecto da peça (ROCHA, LIVI E LEITE, 2019).

Figura 99 – Recomposições superficiais de peças pré-fabricadas



(a) Recomposição de quina

(b) Recomposição de furo de içamento

(c) Área com segregação de concreto

(d) Estucamento

Fonte: Adaptado de Rocha, Livi e Leite (2019).

b) Preenchimento de juntas externas entre elementos pré-fabricados

Para o melhor acabamento da estrutura e melhoria da estanqueidade entre peças no lado externo, é recomendável a vedação das juntas entre vigas e pilares pré-fabricados. No estudo de caso abordado, foi realizado o preenchimento das juntas através de delimitador de profundidade (“tarucel”) flexível, em espuma de polietileno de baixa densidade e selante mastique elástico, promovendo resistência às intempéries e melhoria da durabilidade das peças.

Figura 100 – Aplicação de selante na junta viga x pilar, face externa



c) Proteção das peças à infiltração de água

Uma vez que as estruturas de concreto são permeáveis, deve-se considerar a impermeabilização das peças na face externa para aumento da resistência às intempéries e à ação da água, levando ao aumento da sua durabilidade. Atualmente há várias soluções que podem ser adotadas, como exemplifica-se:

Uso de aditivos cristalizantes ao concreto, que penetram nos poros do concreto e formam cristais, levando a uma matriz com menor porosidade e permeabilidade;

Aplicação de pintura hidro-repelente e produtos hidrofugantes, que criam uma barreira superficial, protegendo a superfície contra a entrada de água e minimizando sua absorção.

## 7 CONCLUSÃO

O método construtivo em estrutura de concreto pré-fabricada se constitui como uma alternativa eficiente para a construção de edificações de múltiplos pavimentos, proporciona uma solução estruturalmente segura, sustentável, durável e com possibilidade para certa versatilidade arquitetônica.

Comparada às estruturas de concreto armado convencionais, moldadas in loco, a maior vantagem sustenta-se pelos ganhos de execução e produtividade, com consequente retorno do investimento em menor prazo. Entretanto o maior custo associado e necessidade de mão de obra especializada tanto para o projeto quanto para a construção ainda são fatores preponderante para a falta de abrangência deste método construtivo em detrimento do convencional.

Ao estudar as etapas do projeto estrutural da estrutura pré-fabricada, verificam-se procedimentos do projeto bastante consolidados nas normas técnicas brasileiras, as quais foram abordadas neste trabalho, mas também as normas internacionais. A respeito do dimensionamento, toma-se como base sobretudo as normas ABNT NBR 6118, ABNT NBR 9062 e ABNT NBR 14861 que fornecem diversos critérios e metodologias para o cálculo e verificação. Neste sentido, o aspecto das ligações entre elementos pré-fabricados merece especial atenção, uma vez que sua correta especificação é fator preponderante para a garantia da estabilidade global da estrutura e eficiência do sistema construtivo em relação à transferência de esforços e carregamentos.

De outro modo, o aproveitamento das vantagens de elevada resistência, aumento no comprimento dos vãos, durabilidade e qualidade que a pré-fabricação possibilita, dependem dos procedimentos controlados da sua produção, os quais devem seguir normas específicas para agregados, aglomerantes, concreto, fôrmas e armaduras. Os procedimentos de estocagem após produção também são importantes para a conservação das peças antes do transporte ao local de utilização final.

A etapa de planejamento que antecede a montagem contempla desde o carregamento, transporte, descarregamento no canteiro e planos de içamento

(rigger) e montagem das peças. Esta etapa tem grande importância pois garante o sucesso de todo o projeto antes realizado. Entretanto, menosprezar o planejamento pode acarretar em diversas consequências adversas como erros na sequência de montagem, dificuldades logísticas, atrasos significativos, aumentos nos custos e até mesmo comprometimento da segurança estrutural.

A montagem das peças é o ponto final de todo o processo da construção pré-fabricada, corresponde à efetivação do projeto estrutural e arquitetônico. Determina como as peças são coordenadas entre si para tornar rígido o sistema estrutural (tipo esqueleto no estudo de caso). Nesta etapa os cuidados na manipulação / içamento das peças, garante a segurança tanto da própria peça quanto da mão de obra, das edificações adjacentes e dos transeuntes. Após a colocação das peças em sua posição final, os aspectos de alinhamento e nivelamento devem obedecer às tolerâncias especificadas em norma. As ligações corretas das peças entre si são essenciais para o desempenho global da estrutura tal como projetada.

Por fim, os acabamentos adotados para a estrutura garantem não só a boa condição estética, mas principalmente a durabilidade e manutenção da funcionalidade da edificação. Atualmente o mercado de produtos para a tecnologia do concreto possui diversas soluções para a proteção contra intempéries, resistência ao desgaste e facilitação da manutenção. É importante que o projeto leve em consideração a adoção de metodologias para que se garanta a maior vida útil da estrutura como um todo.

No contexto dos aspectos mencionados anteriormente, a presente monografia procurou contribuir para a compreensão abrangente dos processos relacionados ao projeto, produção e execução de edificações de múltiplos pavimentos em estrutura de concreto pré-fabricada. Buscou-se, através da exposição de um estudo de caso, abordar os procedimentos de montagem, destacando a aplicação no contexto prático das ligações especificadas e dimensionadas no projeto estrutural, referenciando-se a teoria. Além disso foram abordadas algumas falhas identificadas ao longo do processo, desde a produção até a montagem, de modo a consolidar os aprendizados adquiridos durante o acompanhamento da obra estudada.

## 8 REFERÊNCIAS

ABCIC (Brasil, São Paulo). **Anuário 2012: Pré-fabricados de concreto**. Pré-fabricados de concreto, São Paulo, 17 out. 2023. Tendências do setor de pré-fabricados, p. 17-27. Disponível em: <https://abcic.org.br/Arquivos/4plnmf0o.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

ABCIC (Brasil, São Paulo). Desenvolvimento tecnológico: Os novos horizontes. **Anuário ABCIC**, São Paulo, p. 97-100, 2012. Disponível em: <https://abcic.org.br/Arquivos/4plnmf0o.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2023.

ABCIC (Brasil, São Paulo). Ponto de vista: Planejamento de rigging é vital para a segurança dentro dos canteiros em obras em pré-moldado de concreto. **Industrializar em concreto: Montagem é vital para a execução de obras em pré-fabricado de concreto**, São Paulo, p. 6-9, Julho 2019. Disponível em: <https://industrializaremconcreto.com.br/Edicoes/Edicao/1927>. Acesso em: 28 nov. 2023.

ACRO CABO, 2022. As 4 causas mais comuns que indicam a hora certa de substituir os cabos de aço. Disponível em: <https://acrocabo.com.br/blog/as-4-causas-mais-comuns-que-indicam-hora-certa-de-substituir-os-cabos-de-aco/>. Acesso em: 02 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, p. 79. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14861: Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA – ABCI (1980). **A história dos pré-fabricados e sua evolução no Brasil**. São Paulo.

CARVALHO, Roberto Chust; DE FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4ª. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2017. 415 p.

CASSOL Pré-fabricados. Disponível em: <https://www.cassol.ind.br/pre-fabricado/paineis-pre-fabricados/>. Acesso em 04 nov. 2023

CONCRETE CONSTRUCTION, 2013. Disponível em: [https://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/tilt-up-buildings-of-five-stories-or-more\\_o](https://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/tilt-up-buildings-of-five-stories-or-more_o). Acesso em 18 out. 2023.

EL DEBS, Mounir Khalil. **Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 453 p.

LIEBHERR. **Catálogo de guindaste LTM 1070-4.2** – 2023. Ehingen, Alemanha, 2023. 30 p. Disponível em: <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/95822dd4-b6ed-4b84-9a61-c91b749060be/liebherr-189-ltm-1070-4.2-td-189-04-defisr11-2023.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2023.

MARIN, Marcelo Cuadrado. **Contribuição à análise da estabilidade global de estruturas em concreto pré-moldado de múltiplos pavimentos**. Orientador: Prof. Dr. Mounir Khalil El Debs. 2009. 213 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-03032010-082525/publico/2009ME\\_MarceloCuadradoMarin.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-03032010-082525/publico/2009ME_MarceloCuadradoMarin.pdf). Acesso em: 27 nov. 2023.

MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS (São Paulo) et al. **Manual Munte De Projetos Em Pré-Fabricados De Concreto**. 2ª. ed. rev. e aum. São Paulo: PINI, 2007. 532 p.

PIGOZZO, Bruno N.; SERRA, Sheyla M.B.; FERREIRA, Marcelo de A. **A influência dos pré-fabricados em concreto armado no ciclo de industrialização da construção**. ENTAC 2006: A Construção do Futuro XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, [s. l.], 23 ago. 2006. Disponível em: [http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006\\_3265\\_3274.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006_3265_3274.pdf).

Acesso em: 28 out. 2023.

PREFAB. Disponível em: <https://www.prefab.com.br/produtos/vigas-calha-ic/>. Acesso em 02 nov. 2023.

RAYMUNDO, Henrique. **Análise de pavimentos de edifícios em concreto pré-fabricado considerando o efeito diafragma**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho. 2012. 247 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4666/4134.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 nov. 2023.

ROCHA, Francisco Celso Silva; LIVI, Luis Otávio Baggio; LEITE, Mairon Goulart. **Manual de montagem das estruturas pré-moldadas de concreto**. 1ª. ed. São Paulo: ABCIC - Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto, 2019. 228 p.

ROSAS, Leticia R. Batista. **Concreto Protendido**. 2018. Notas de aula. Disponível em: <https://docplayer.com.br/76298529-Concreto-protendido-sistemas-de-aplicacao-da-protensao-prof-leticia-r-batista-rosas.html>. Acesso em: 29 nov. 2023.

TOP TEC, 2023. Disponível em: <https://toptecborrachas.com.br/produto/aparelhos-de-apoio/>. Acesso em 28 nov. 2023.

THOMAZ, Ercio; MITIDIARI FILHO, Cláudio Vicente; CLETO, Fabiana da Rocha; CARDOSO, Francisco Ferreira. **Código de práticas nº 01: Alvenaria de vedação em blocos cerâmicos**. 1ª. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2009. 72 p. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3298513/mod\\_resource/content/0/113-Codigo\\_de\\_Praticas\\_n\\_01.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3298513/mod_resource/content/0/113-Codigo_de_Praticas_n_01.pdf). Acesso em: 16 dez. 2023.

VAN ACKER, ARNOLD. **Manual de sistemas de pré-fabricados de concreto**. FIB 2002, Tradução Marcelo Ferreira, ABCIC 2003. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/pre-moldados/Manual%20Fib.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. Apresentação. In: EL DEBS, Mounir Khalil. **Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações**. 2ª. ed. rev. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **O Concreto no Brasil: Pré-fabricação - Monumentos - Fundações**. São Paulo: Studio Nobel, 2002. 355 p. v. III.

WALLS AND CEILINGS, 2017. Disponível em: <https://www.wconline.com/articles/90884-advantages-and-disadvantages-of-tilt-up-walls>. Acesso em 18 out. 2023.