

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Felipe José Spanhol**

**ESTUDO DE CASO: EXECUÇÃO DE LAJE NERVURADA  
PROTENDIDA COM CORDOALHAS ENGRAXADAS EM UM  
EDIFÍCIO COMERCIAL DE PORTO ALEGRE.**

Porto Alegre  
Setembro de 2023

**FELIPE JOSÉ SPANHOL**

**ESTUDO DE CASO: EXECUÇÃO DE LAJE NERVURADA  
PROTENDIDA COM CORDOALHAS ENGRAXADAS EM UM  
EDIFÍCIO COMERCIAL DE PORTO ALEGRE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de  
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Cristiane Sardin Padilla de Oliveira**

Porto Alegre  
Setembro de 2023

**FELIPE JOSÉ SPANHOL**

**ESTUDO DE CASO: EXECUÇÃO DE LAJE NERVURADA  
PROTENDIDA COM CORDOALHAS ENGRAXADAS EM UM  
EDIFÍCIO COMERCIAL DE PORTO ALEGRE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, setembro de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof<sup>ª</sup>. Cristiane Sardin Padilla de Oliveira (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

**Prof. João Ricardo Masuero (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. Pablo Andrés Rangel Pacheco (UIS - Colômbia)**  
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dedico este trabalho aos que apoiaram, confiaram, torceram, curtiram e estiveram comigo ao longo dessa trajetória, vocês fizeram e fazem a diferença.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço e sou grato primeiramente e principalmente aos meus pais, José e Vania, e ao meu irmão Fernando, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem no meu potencial, além de estarem comigo me dando suporte ao longo de toda vida.

Agradeço aos meus amigos da capital, do interior e do mundo, pela amizade, pelo apoio, pelas festas e pela parceria.

Agradeço, em nome dos times de futsal da Engenharia Civil e da AAEE, a todas amizades e emoções que o esporte foi capaz de me proporcionar ao longo desses anos.

Agradeço a Professora Cristiane, minha orientadora, por me auxiliar, guiar e contribuir para a realização deste trabalho.

Agradeço às empresas e aos colegas de trabalho nos estágios desenvolvidos pelos exemplos e pelos ensinamentos compartilhados.

Agradeço à empresa que permitiu que o estudo de caso fosse realizado.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Civil da UFRGS por todo conhecimento transmitido.

Agradeço, por fim, a todos que de alguma forma fizeram parte dessa trajetória, para que esse seja o início de muitas outras conquistas e realizações.

Em todas as coisas da natureza  
existe algo de maravilhoso.

*Aristóteles*

## RESUMO

Este estudo de caso aborda a execução de lajes nervuradas de concreto (moldadas *in loco* com moldes plásticos) protendidas com cordoalhas engraxadas em uma edificação comercial na cidade de Porto Alegre, além de contar com uma revisão bibliográfica acerca do tema. O processo de protensão com cordoalhas engraxadas envolve o tensionamento das cordoalhas após a concretagem da laje, gerando uma compressão no concreto e diminuindo as tensões de tração na laje, aumentando sua capacidade de suporte e minimizando as deformações finais. Sabe-se que o desenvolvimento dessas lajes partiu da necessidade de construir vãos maiores com redução na quantidade de pilares e vigas, diminuindo também o consumo de concreto e de aço. Ademais, o trabalho detalha as etapas executivas das lajes nervuradas protendidas, iniciando pela apresentação do empreendimento e pelas concepções de projeto e partindo para o sequenciamento construtivo propriamente dito, que contempla a montagem do cimbramento e dos moldes, a instalação dos cabos de protensão e das armaduras passivas, a concretagem, o tensionamento das cordoalhas e cuidados pós-execução. Também são discutidos desafios e soluções para garantir o desempenho final do produto, além de ser evidenciado que esse método executivo é viável e possível de ser feito no tempo de prazo estipulado. O estudo também aponta que a execução bem-sucedida das lajes nervuradas protendidas necessita de uma maior rigorosidade referente ao controle executivo para que a qualidade final seja assegurada, partindo da seleção criteriosa e uso de materiais certificados, do investimento em projetos e da capacitação e habilitação dos profissionais no canteiro. Por fim pode-se dizer que esse trabalho cumpriu com seus objetivos, apresentando detalhadamente as etapas executivas referentes à execução das lajes nervuradas protendidas e contribuindo para geração de conhecimento relacionada ao tema.

Palavras-chave: Execução de lajes nervuradas protendidas moldadas *in loco*. Concreto protendido. Cordoalhas engraxadas. Ancoragem ativa. Ancoragem passiva. Cubeta.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplificação do conceito de protensão em uma estrutura de concreto protendido .....	16
Figura 2 - Sistema de protensão pós tensionado com aderência .....	18
Figura 3 - Tipos de protensão classificados quanto aos sistemas e aos níveis de protensão .....	19
Figura 4 - Corte longitudinal em uma laje protendida com cordoalhas engraxadas ....	21
Figura 5 - Seção de uma monocordoalha engraxada com 7 fios.....	23
Figura 6 – Exemplificação dos cabos de protensão prontos para o uso .....	24
Figura 7 – Detalhamento do macaco hidráulico de protensão utilizado para cordoalhas engraxadas.....	26
Figura 8 - Detalhamento dos componentes da ancoragem ativa .....	27
Figura 9 – Corte transversal exemplificando um possível arranjo dos elementos da ancoragem ativa .....	28
Figura 10 - Elementos da ancoragem ativa (esquerda) e passiva (direita).....	29
Figura 11 - Exemplo de vista em planta e em corte da armadura de fretagem para cordoalhas engraxadas .....	30
Figura 12 - Detalhe da fixação correta dos nichos de ancoragem na fôrma .....	32
Figura 13 - Exemplo de laje nervurada. ....	38
Figura 14 - Detalhe típico de corte transversal em laje nervurada direta.....	38
Figura 15 - Exemplificação de laje nervurada unidirecional (acima) e bidirecional (abaixo). ....	39
Figura 16 - Exemplo dos componentes do sistema de fôrmas. ....	41
Figura 17 - Molde plástico em polipropileno – “cubeta” - bidirecional .....	42
Figura 18 - Exemplo de cimbramento metálico nas lajes nervuradas .....	44
Figura 19 – Edifício objeto de estudo desse trabalho.....	45
Figura 20 – Identificação das lajes protendidas e exemplificação do pavimento tipo .	46
Figura 21 – Modelo 3D dos pavimentos acompanhados no estudo de caso .....	47
Figura 22 – Planta geométrica da laje do trecho C1.....	48
Figura 23 – Planta geométrica da laje do 8º pavimento do trecho C2 .....	49
Figura 24 – Detalhamento geométrico das cubetas utilizadas .....	50
Figura 25 – Exemplificação do tapa nervura utilizado.....	51
Figura 26 – Componentes do sistema de fôrma utilizado .....	52
Figura 27 - Sistema de fôrma montado em obra .....	52
Figura 28 – Exemplo do projeto de escoramento – C1 .....	53
Figura 29 – Representação do corte AA – C1 .....	54

Figura 30 – Representação do corte BB – C1 .....	54
Figura 31 – Exemplo do projeto de vigamento superior no trecho C1 .....	55
Figura 32 – Exemplo do projeto de reescoramento - C1 .....	56
Figura 33 – Exemplo do reescoramento executado <i>in loco</i> – C1 .....	56
Figura 34 – Esquema do sistema de escoramento utilizado .....	57
Figura 35 – Perfil longitudinal dos cabos no trecho C1 .....	58
Figura 36 – Exemplo em planta do projeto de protensão – trecho C1 .....	59
Figura 37 – Exemplo em planta do projeto de protensão – 8º pavimento - trecho C2.	60
Figura 38 – Perfil longitudinal dos cabos – 8º pavimento – trecho C2.....	60
Figura 39 – Detalhamento da armadura negativa e dos estribos das vigas de borda responsáveis pelas ancoragens ativas - C1 (acima) e C2 (abaixo).....	62
Figura 40 – Modelo dos suportes para altura dos cabos utilizado.....	63
Figura 41 – Detalhamento de projeto da ancoragem ativa e da armadura de fretagem	64
Figura 42 – Exemplo dos elementos componentes da ancoragem ativa .....	65
Figura 43 – Exemplo da ancoragem passiva .....	65
Figura 44 – Detalhamento de projeto da armadura transversal positiva – C1 .....	67
Figura 45 – Detalhamento de projeto da armadura longitudinal positiva – C1 .....	67
Figura 46 – Detalhamento de projeto da armadura transversal negativa – C1.....	68
Figura 47 – Detalhamento de projeto da armadura longitudinal negativa – C1.....	68
Figura 48 – Plataforma metálica utilizada para possibilitar o carregamento dos materiais .....	70
Figura 49 – Posição de carregamento das cubetas, com a grua suportando o container que é abastecido pelo trabalhador na plataforma metálica.....	71
Figura 50 – Cubetas transportadas até a laje em execução .....	72
Figura 51 – Cabos de protensão sendo transportados até a laje em execução .....	73
Figura 52 – Central de produção dos armadores (ferreiros).....	74
Figura 53 – Montagem do escoramento (torres de andaime) das vigas perimetrais – C1 .....	78
Figura 54 – Madres posicionadas nos forçados das torres de andaime – C1 .....	78
Figura 55 – Barrotes posicionados sobre as madres – C1 .....	79
Figura 56 – Início da montagem do escoramento (torres de andaime) da laje – C1 ...	80
Figura 57 – Montagem do escoramento (torres de andaime) em finalização – C2.....	80
Figura 58 – Posicionamento das madres da laje em andamento – C1 .....	81
Figura 59 – Posicionamento das madres da laje finalizado – C2.....	81
Figura 60 – Vista inferior do posicionamento dos barrotes em andamento – C1 .....	82
Figura 61 – Vista superior dos barrotes posicionados – C1 .....	82

Figura 62 – Montagem do fundo e da lateral interna do molde das vigas – C1.....	84
Figura 63 – Montagem do molde do trecho maciço da fachada principal – C1.....	85
Figura 64 – Montagem do trecho maciço perpendicular à fachada principal – C1.....	85
Figura 65 – Montagem do molde dos capitéis finalizada – C1 .....	86
Figura 66 – Início da montagem das cubetas – C1.....	87
Figura 67 – Montagem das cubetas em execução – C2 .....	87
Figura 68 – Trilho formado pelas régua onde encaixam-se as cubetas .....	88
Figura 69 – Cubeta sendo encaixada durante a montagem .....	88
Figura 70 – Exemplificação do travamento das régua nos barrotes com pregos.....	89
Figura 71 – Linhas mestras responsáveis pelo alinhamento final da laje.....	89
Figura 72 – Montagem das cubetas finalizada – C1 .....	90
Figura 73 – Posicionamento dos tapa nervuras em execução – C1.....	90
Figura 74 – Montagem das cubetas finalizada – C2 .....	91
Figura 75 – Posicionamento dos tapa nervuras em fase final de execução – C2.....	91
Figura 76 – Vista inferior do sistema de fôrmas após finalização da montagem.....	92
Figura 77 – Posicionamento dos painéis externos das vigas.....	93
Figura 78 – Exemplificação do posicionamento do aço de viga com o auxílio da grua – C1 .....	94
Figura 79 – Locação dos pontos de furação para montagem da ancoragem ativa .....	95
Figura 80 – Ilustração dos furos com 25mm de diâmetro executados para 4 cabos ....	95
Figura 81 – Montagem da ancoragem ativa – parte 1 .....	96
Figura 82 – Montagem da ancoragem ativa – parte 2 .....	96
Figura 83 – Resultado final da ancoragem ativa para um par de cabos .....	97
Figura 84 – Marcação horizontal dos suportes de fixação dos cabos – parte 1.....	97
Figura 85 – Marcação horizontal dos suportes de fixação dos cabos – parte 2.....	98
Figura 86 – Marcação horizontal dos suportes de fixação concluída – C2.....	98
Figura 87 – Posicionamento dos espaçadores nas nervuras .....	99
Figura 88 – Posicionamento dos estribos nas nervuras .....	100
Figura 89 – Posicionamento da armadura positiva da laje .....	100
Figura 90 – Posicionamento e fixação dos suportes para os cabos (cadeirinhas) .....	101
Figura 91 – Posicionamento e fixação dos suportes para os cabos (treliças).....	102
Figura 92 – Início da montagem dos cabos de protensão – C1 .....	103
Figura 93 – Exemplo de posicionamento e fixação da ancoragem passiva .....	103
Figura 94 – Arranjo dos cabos na ancoragem passiva após finalização da montagem .....	104

Figura 95 – Dupla de cabos posicionada na nervura e fixada nos suportes .....	105
Figura 96 – Vista para ancoragem passiva dos cabos posicionados nas nervuras .....	105
Figura 97 – Perfil longitudinal evidenciando a curvatura dos cabos de protensão ....	106
Figura 98 – Corte e remoção da bainha plástica protetora dos cabos .....	107
Figura 99 – Inserção das cordoalhas engraxadas expostas nos bicos da ancoragem ativa.....	107
Figura 100 – Resultado da inserção dos cabos na ancoragem ativa.....	108
Figura 101 – Fixações adicionais pertinentes à ancoragem ativa .....	108
Figura 102 – Montagem da armadura de fretagem finalizada.....	109
Figura 103 – Posicionamento dos espaçadores nas cubetas.....	110
Figura 104 – Posicionamento das telas de distribuição em execução .....	111
Figura 105 – Finalização do posicionamento das telas de distribuição .....	111
Figura 106 – Armadura negativa na direção das nervuras com diâmetro de 16mm ..	112
Figura 107 – Armadura negativa na direção das nervuras com diâmetro de 25mm ..	112
Figura 108 – Armadura negativa perimetral (na direção dos trechos maciços).....	113
Figura 109 – Configuração final da montagem da laje antes da concretagem – C1 ..	114
Figura 110 – Configuração final da montagem da laje antes da concretagem – C2 ..	114
Figura 111 – Configuração final de trecho maciço antes da concretagem – C2 .....	115
Figura 112 – Início da concretagem das lajes e vigas .....	117
Figura 113 – Concreto preenchendo completamente a nervura após ser adensado ...	118
Figura 114 – Concretagem e adensamento em andamento em trecho maciço.....	118
Figura 115 – Marcação dos pontos de referência de nível do concreto .....	119
Figura 116 – Nivelamento do concreto com o uso de réguas metálicas .....	120
Figura 117 – Acabamento final <i>floateado</i> com o uso de <i>float</i> metálico.....	120
Figura 118 – Resultado final da laje após concretagem – C1 .....	121
Figura 119 – Resultado final da laje após concretagem – C2 .....	121
Figura 120 – Aplicação de produto para cura química do concreto.....	122
Figura 121 – Rastreabilidade do concreto de acordo com o caminhão correspondente – trecho C1 .....	123
Figura 122 – Desforma dos painéis externos da viga na ancoragem ativa.....	125
Figura 123 – Remoção dos nichos cônicos para possibilitar a protensão .....	126
Figura 124 – Marcação nos cabos com spray para medir o alongamento final .....	126
Figura 125 – Macaco hidráulico realizando a protensão dos cabos .....	127
Figura 126 – Vista do manômetro acoplado à bomba do macaco durante a protensão .....	127
Figura 127 – Cordoalha após ser protendida e encunhada.....	128

Figura 128 – Vista do cap de proteção após corte dos cabos em dupla de cordoalhas .....	129
Figura 129 – Pavimento finalizado – Trecho C1 .....	130
Figura 130 – Vista inferior do arranjo unidirecional em blocos formado pela laje nervurada – Trecho C1 .....	131
Figura 131 – Pavimento finalizado – Trecho C2 (vista 1) .....	132
Figura 132 – Pavimento finalizado – Trecho C2 (vista 2) .....	133
Figura 133 – Pavimento finalizado – Trecho C2 (vista do maciço e da lateral inclinada).....	134
Figura 134 – Exemplificação da coleta de cotas pela equipe de topografia para análise da deformação da laje.....	135
Figura 135 – Ficha de acompanhamento dos serviços de protensão após a concretagem .....	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características cordoalhas engraxadas com 7 fios - Aço CP190 RB.....	23
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental, a relação água/cimento e a resistência mínima do concreto para cada ambiente, para o concreto armado e protendido .....	25
Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento mínimo do concreto armado e protendido em diferentes elementos.....	25
Tabela 4 - Sequência construtiva por etapas para uma laje protendida.....	31
Tabela 5 – Principais atividades desenvolvidas por dia de ciclo em cada trecho .....	76
Tabela 6 – Ficha de verificação de serviço (FVS) - Protensão .....	116
Tabela 7 - Ficha de verificação de serviço (FVS) – Vigas e lajes.....	116
Tabela 8 – Relatório de alongamento dos cabos após protensão .....	129

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 DIRETRIZES DO ESTUDO</b> .....	14
2.1 OBJETIVOS .....	14
2.2 DELIMITAÇÕES .....	14
2.3 LIMITAÇÕES .....	14
2.4 METODOLOGIA .....	14
<b>3 REFERENCIAIS TEÓRICOS</b> .....	15
3.1 CONCRETO PROTENDIDO .....	15
<b>3.1.1 Definição</b> .....	15
<b>3.1.2 Tipos de protensão</b> .....	17
<b>3.1.3 Vantagens e desvantagens</b> .....	19
3.2 PROTENSÃO COM CORDOALHAS ENGRAXADAS .....	21
<b>3.2.1 Materiais e Equipamentos</b> .....	22
3.2.1.1 <i>Aço de Protensão</i> .....	22
3.2.1.2 <i>Concreto</i> .....	24
3.2.1.3 <i>Macaco Hidráulico</i> .....	26
<b>3.2.2 Ancoragem</b> .....	27
<b>3.2.3 Armadura de fretagem</b> .....	29
<b>3.2.4 Execução de lajes protendidas com cordoalhas engraxadas</b> .....	30
3.2.4.1 <i>Sequência construtiva</i> .....	30
3.2.4.2 <i>Documentos essenciais</i> .....	31
3.2.4.3 <i>Manuseio e armazenamento dos materiais</i> .....	31
3.2.4.4 <i>Montagem dos cabos</i> .....	32
3.2.4.5 <i>Concretagem</i> .....	33
3.2.4.6 <i>Protensão e Acabamento dos cabos</i> .....	34
3.3 LAJE NERVURADA .....	34
<b>3.3.1 Definição</b> .....	35
<b>3.3.2 Vantagens e desvantagens</b> .....	35
<b>3.3.3 Laje nervurada moldada <i>in loco</i></b> .....	37
<b>4 ESTUDO DE CASO</b> .....	45
4.1 INFORMAÇÕES SOBRE O EMPREENDIMENTO .....	45
4.2 CONCEPÇÕES DE PROJETO E EXECUTIVAS .....	47
<b>4.2.1 Fôrma</b> .....	47

<b>4.2.2 Protensão .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.3 Transporte e logística de materiais .....</b>	<b>69</b>
<b>4.2.4 Tempo de execução .....</b>	<b>74</b>
<b>4.3 ETAPAS EXECUTIVAS .....</b>	<b>77</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>138</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>139</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que fatores como a redução no consumo de concreto e aço e por consequência do peso da estrutura, além do melhor aproveitamento dos materiais utilizados em obra, são de suma importância para construção civil, pois impactam diretamente na sustentabilidade, no prazo e no custo final do produto. Somando isso a necessidade de construir-se vãos maiores sem o uso de pilares e vigas, surgiram as lajes nervuradas protendidas, que suprem essas demandas e ainda trazem benefícios arquitetônicos ao empreendimento.

Pode-se dizer que a protensão com cordoalhas engraxadas consiste na aplicação de um esforço de tração nas cordoalhas após a concretagem da laje. Depois de tracionados, os cabos são ancorados na extremidade das lajes por meio de cunhas, gerando uma força de compressão no concreto. Essa compressão faz com que as tensões de tração da estrutura sejam reduzidas, aumentando sua capacidade de suporte e minimizando deformações finais em grandes vãos (flechas).

No que diz respeito às cordoalhas engraxadas, consistem em fios de aço entrelaçados e revestidos por polietileno ou polipropileno de alta densidade, envolto com graxa para proporcionar proteção contra a corrosão e reduzir o atrito interno durante o tensionamento.

Será abordado ao longo deste trabalho pontos pertinentes para o processo de execução de um conjunto de lajes nervuradas protendidas, incluindo a montagem do cimbramento, dos moldes, a instalação das cordoalhas, a concretagem, o tensionamento e os cuidados pós-execução. Serão discutidos também os principais desafios encontrados durante o processo e algumas das soluções adotadas para garantir a qualidade e o desempenho do conjunto.

Ademais, uma das dificuldades ao acesso dessa técnica construtiva é a falta de mão de obra especializada em protensão, que diminui a disponibilidade do produto. Outro ponto é a necessidade de um controle executivo e tecnológico mais rigoroso para que o sistema funcione com eficiência e segurança.

Espera-se que esse trabalho contribua para geração de conhecimento na área de lajes nervuradas protendidas, fornecendo informações relevantes e práticas sobre sua execução.

## **2. DIRETRIZES DO ESTUDO**

### **2.1 Objetivos**

O objetivo principal visa descrever e detalhar as etapas executivas de um edifício comercial de Porto Alegre composto por lajes nervuradas de concreto armado moldadas in loco com moldes plásticos, protendidas com cordoalhas engraxadas pós-tensionadas. Como objetivo secundário foi realizado uma revisão bibliográfica acerca do assunto.

### **2.2 Delimitações**

O trabalho proposto se delimita à análise e ao acompanhamento da execução das lajes nervuradas protendidas em uma edificação comercial de Porto Alegre por 9 pavimentos (6º ao 14º), desde a montagem das fôrmas até a etapa final de protensão dos cabos.

### **2.3 Limitações**

Dentro das limitações, a elaboração dos projetos não faz parte do escopo do trabalho. Outro ponto é que os trechos de laje maciça (não nervurada) do pavimento também estão excluídos da análise. Por último, a montagem dos pilares não será abordada na sequência executiva.

### **2.4 Metodologia**

Com relação à metodologia do trabalho, o mesmo baseia-se na realização de uma revisão bibliográfica versando sobre os elementos que compõem as lajes nervuradas protendidas, com ênfase na protensão com cordoalhas engraxadas e nas lajes nervuradas moldadas in loco com moldes plásticos, seguido por um estudo de caso que contempla a apresentação do empreendimento, uma análise acerca das concepções de projetos e executivas e, por fim, um detalhamento do sequenciamento das atividades construtivas.

### **3. REFERENCIAIS TEÓRICOS**

Este capítulo traz os conceitos necessários para a avaliação do estudo de caso, tratando do concreto protendido e das lajes nervuradas.

#### **3.1 Concreto Protendido**

Para Hanai (2005), o conhecimento sobre concreto protendido pode ser aplicado na prática da engenharia civil de diversas formas, como no projeto e construção de pontes, viadutos, edifícios, barragens, entre outras estruturas. Seu uso permite a redução do peso próprio das estruturas, aumentando a capacidade de vencer grandes vãos e suportar cargas elevadas. Além disso, o concreto protendido apresenta maior durabilidade, resistência à fadiga e à corrosão quando comparado ao concreto armado convencional, resultando em estruturas mais seguras, econômicas e eficientes.

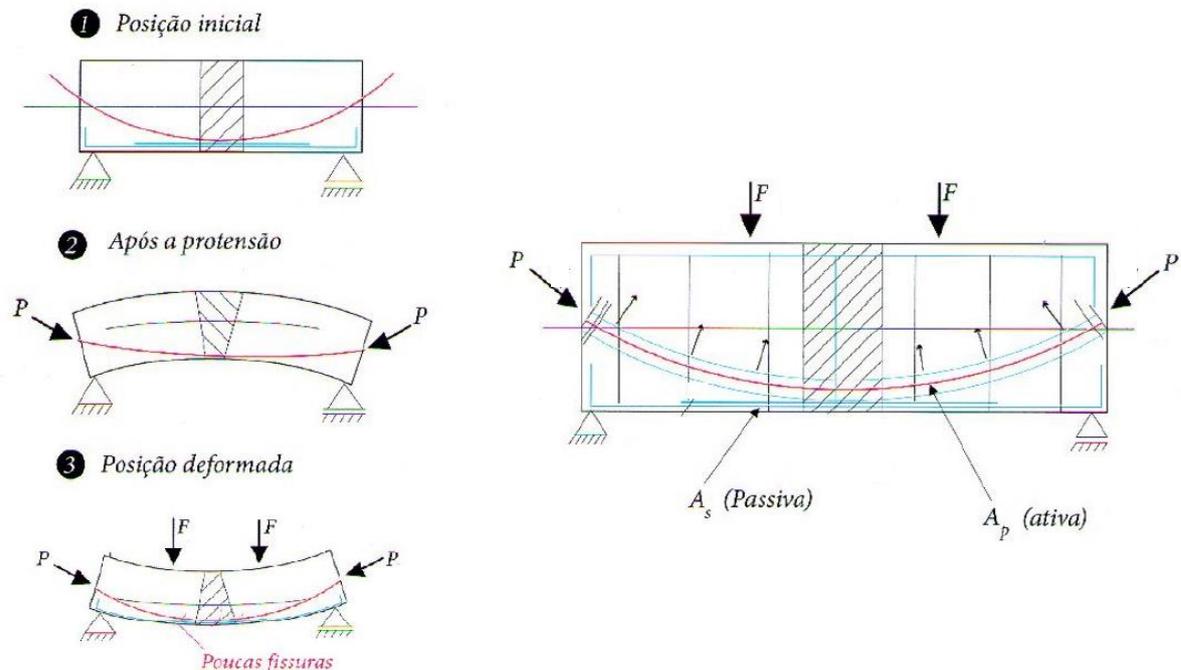
Nesse contexto, aplicar a técnica da protensão em uma estrutura de concreto armado representa a utilização de uma tecnologia inteligente, eficaz e duradoura, que permite maximizar o aproveitamento da resistência mecânica do concreto e do aço, reduzindo suas quantidades. Ademais, a protensão garante a construção de estruturas seguras e confortáveis (VERÍSSIMO e CÉSAR JR., 1998).

##### **3.1.1 Definição**

De acordo com Emerick (2005), as peças estruturais de concreto protendido são definidas pelas normas atuais como componentes estruturais que, a partir da introdução de forças externas, geram compressão no concreto a ponto de eliminar totalmente ou parcialmente as tensões de tração em serviço. Tais tensões podem resultar em fissuração e deformações, principalmente quando se trata de grandes vãos, visto que o concreto possui resistência à tração cerca de 10 vezes inferior que à compressão. Assim, o principal objetivo dos elementos protendidos, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), é impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura através do pré-alongamento da armadura ativa, causando uma redução na flecha e proporcionando um melhor aproveitamento das propriedades do aço de protensão e do concreto.

A Figura 1 exemplifica o conceito em uma estrutura de concreto protendido, onde  $F$  representa as cargas atuantes na peça,  $P$  a força de protensão,  $A_p$  a armadura ativa e  $A_s$  a armadura passiva.

Figura 1 – Exemplificação do conceito de protensão em uma estrutura de concreto protendido



(Fonte: adaptada de CHOLFE E BONILHA, 2015)

Ademais, a NBR 6118 (ABNT, 2014) também define armadura ativa como aquela constituída por barras, fios ou cordoalhas nas quais a força de protensão é aplicada, resultando em um pré-alongamento inicial do aço e em uma posterior força de compressão no concreto, enquanto a armadura passiva é composta por aço convencional para concreto armado e se caracteriza por não receber tal alongamento, atuando condicionada ao carregamento da estrutura.

Para Cholfe e Bonilha (2015), a protensão define-se como um processo mecânico onde o aço é tracionado dentro dos seus limites de resistência e segurança, visando atingir o máximo aproveitamento dos materiais constituintes do sistema através de uma força normal de compressão, que combate de maneira eficiente os esforços de tração e diminui consideravelmente a fissuração e as deformações (flechas).

### 3.1.2 Tipos de protensão

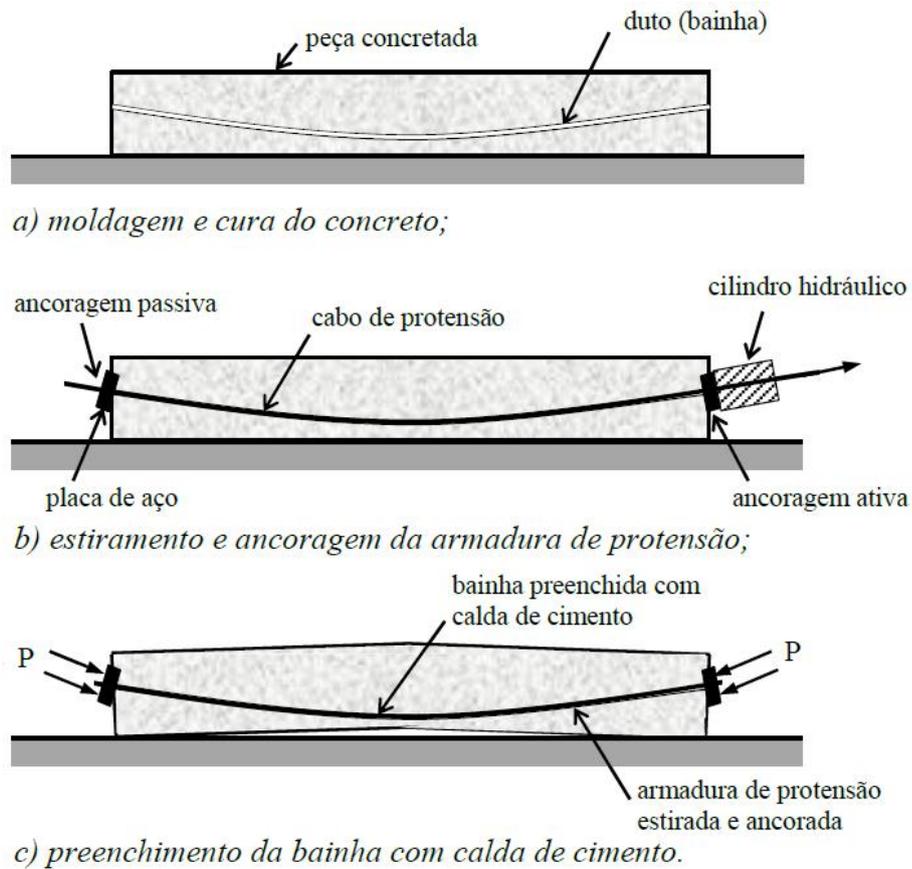
Conforme Cholfe e Bonilha (2015), as principais maneiras de classificar os tipos de protensão dizem respeito ao processo construtivo e à aderência, distinguindo-os como: pré-tração com aderência inicial, pós-tração com aderência posterior e pós-tração sem aderência posterior. Como o foco desse estudo está no uso de cordoalhas engraxadas, será feita uma breve contextualização a respeito dos dois primeiros tipos, com ênfase para pós-tração sem aderência posterior, abordada no item 3.2.

Tratando-se de protensão do tipo pré-tração com aderência inicial, a armadura ativa fica ancorada em dispositivos externos, normalmente blocos (contrafortes) nas cabeceiras das pistas de protensão, onde o aço é tracionado antes do lançamento do concreto. Após o endurecimento e cura do mesmo, as armaduras previamente tracionadas são liberadas, ancorando-se no concreto e transferindo a força de protensão por aderência. Esse sistema é muito utilizado para confecção de elementos pré-moldados protendidos, como vigotas e lajes alveolares (HANAI, 2005).

No que diz respeito ao tipo pós-tração com aderência posterior, pode ser definido como elementos protendidos nos quais o alongamento da armadura ativa acontece após o endurecimento do concreto, tendo como apoios partes internas do próprio elemento estrutural. São compostos por cordoalhas de aço especial que ficam isoladas do concreto em uma bainha metálica, a qual, no final do processo, recebe injeção de calda de cimento sob pressão, responsável pela aderência e por proteger as cordoalhas contra corrosão. As principais aplicações desse sistema são obras de médio e grande porte, com destaque para as de infraestrutura como pontes e viadutos. Ademais, o tensionamento dos cabos é feito com o uso de macacos hidráulicos e a transferência da força de protensão se dá através das ancoragens ativas e passivas, concretadas na peça. (CHOLFE E BONILHA, 2015).

A Figura 2 exemplifica uma peça protendida com pós tensão aderente.

Figura 2 - Sistema de protensão pós tensionado com aderência



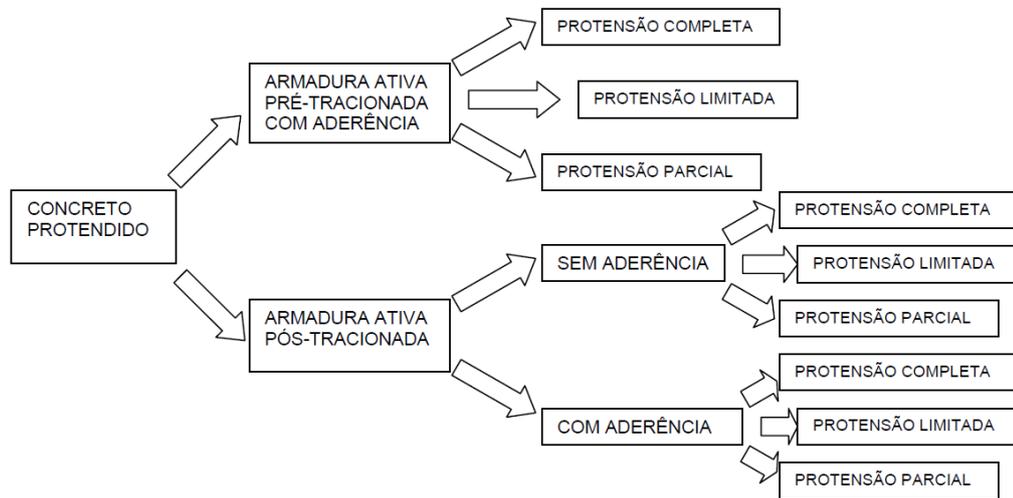
(Fonte: BASTOS, 2021)

Outro modo importante de classificação dos tipos de protensão, conforme Cazzo (2008), diz respeito aos níveis de protensão e aos limites de fissuração da zona tracionada, somados à classe de agressividade do ambiente. São três níveis:

- Nível 3: Protensão completa ou total: destinada para quando não se admite tração no concreto, sendo a armadura ativa responsável pela absorção total desses esforços;
- Nível 2: Protensão limitada: destinada a ambientes agressivos nos quais são admitidas tensões de tração moderadas em serviço, sendo exigida uma armadura passiva adicional no dimensionamento à ruptura e no controle da fissuração;
- Nível 1: Protensão parcial: similar a protensão limitada, mas destinada à ambientes menos agressivos, admitindo maiores tensões de tração em serviço e maior abertura de fissuras (inferiores a 0,2mm). Também exige armadura passiva complementar.

Em resumo, as possibilidades dos tipos de protensão de acordo com as classificações apresentadas anteriormente são ilustradas na Figura 3, conforme Pereira *et al.* (2005).

Figura 3 - Tipos de protensão classificados quanto aos sistemas e aos níveis de protensão



(Fonte: PEREIRA *et al.*, 2005)

Por fim, esse estudo de caso se enquadra na categoria de armadura ativa pós-tracionada sem aderência de protensão parcial (nível 1).

### 3.1.3 Vantagens e desvantagens

De acordo com Veríssimo e César Jr. (1998), a técnica de protensão oferece diversas características vantajosas, como:

- possibilidade de vãos maiores, com controle da fissuração e menores deformações, viabilizando a execução de projetos arquitetônicos mais ousados;
- potencial para recuperação e reforço de estruturas existentes, bem como a capacidade de utilização em ambientes agressivos;
- possibilidade de lajes mais esbeltas em comparação com as de concreto armado, reduzindo o consumo de materiais como concreto e aço;
- menor peso da estrutura e, conseqüentemente, menos carga sobre as fundações.

Ademais, Cauduro (2011) acrescenta:

- menores custos com manutenção, uma vez que se torna necessário o uso de materiais de melhor qualidade;
- redução no número de pilares, gerando melhor aproveitamento de espaço;

No que diz respeito às vantagens que o concreto protendido pós-tracionado apresenta quando comparado ao pré-tracionado, Cauduro (2011) afirma:

- maior continuidade estrutural dos componentes, principalmente quando se trata de elementos longos, uma vez que na pré-tração os elementos são pré-moldados e necessitam ser transportados;
- uso de mão-de-obra e materiais locais;
- uso de cabos com catenária, aumentando o aproveitamento e diminuindo o custo da armadura frouxa.

Adicionalmente, Cholfe e Bonilha (2015) enfatizam os benefícios da protensão quando se trata da durabilidade da estrutura, uma vez que o uso de materiais de melhor qualidade e a diminuição da fissuração na zona tracionada do concreto aumentam a proteção das armaduras contra o fenômeno da corrosão, um dos principais responsáveis pela redução da vida útil dos elementos.

Com relação às desvantagens, conforme Cholfe e Bonilha (2015), o concreto protendido necessita de atenção especial em alguns itens quando comparado ao concreto armado, são eles:

- corrosão: caso os cabos de protensão e os dispositivos de ancoragem estejam expostos às condições do ambiente, aumenta-se o risco de corrosão, que pode reduzir a eficácia da protensão e comprometer a integridade estrutural das cordoalhas, levando a uma diminuição da capacidade de suporte ou até mesmo a ruína da estrutura. Esse fenômeno necessita de maior atenção em ambientes agressivos, como regiões litorâneas ou com altos níveis de poluição;
- característica frágil: o concreto protendido apresenta características de ruptura frágil quando submetido a certas condições extremas de carregamento. Ao contrário do concreto armado, que apresenta um comportamento dúctil com fissuras visíveis antes da ruptura, o concreto protendido tende a falhar de forma repentina e sem aviso prévio. Essa falta de deformação visível antes da ruptura pode dificultar a detecção de problemas e aumentar o risco de colapso súbito em casos de falhas estruturais;
- maiores exigências de materiais: deve-se preconizar à qualidade e à seleção de materiais, exigindo concreto de alta resistência e aço especial para protensão;

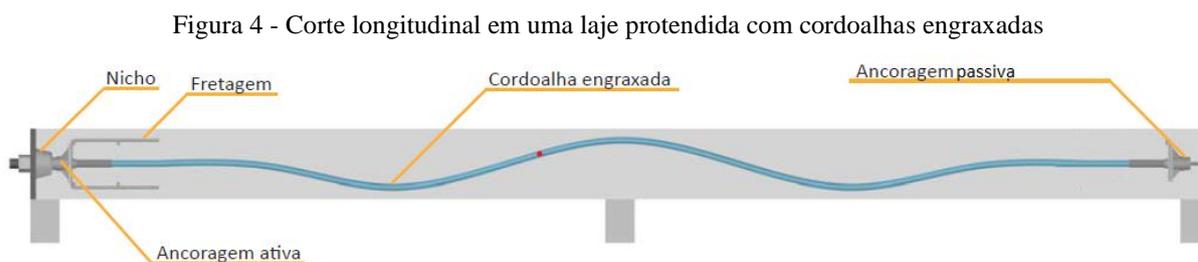
- maiores exigências de mão-de-obra: precisa ser treinada e especializada, o que dificulta seu acesso devido ao preço ser mais elevado e ocorrer escassez desses profissionais;
- maiores exigências de projeto: a complexidade do projeto também aumenta, exigindo análises estruturais mais detalhadas e considerações específicas da geometria e das cargas aplicadas. Essas demandas ressaltam a importância de uma abordagem criteriosa e segura em todos os processos, a fim de garantir o desempenho adequado da estrutura pretendida;
- maior controle executivo e da qualidade dos serviços: é fundamental que sejam adotadas medidas mais rígidas na execução a fim de garantir a correta montagem do sistema.

### 3.2 Protensão com cordoalhas engraxadas

Tendo como base a NBR 6118 (ABNT, 2014), o concreto protendido com armadura ativa pós-tracionada e sem aderência (cordoalhas engraxadas), objeto desse estudo de caso, é composto por elementos nos quais o alongamento da armadura ativa ocorre depois do endurecimento e ganho parcial de resistência do concreto, utilizando como apoios para as ancoragens partes do próprio elemento estrutural sem que haja aderência entre o concreto e o aço de protensão.

Em conformidade com Rudloff (2012), na protensão com cordoalhas engraxadas as cordoalhas de aço são revestidas por uma bainha plástica (polietileno ou polipropileno), que, juntamente com as ancoragens ativas e a passivas, formam os cabos de protensão. A presença da graxa permite o deslizamento das cordoalhas dentro das bainhas durante o processo de tensionamento, reduzindo consideravelmente o atrito entre os materiais. Após a concretagem e a cura do concreto, os cabos são protendidos e ancorados, causando compressão na estrutura.

A fim de exemplificar o sistema, a Figura 4 ilustra um corte longitudinal em uma laje genérica com cordoalhas engraxadas.



(Fonte: RUDLOFF, 2012)

Para Cauduro (2011), a camada de graxa nas cordoalhas funciona como uma excelente proteção contra a corrosão, além da bainha plástica extrudada proporcionar resistência e facilidade no manuseio. No canteiro, o posicionamento adequado das alturas dos cabos é facilitado com o uso de peças plásticas ou de aço (comumente chamadas de cadeirinhas). Já as ancoragens são relativamente simples e econômicas, compostas basicamente por placas fundidas, cunhas bipartidas e uma fôrma plástica padronizada para formar o nicho de entrada do bico do macaco. O macaco hidráulico é leve e permite o tensionamento de cordoalha em cordoalha em intervalos rápidos, além do processo não necessitar injeção de nata de cimento, simplificando a operação.

### **3.2.1 Materiais e Equipamentos**

#### **3.2.1.1 Aço de Protensão**

Segundo Cazzo (2008), os aços utilizados no concreto protendido são caracterizados por atingirem elevadas resistências (de três a quatro vezes mais que o aço convencional), e também por não apresentarem patamar de escoamento. Outro ponto é que os aços de protensão podem ser fornecidos em grandes comprimentos na forma de fios e cordoalhas, evitando a necessidade de emendas em peças estruturais com grandes vãos.

Ainda para Cazzo (2008), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece duas normas específicas para o aço de protensão: a NBR 7482 (ABNT 2020), que versa sobre fios; e a NBR 7483 (ABNT 2021), que trata das cordoalhas. Ademais, o aço pode ser encontrado em diferentes formas, incluindo: fios trefilados de aço carbono; cordoalhas de dois, três ou sete fios em forma de hélice e barras de aço-liga de alta resistência laminadas a quente. Para o sistema de cordoalhas engraxadas, são utilizadas cordoalhas de sete fios. Quanto à classificação, são caracterizadas pelo prefixo “CP” referente às iniciais de concreto protendido de acordo com o valor característico da resistência à tração, sendo usualmente encontradas no tipo CP190, material utilizado nesse estudo de caso e que possui suas características detalhadas na Tabela 1. Quanto ao tipo de tratamento, podem ser de relaxação normal (RN) ou de relaxação baixa (RB), sendo que os de relaxação baixa possuem características elásticas aprimoradas e menor perda de tensão por relaxação, havendo uma clara preferência por sua escolha no mercado brasileiro.

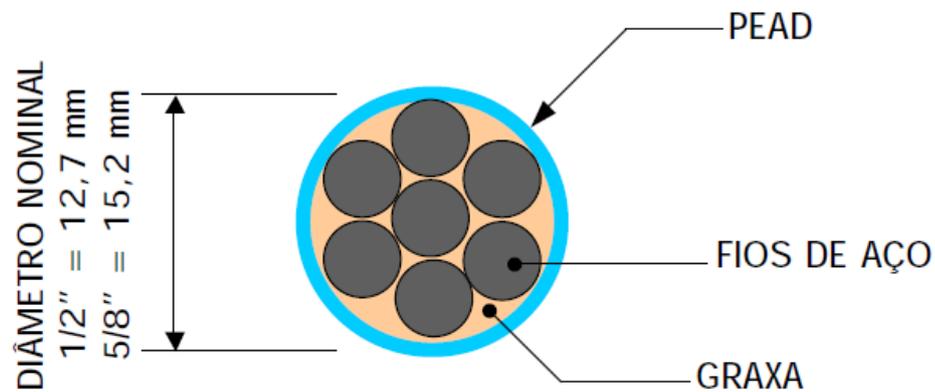
Tabela 1 - Características cordoalhas engraxadas com 7 fios - Aço CP190 RB

Tipo de cordoalha	Ø12,7mm (1/2")	Ø15,2mm (3/8")
Área mínima (mm <sup>2</sup> )	98,7	140,0
Área aproximada (mm <sup>2</sup> )	101,4	143,5
Peso linear com bainha e graxa (kg/m)	0,89	1,24
Carga de ruptura - $f_{ptk}$ (kN)	187,3	265,8
Módulo de elasticidade (GPa)	196	196
Alongamento após ruptura	3,5 %	3,5 %
Ø cordoalha + bainha (mm)	15,4	18,1

(Fonte: EMERICK, 2005)

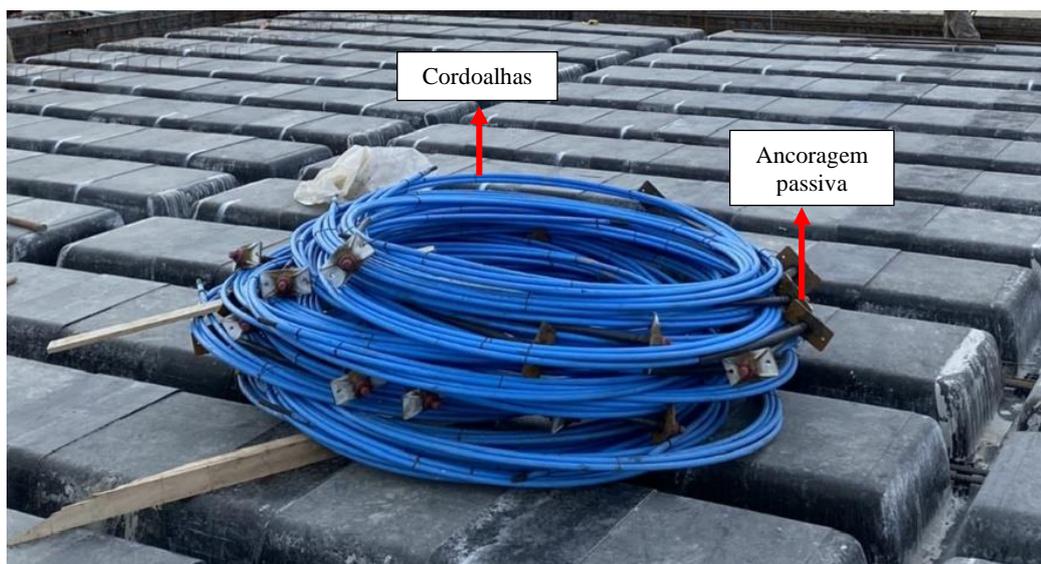
Para exemplificar, a Figura 5 ilustra a seção transversal de uma cordoalha engraxada com 7 fios, enquanto a Figura 6 mostra os cabos prontos para o uso, já dispostos no local em que serão utilizados.

Figura 5 - Seção de uma monocordoalha engraxada com 7 fios



(Fonte: EMERICK, 2005)

Figura 6 – Exemplificação dos cabos de protensão prontos para o uso



(Fonte: Autor)

### 3.2.1.2 Concreto

Conforme Veríssimo e César Jr., (1998), o controle de qualidade do concreto em estruturas protendidas demanda uma abordagem rigorosa, com exigências específicas relacionadas à realização de ensaios preliminares, monitoramento criterioso dos tipos de cimento e agregados empregados, além de uma fiscalização constante durante todas as etapas do processo (desde a elaboração até o lançamento e cura do concreto). Além disso, estruturas em concreto protendido necessitam de concretos com resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) superiores àquelas em concreto armado, com faixas de resistências mínimas entre  $30 \text{ MPa} < f_{ck} < 40 \text{ MPa}$ . Veríssimo e César Jr., (1998) ainda adicionam que a alta resistência se justifica devido a dois pontos principais: a elevada intensidade e concentração nas solicitações prévias causada pela introdução da força de protensão, geralmente maior que as cargas usuais de serviço; e ao maior módulo de elasticidade desses concretos, que contribui para diminuição da deformação e da fissuração.

Além de altas resistências, é fundamental que o concreto tenha boas características relacionadas à compacidade e à baixa permeabilidade, fatores essenciais na proteção contra corrosão das armaduras. Outras recomendações importantes são: selecionar cuidadosamente os agregados, materiais cimentícios, aditivos e possíveis adições da composição; determinar o traço acertadamente; utilizar aditivos que não prejudiquem a integridade das armaduras e executar a cura da maneira correta (CAZZO, 2008).

De acordo com Pereira et al. (2005), com relação às premissas normativas do concreto para protensão, a Tabela 2 e a Tabela 3, oriundas da NBR 6118 (ABNT, 2014), evidenciam uma maior preocupação e exigência no que diz respeito à necessidade de proteção contra às ações agressivas do ambiente, optando por parâmetros de projeto mais rigorosos quando comparados ao concreto armado convencional, principalmente no que diz respeito ao aumento de resistência e diminuição da porosidade, bem como ao maior cobrimento das armaduras, pontos fundamentais para que a segurança e a vida útil de projeto das estruturas sejam atendidas.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental, a relação água/cimento e a resistência mínima do concreto para cada ambiente, para o concreto armado e protendido

Concreto <sup>a</sup>	Tipo <sup>b, c</sup>	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.  
<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

(Fonte: ABNT, 2014)

Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento mínimo do concreto armado e protendido em diferentes elementos

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

(Fonte: ABNT, 2014)

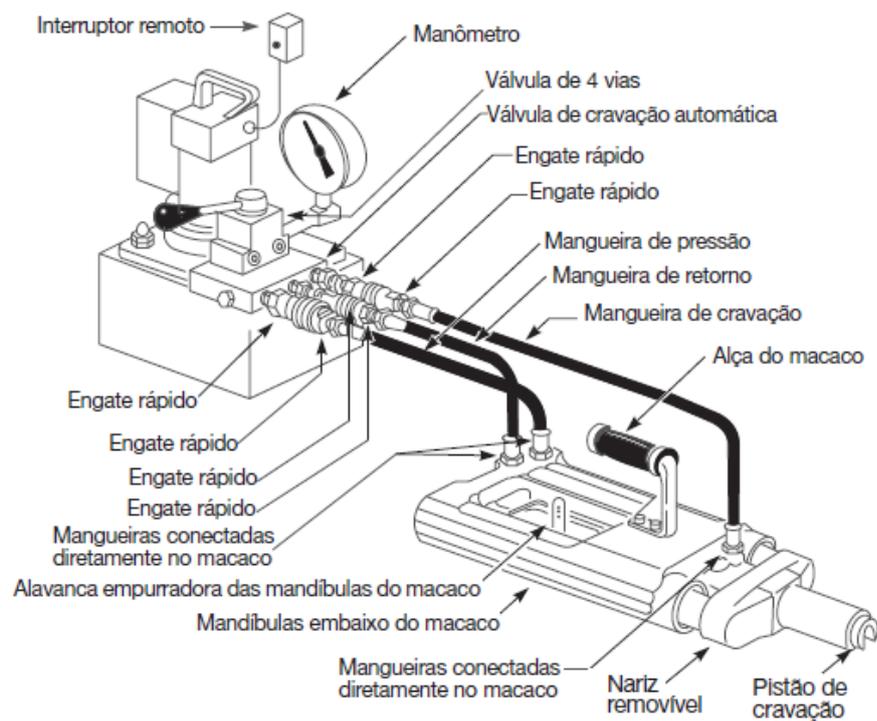
### 3.2.1.3 Macaco Hidráulico

Para que seja possível o tensionamento dos cabos de protensão são necessárias tensões muito elevadas, obtidas através de macacos hidráulicos que foram desenvolvidos no final da segunda guerra mundial. Esses, são constituídos por pistões circulares envolvidos por cilindros, acoplados com mangueiras e válvulas a uma bomba especial, responsável pela produção da força de protensão, capaz de gerar pressões na ordem de  $50 \text{ kN/cm}^2$  (CAZZO, 2008).

Segundo Emerick (2005), o macaco de protensão é o equipamento responsável pelo alongamento dos cabos e posterior cravamento das cunhas nas ancoragens. Como pontos a serem levados em conta, torna-se fundamental que periodicamente e com cuidado se realize a calibragem do macaco e do manômetro da bomba, uma vez que ambos fazem parte de um conjunto e precisam estar sintonizados. Também se evidencia a necessidade de manter os equipamentos de protensão armazenados em um lugar limpo, seco, com as manutenções em dia e sendo operado apenas por equipes especializadas.

A Figura 7 exemplifica em detalhes os componentes do principal tipo de macaco hidráulico utilizado para cordoalhas engraxadas.

Figura 7 – Detalhamento do macaco hidráulico de protensão utilizado para cordoalhas engraxadas



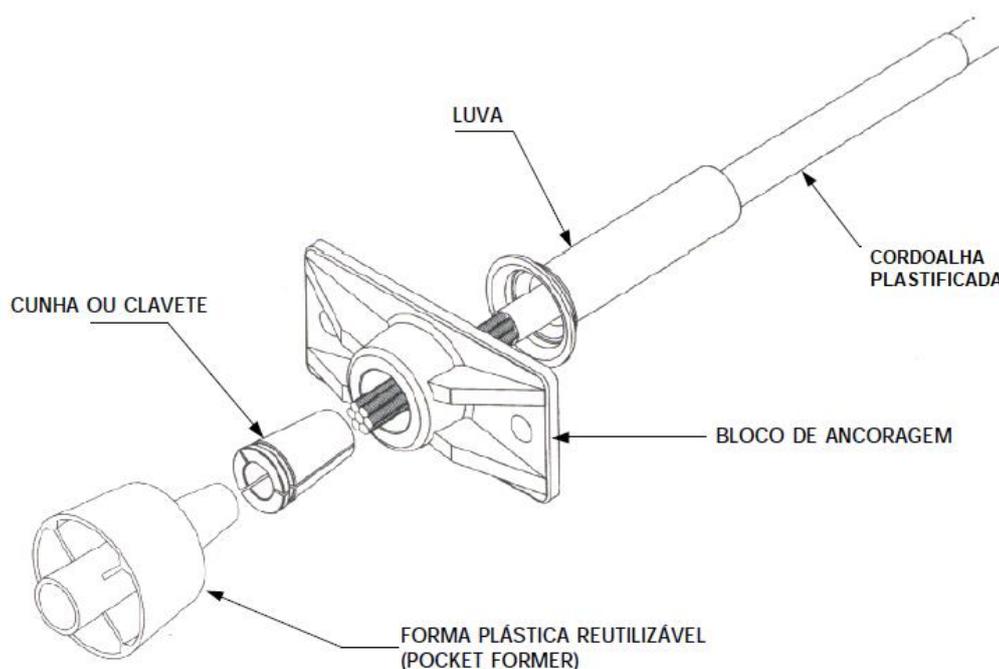
(Fonte: CAUDURO, 2011)

### 3.2.2 Ancoragem

Conforme Soares e Parente (2021), o sistema de ancoragem para cordoalhas engraxadas é composto por dois elementos nas extremidades dos cabos: ancoragem ativa (extremidade inicial, onde será aplicada a força de protensão) e ancoragem passiva (também conhecida como “ancoragem morta”, visto que fica imersa ao concreto, não recebe tensionamento e é posicionada na extremidade final do cabo). A principal finalidade das ancoragens é evitar que os cabos percam a carga adquirida pelo macaco hidráulico após o alongamento.

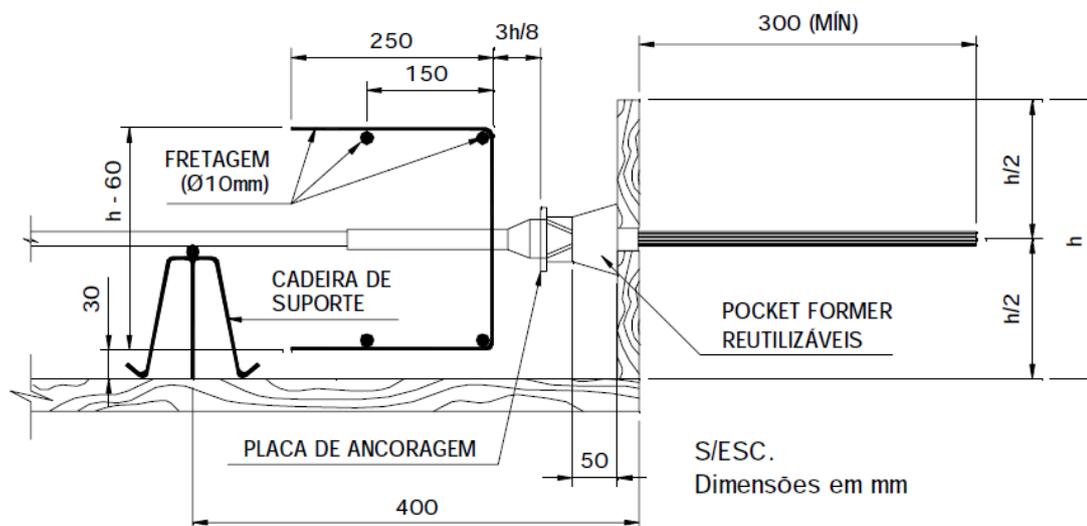
A fim de exemplificação, as Figuras 8 e 9 ilustram em detalhes os elementos da ancoragem ativa.

Figura 8 - Detalhamento dos componentes da ancoragem ativa



(Fonte: EMERICK, 2005)

Figura 9 – Corte transversal exemplificando um possível arranjo dos elementos da ancoragem ativa



(Fonte: EMERICK, 2005)

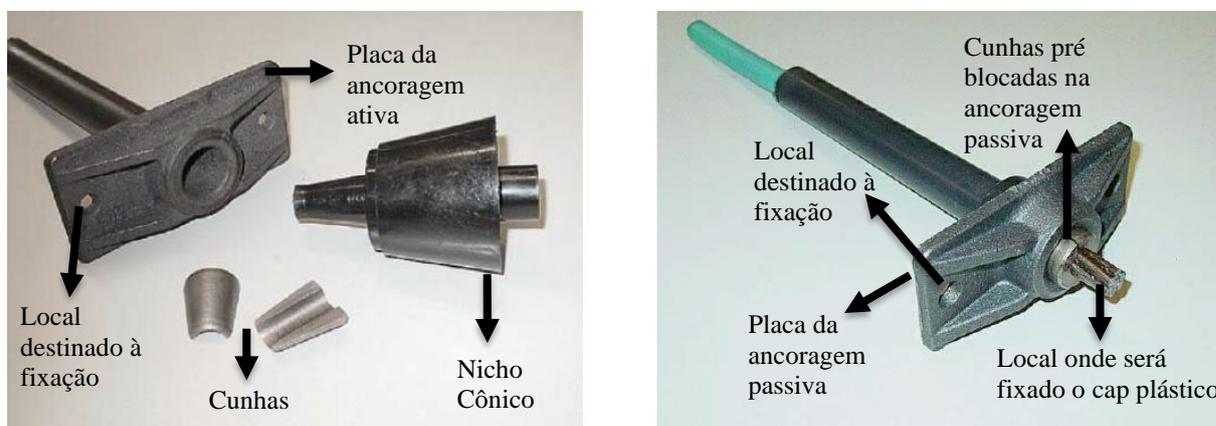
Complementando, Pereira et al. (2005) mencionam que a ancoragem ativa é composta basicamente por: placa/bloco de ancoragem (normalmente de ferro fundido dúctil, é o local onde a cunha, responsável pelo travamento do cabo, fica alojada); nicho cônico (peça de plástico utilizada temporariamente para moldar a abertura que permite o acesso do equipamento de protensão à placa de ancoragem) e cunhas. É importante pontuar que a ancoragem ativa necessita obrigatoriamente ser montada em obra.

Tratando-se da ancoragem passiva, também possui uma placa de ferro fundido que é fixada em elementos estruturais (geralmente vigas) na posição e altura final do cabo, com um cap plástico na ponta da cordoalha para evitar que haja contato com o concreto. Diferentemente da ancoragem ativa, o conjunto já chega em obra instalado nas cordoalhas, processo denominado de pré-blocagem, necessitando apenas ser posicionado e fixado na posição de projeto.

As cunhas para esse sistema geralmente são bipartidas, em formato troncocônico, rosqueadas e com função principal de fixar os cabos de protensão na placa da ancoragem ativa após o tensionamento, mantendo a carga aplicada pelo macaco hidráulico e impedindo com que o aço retorne ao estado original (sem carga). Uma vez que a força de protensão desejada tenha sido alcançada, elas são cravadas pelo macaco hidráulico. Assim, quando o cabo tentar retornar, terá seu movimento impedido pela cunha, causando a força de compressão no concreto. Tal esforço é absorvido pela própria cunha e pelos elementos que compõem a ancoragem ativa (VERÍSSIMO e CÉSAR JR, 1998).

A Figura 10 ilustra os elementos que compõem a ancoragem ativa (à esquerda) e passiva (à direita).

Figura 10 - Elementos da ancoragem ativa (esquerda) e passiva (direita)



(Fonte: adaptado de CAUDURO, 2011)

### 3.2.3 Armadura de fretagem

Para Emerick (2005), a armadura de fretagem tem por finalidade a mitigação das tensões de tração induzidas no concreto em decorrência da aplicação da força de protensão na ancoragem ativa, que gera altos esforços e pode ocasionar fendilhamento (abertura de fissuras em razão dessas cargas de tração) nessa região. Tais tensões surgem devido à área limitada de contato entre a ancoragem e o concreto, que resulta em um efeito restrito de transmissão de forças. Pode-se dizer também que nas cordoalhas engraxadas a fretagem serve como uma armadura de distribuição de tensões, composta por aço CA-50, geralmente com diâmetro de 10 mm, além do formato que se assemelha a um “C” (PEREIRA *et al*, 2005).

A Figura 11 ilustra a armadura de fretagem com uma vista em planta e um corte na região da ancoragem ativa onde a mesma deve ser instalada, exemplificando um possível esquema de montagem (a fretagem está representada na figura por “N1” e “N2”).



Tabela 4 - Sequência construtiva por etapas para uma laje protendida

<b>SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA</b>
1. Montagem das fôrmas que irão suportar a laje antes da protensão;
2. Instalação das ancoragens;
3. Colocação da armadura passiva inferior e de punção;
4. Distribuição dos cabos de protensão em planta;
5. Fixação dos cabos em elevação sobre os suportes (cadeirinhas), conforme projeto;
6. Colocação da armadura passiva superior;
7. Concretagem e cura do concreto;
8. Retirada das fôrmas verticais de borda;
9. Protensão dos cabos de acordo com o plano de protensão definido no projeto, com a obtenção dos alongamentos que também serão comparados aos de projeto;
10. Retirada gradativa das fôrmas;
11. Corte das pontas, proteção das ancoragens e fechamento (grauteamento) dos nichos, obedecendo a técnica específica.

(Fonte: RUDLOFF, 2009 apud COSTA, 2021)

#### 3.2.4.2 Documentos essenciais

Emerick (2005) afirma que os principais documentos que devem estar à disposição dos executores e fiscalizadores da obra são:

- projetos executivos com desenhos de execução e detalhamentos;
- especificação e certificação dos materiais utilizados;
- certificação de calibragem do macaco hidráulico;
- tabelas de alongamentos dos cabos aprovadas pelo responsável.

#### 3.2.4.3 Manuseio e armazenamento dos materiais

De acordo com Cauduro (2011), os pontos mais importantes a serem observados no que tange ao manuseio e armazenamento dos materiais são:

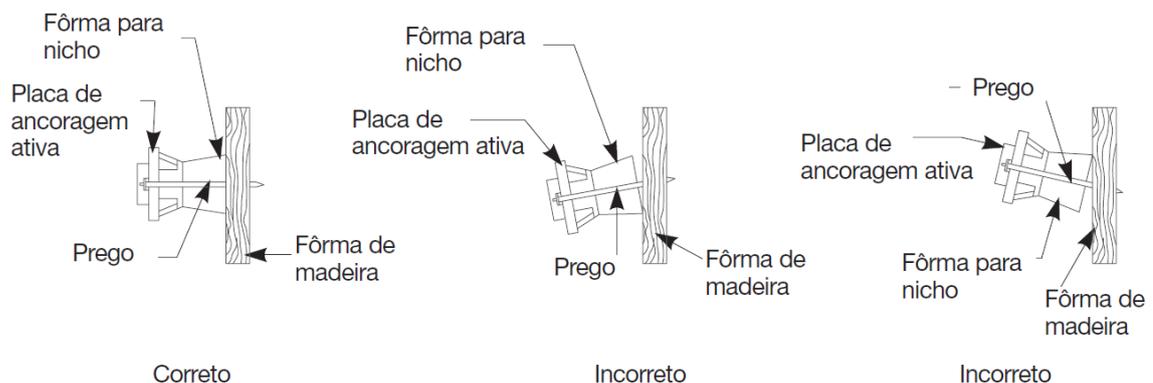
- o manuseio precisa mantê-los íntegros, não podendo danificar a capa de plástico que envolve as cordoalhas;
- a pré-blocagem da ancoragem passiva e o corte dos cabos devem ser realizados em local coberto e limpo, fora do canteiro de obras (se possível) e por pessoa qualificada;
- os materiais devem ser armazenados sobre estrados, em local seco e convenientemente ventilado, para evitar corrosão por condensação da umidade. A exposição ao sol também deve ser evitada, principalmente por longos períodos;
- não separar os macacos hidráulicos das bombas com as quais foram previamente calibrados.

#### 3.2.4.4 Montagem dos cabos

Conforme Emerick (2005), a montagem dos cabos é um dos fatores mais determinantes no sucesso do sistema de protensão. Assim, faz-se necessário a observância dos seguintes itens:

- o alinhamento vertical e horizontal dos cabos deve ser priorizado, mesmo que ocorra prejuízo em outros elementos. Nesses casos, o engenheiro projetista deverá ser consultado;
- a tolerância na colocação da altura dos cabos deve ser de  $\pm 5$  mm para lajes com espessuras até 25 cm e  $\pm 10$  mm para espessuras entre 25 e 60 cm;
- caso não seja possível a marcação das fôrmas de borda na altura correta para o posicionamento das ancoragens conforme detalhado em projeto, é fundamental que o engenheiro responsável seja notificado para reavaliar o sistema;
- para colocação dos nichos da ancoragem ativa, os furos das fôrmas laterais precisam ter 1,9 cm de diâmetro para cordoalhas com 12,7 mm e 2,5 cm de diâmetro para cordoalhas com 15,2 mm. Conforme a Figura 12, é fundamental que eles estejam perpendiculares à fôrma;

Figura 12 - Detalhe da fixação correta dos nichos de ancoragem na fôrma



(Fonte: CAUDURO, 2011)

- os suportes responsáveis pela altura dos cabos devem estar firmes o bastante para não serem movidos durante a concretagem. Ademais, a ligação entre o cabo e o suporte não pode causar interferências no traçado previsto em projeto.

Segundo Emerick (2005), a equipe de engenharia deve realizar de maneira minuciosa a fiscalização da montagem, dando ênfase para:

- firmeza e fixação das ancoragens;
- trechos de transição com bainhas plásticas impedindo o contato direto do concreto com as cordoalhas, principalmente na ancoragem ativa;
- verificação de possíveis danos no capeamento e pontos prévios de corrosão nos cabos;
- curvas de transição entre os pontos com aspecto de curvas suaves;
- alinhamento horizontal dos cabos;
- cobertura mínimo na ancoragem passiva de 2,5cm, variando conforme a agressividade do ambiente;
- verificação das armaduras passivas;
- posicionamento da armadura de fretagem;
- disposição e altura dos cabos conforme projeto;
- perpendicularidade dos cabos na ligação com as ancoragens;
- espaço útil para acomodação do macaco hidráulico na hora de protensão.

#### 3.2.4.5 Concretagem

Com relação ao lançamento do concreto, Cazzo (2008) sugere a adoção dos seguintes procedimentos:

- não utilizar em hipótese alguma aditivos que contenham cloretos;
- a equipe de engenharia deve inspecionar e validar todas as fôrmas, armaduras e cabos;
- caso aconteçam deslocamentos nas cordoalhas ou na armadura passiva, precisam ser corrigidos antes do seguimento da operação;
- vibrar cuidadosamente a região dos cabos e das ancoragens, evitando que ocorram vazios.

#### 3.2.4.6 Protensão e Acabamento dos cabos

Para Emerick (2005), é preciso estar atento aos seguintes itens no que diz respeito a etapa de protensão dos cabos:

- realizar a desforma lateral das vigas assim que possível, uma vez que os nichos plásticos são reutilizáveis e conforme o concreto endurece, sua remoção é dificultada;
- após a remoção dos nichos, deve-se fazer uma limpeza na cavidade da ancoragem ativa previamente à colocação das cunhas, para que não haja sujidades que interfiram no processo de cravação e alojamento das mesmas;
- não realizar a protensão dos cabos caso sejam encontradas falhas de concretagens;
- somente protender quando a resistência do concreto atingir os valores mínimos especificados em projeto, conforme ensaios de ruptura dos corpos de prova;
- sugere-se fazer uma marca com spray na ponta dos cabos, a uma distância constante do concreto, a fim de facilitar a medição do alongamento dos mesmos;
- os relatórios de alongamentos deverão ser encaminhados ao engenheiro responsável para que faça a aprovação;
- após a validação dos relatórios, deve ser feito o corte das pontas das cordoalhas na ancoragem ativa, deixando em torno de 2 cm, a fim de permitir um cobrimento mínimo de 2,5 cm com relação a face do concreto;
- por fim, os nichos deverão ser preenchidos com graute de baixa retração, sendo que a mistura não pode conter cloretos, sulfatos ou nitratos.

### 3.3 Laje nervurada

Conforme Sobrinho (2018), a laje nervurada surgiu como uma evolução natural da laje maciça, possibilitando redução significativa do volume de concreto por meio da criação de um arranjo rítmico de vazios. Esse sistema, ao reduzir a quantidade de concreto na região tracionada, permite vencer vãos maiores e apresenta maior flexibilidade arquitetônica, resultando em menos vigas e pilares. Além disso, oferece um desempenho estrutural mais eficiente em comparação com o sistema convencional. Lopes *et al.* (2013) apud Sobrinho (2018) evidenciam que, em estudos comparativos entre lajes maciças e nervuradas em um edifício residencial genérico analisado, houve redução de aproximadamente 11% no custo total ao adotar o sistema de lajes nervuradas, além de uma diminuição de quase 44% no peso próprio da estrutura.

### 3.3.1 Definição

De acordo com Bastos (2021), genericamente, as lajes podem ser definidas como elementos superficiais planos e bidimensionais, que possuem duas dimensões (comprimento e largura) em uma mesma ordem de grandeza, enquanto sua terceira dimensão, a espessura, é muito menor. Elas são utilizadas para receber as cargas aplicadas em uma edificação, como pessoas, móveis, máquinas e equipamentos, paredes e veículos. Habitualmente essas cargas atuam de maneira perpendicular ao plano da laje e podem ser divididas em 3 tipos: distribuídas na área, distribuídas linearmente ou de maneira concentrada. Normalmente, as cargas são transmitidas para as vigas de apoio nas bordas da laje, exceto quando estão apoiadas diretamente sobre os pilares.

Tratando-se de lajes nervuradas, a NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 97) as define como “[...] lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.” São recomendadas quando há a necessidade de vencer grandes vãos ou resistir a elevadas cargas verticais, com redução na quantidade final de pilares e vigas.

Ainda conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), para o projeto das lajes nervuradas devem ser obedecidas as seguintes condições:

- Fica dispensada a verificação a flexão da mesa em lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65cm. Para a verificação do cisalhamento na região das nervuras nesses casos permite-se a consideração dos critérios de laje;
- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa, sendo que as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se a verificação como laje se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;
- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando os seus limites mínimos de espessura.

### 3.3.2 Vantagens e desvantagens

Com relação às vantagens apresentadas pelas lajes nervuradas, Bastos (2021) destaca os itens abaixo:

- redução no peso da construção;
- redução no consumo de concreto devido aos vazios das fôrmas;
- melhor aproveitamento do concreto e do aço;
- facilidade executiva e redução de perdas com o uso de fôrmas pré-moldadas;
- maior capacidade de vencer vãos lisos (com menos pilares e vigas), liberando espaços e sendo vantajoso em locais como garagens;
- atendimento às exigências de incêndio.

No que tange às vantagens das lajes nervuradas moldadas *in loco*, Silva (2005) menciona que algumas merecem ser enfatizadas, são elas:

- versatilidade construtiva, podendo ser empregada em obras comerciais, residenciais, educacionais, hospitalares, “*shopping centers*”, entre outros;
- construção mais racionalizada, como o uso de telas na armadura de distribuição e a utilização de instalações elétricas embutidas;
- quando comparada às lajes maciças ou nervuradas pré-moldadas, são as mais recomendadas para vencer grandes vãos sem que haja deformações transversais excessivas.

Referente às desvantagens das lajes nervuradas moldadas *in loco*, Silva (2005) indica as seguintes:

- maior altura total da edificação, além de maior dificuldade na compatibilização com outros subsistemas;
- maior número de operações de montagem na execução;
- demanda significativa cobertura de concreto na mesa para manter as condições de cobrimento das armaduras negativas e de distribuição;
- maior atenção nas concretagens para evitar vazios de concretagem (“bicheiras”) nas nervuras;
- necessita de um cálculo estrutural mais elaborado e cuidadoso, uma vez que a seção transversal apresenta resistências diferenciadas para momentos fletores positivos e negativos;
- maior dificuldade de se adaptar a geometrias não retangulares.

Para Ribeiro et al. (2011) as principais vantagens das lajes nervuradas moldadas com cubetas plásticas dizem respeito a uma construção flexível, ágil e eficiente. Pode-se dizer que quando as nervuras se encontram na parte inferior, a seção transversal apresenta um formato otimizado

para absorver os esforços de momento positivo, uma vez que os esforços de tração se concentram nas nervuras, permitindo uma melhor distribuição das cargas atuantes e menores deformações, além de obras mais limpas. Também pode ser destacada a capacidade de reaproveitamento dos moldes e dos elementos do cimbramento, bem como a qualidade final de acabamento da laje, que agrega valor arquitetônico pela repetitividade e uniformidade. Acerca das possíveis desvantagens que podem ocorrer nesse sistema construtivo, destaca-se o elevado consumo de cubetas e elementos de escoramento, além da altura ser limitada pelos tamanhos padronizados dos moldes e de ser necessário acabamento com forro de gesso quando não se deseja manter suas características arquitetônicas (VIZOTTO; SARTORI, 2010).

### **3.3.3 Laje nervurada moldada *in loco***

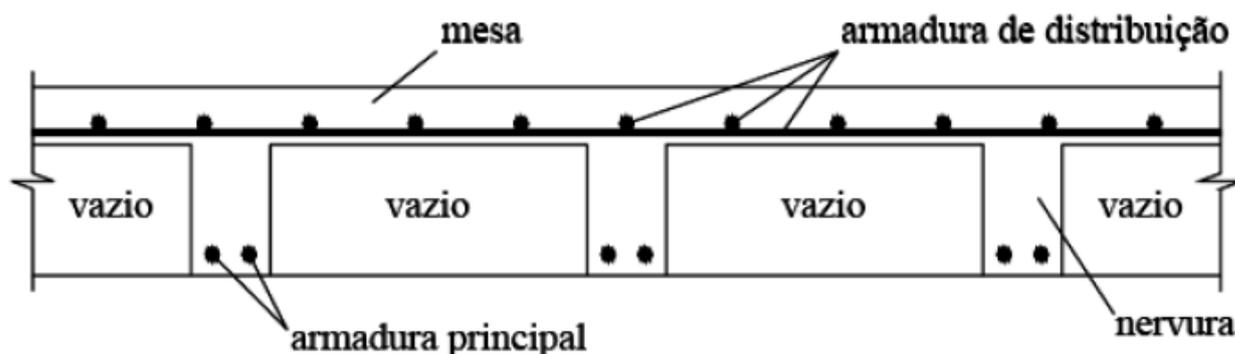
Conforme Bocchi Jr e Giongo (2007) apud Pereira (2014), as lajes nervuradas moldadas *in loco* (Figura 13) são constituídas por uma série de nervuras/vigas unidas entre si por uma mesa de concreto, com seção transversal em forma de T (Figura 14), concretadas na posição definitiva em que serão utilizadas. Caracterizam-se pela linha neutra estar situada próxima a região da mesa, com a zona de tração (onde ocorrem momentos positivos) nas nervuras. São eficientes no combate desses esforços, que são absorvidos pelas armaduras principais nas nervuras, enquanto os esforços de compressão são contidos pela mesa de concreto e pela armadura de distribuição (POTT *et al.*, 2019). Contam com os seguintes materiais para sua execução: concreto, aço CA-50, moldes, materiais de enchimento (quando necessário), cimbramento e mão-de-obra (SILVA, 2005). Os moldes podem ser de madeira, metálicos ou de plástico reutilizável, enquanto o cimbramento, que é a estrutura de suporte, é composto por escoramento metálico ou de madeira (FEIJÓ e DUTRA, 2014). O uso de moldes plásticos (polipropileno) vem ganhando cada vez mais o mercado devido a sua praticidade e rapidez na montagem, além de facilitar a desforma devido a inclinação das suas faces laterais. (BASTOS, 2021). Com relação aos materiais de enchimento, quando optados por sua escolha, devem ser leves e inertes, já que não possuem função estrutural, como placas de isopor, elementos cerâmicos ou blocos de concreto celular (SILVA, 2005).

Figura 13 - Exemplo de laje nervurada.



(Fonte: FEIJÓ e DUTRA, 2014)

Figura 14 - Detalhe típico de corte transversal em laje nervurada direta.



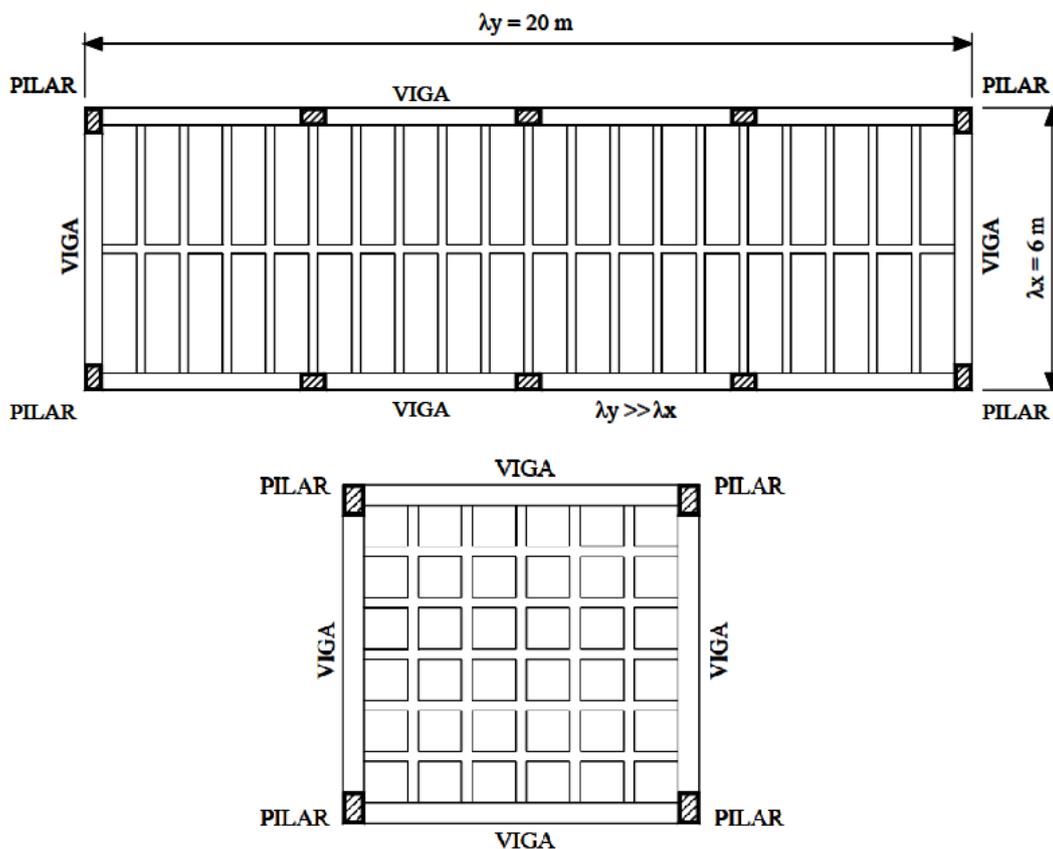
(Fonte: SILVA, 2005 apud PEREIRA, 2014)

Conforme Silva (2005), as classificações mais habituais das lajes nervuradas moldadas *in loco* referem-se ao tipo da seção transversal e à posição das nervuras em planta. Tratando-se dos tipos de seção transversal, podem ser classificadas em direta, invertida e dupla. A mais encontrada é a direta, onde as nervuras estão localizadas abaixo da mesa de compressão, a exemplo da Figura 14, com o momento fletor positivo da laje sendo resistido pelas nervuras. Já nas lajes duplas, as nervuras situam-se entre duas mesas, uma inferior e outra superior, e seu uso é indicado para lajes que devem resistir a momentos positivos e negativos. São difíceis de construir e estão praticamente em desuso. Por fim, nas invertidas as nervuras são superiores, situando-se acima da mesa de compressão; seu uso é restrito para casos onde há a necessidade de combater de forma mais efetiva momentos negativos (balanços).

Ainda para Silva (2005), com relação à posição das nervuras em planta, podem ser classificadas em unidirecionais (armadas em uma direção) e bidirecionais (armadas nas duas direções ou em cruz). Nas unidirecionais, as nervuras são dispostas na direção do menor vão teórico e dependendo das dimensões do vão, pode ser necessário o uso de nervuras longitudinais com a função de travamento e distribuição de esforços concentrados ou parcialmente distribuídos. Seu critério de utilização condiciona-se à relação entre o maior e o menor vão da laje ser superior a dois. Já nas bidirecionais, que são utilizadas quando a relação entre o maior e o menor vão é inferior a dois, há uma diminuição dos esforços e das deformações, bem como uma melhor distribuição das ações atuantes nos apoios, com maior gasto de concreto e armaduras.

A Figura 15 visa exemplificar essa classificação, tendo na parte superior uma laje armada em uma direção (unidirecional), enquanto na parte inferior é disposta uma laje armada nas duas direções (bidirecional) com todas nervuras ortogonais entre si.

Figura 15 - Exemplificação de laje nervurada unidirecional (acima) e bidirecional (abaixo).



(Fonte: SILVA, 2005)

Outra distinção importante diz respeito à vinculação das lajes, que podem ser apoiadas em paredes estruturais (apoio contínuo), em vigas (apoio contínuo) ou diretamente sobre pilares (apoios discretos). Quando apoiadas em vigas, que é o caso desse trabalho, podem ter as bordas simplesmente apoiadas ou engastadas. Sabe-se que quando ocorre engastamento dos contornos das lajes há uma redução dos momentos fletores positivos e, por consequência, uma diminuição das deformações. Uma das maneiras de criar esse engastamento é eliminando as nervuras nas regiões do perímetro, criando-se um trecho maciço, contínuo e armado (SILVA, 2005). Também é importante ressaltar que para grandes vãos sem a presença de vigas intermediárias se torna interessante o uso de capitéis, que consistem em regiões maciças armadas nos pilares decorrentes do engrossamento da laje com a finalidade de reduzir as tensões de flexão (EMERICK, 2005).

Com relação ao sistema de fôrmas, a NBR 15696 (ABNT, 2009) define como estruturas temporárias com a finalidade de dar forma ao concreto fresco, suportando todas as forças geradas pelas pressões do lançamento até que o concreto adquira a capacidade de se sustentar por conta própria. O objetivo principal das fôrmas é conferir ao concreto armado a geometria especificada no projeto durante a fase construtiva.

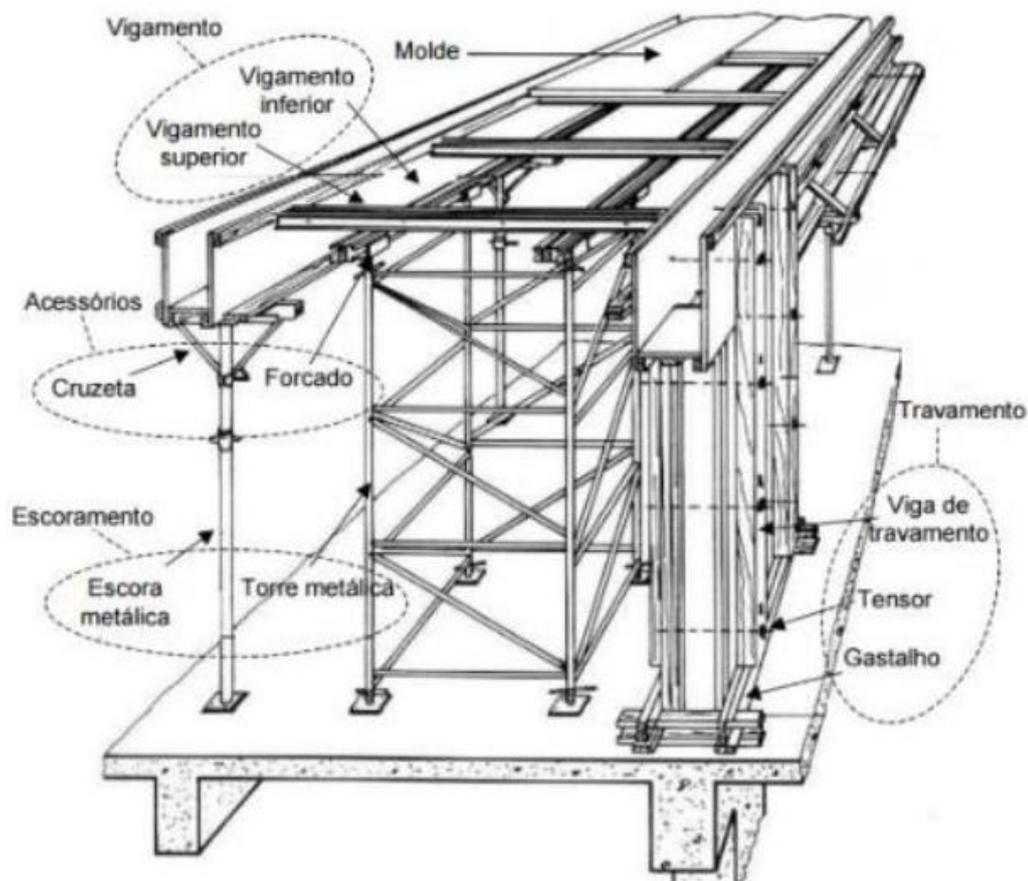
Para Freire e Souza (2001) apud Schmitt (2021), o sistema de fôrmas contempla o molde, o cimbramento e os componentes complementares, conforme apresentado a seguir:

- molde: responsável por entrar em contato com a superfície do concreto, moldando-a de acordo com os materiais utilizados;
- cimbramento: elementos responsáveis pela absorção ou transferência das cargas que atuam nas fôrmas. Pode ser dividido em quatro grupos:
  - escoramento: peças verticais resistentes aos esforços de compressão;
  - vigamento: peças horizontais submetidas à esforços de flexão originados de carregamentos verticais;
  - travamento: peças verticais ou horizontais submetidas à esforços de tração e/ou flexão oriundos de carregamentos horizontais;
  - mãos-francesas: peças inclinadas para contenção horizontal.
- materiais complementares: acessórios que auxiliam o restante dos elementos a desempenharem suas funções.

Para exemplificar, a Figura 16 apresenta os elementos responsáveis pelo sistema de fôrmas mencionados acima. É importante enfatizar que diferentemente desse exemplo, o molde

principal desse estudo de caso é constituído por cubetas (peças de polipropileno). Entretanto, vale ressaltar que o cimbramento e os componentes complementares são válidos para ambos os casos e que o contorno das lajes, composto por faixas maciças, bem como as vigas (elementos de apoio das lajes), utilizam molde liso com chapas compensadas, como demonstrado abaixo.

Figura 16 - Exemplo dos componentes do sistema de fôrmas.

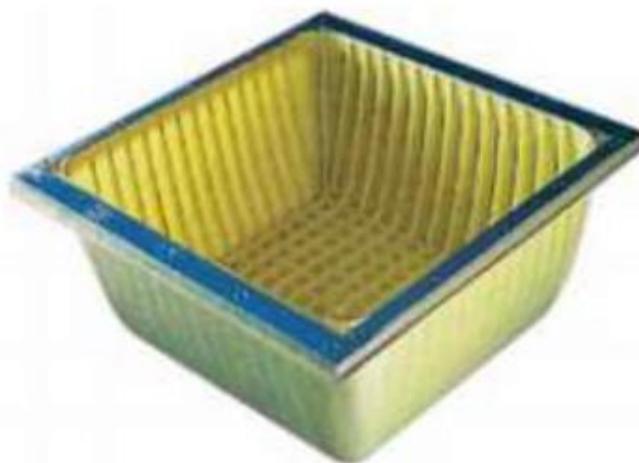


(Fonte: FREIRE E SOUZA, 2001 apud SCHMITT, 2021)

Com relação aos moldes plásticos (Figura 17), Silva (2005) os caracteriza como elementos de polipropileno reforçados internamente, conhecidos popularmente como “cubetas”, reaproveitáveis, com precisão dimensional e possibilidade de diferentes tamanhos padronizados, além de um acabamento final satisfatório. Ademais, são leves e de fácil manuseio, apoiados sobre o vigamento superior do cimbramento, dispensando o uso de assoalho. Possuem suas faces laterais levemente inclinadas para facilitar a desforma, que se torna um processo simples e manual, não necessitando de ar comprimido. Esse material normalmente é fornecido por empresas especializadas no ramo, que alugam moldes e sistemas

de escoramento próprios (normalmente metálicos). É fundamental que o conjunto garanta a estanqueidade durante a concretagem, garantindo encaixes precisos e evitando vazamento da nata de cimento. Outras características importantes referentes os moldes de polipropileno são: boa resistência química, baixa absorção de umidade, boa resistência ao impacto, atóxicos, baixo custo com relação aos plásticos e baixa aderência ao concreto (PEREIRA, 2014). O uso de desmoldantes também é recomendado sempre que necessário, uma vez que facilita a desforma e evita quebras devido à aderência do material no concreto (VIZOTTO; SARTORI, 2010).

Figura 17 - Molde plástico em polipropileno – “cubeta” - bidirecional



(Fonte: PEREIRA, 2014)

Conforme Ribeiro et al. (2011), o sistema construtivo com moldes plásticos utiliza dois métodos principais de instalação. No primeiro e mais tradicional, as cubetas são distribuídas sobre fôrmas de madeira, que são apoiadas sobre vigas e escoras metálicas. No segundo e mais usual, as cubetas são apoiadas diretamente nas vigas metálicas montadas sobre cabeçotes deslizantes, dispensando o uso de assoalho, como é o caso desse trabalho.

De acordo com Sobrinho (2018), os moldes bidirecionais, a exemplo da Figura 17, também permitem a execução de lajes nervuradas unidirecionais através do uso de “tapa nervuras”, que unem as cubetas e tornam vazios os espaços das nervuras, reduzindo a quantidade de concreto e de aço.

No que diz respeito ao cimbramento e aos componentes complementares das lajes nervuradas moldadas in loco, Barros e Melhado (2006) apud Pereira (2014) os caracterizam como um

conjunto provisório de elementos de sustentação, como escoras e vigamentos, fabricados em madeira ou aço, projetados para suportar o peso próprio da estrutura, possíveis cargas extras, efeitos do vento ou ocorrências de alagamentos durante o processo de construção com segurança e estabilidade. Seu objetivo principal é evitar deformações indesejáveis na fôrma da estrutura e minimizar os esforços exercidos sobre o concreto durante sua fase de endurecimento.

Acerca dos tipos de cimbramento, Pereira (2014) acrescenta que são divididos em função do material, que pode ser de madeira ou metálico. No sistema em madeira, as mais utilizadas são o Pinus e o Cedrinho que, quando bem projetadas e executadas, apresentam bons resultados econômicos, apesar de serem menos práticas quando comparadas ao sistema metálico. No sistema metálico são utilizadas peças tubulares de aço ou de alumínio, telescopadas e graduadas, compostas principalmente por escoras pontuais, torres metálicas e vigas (primárias – madres e secundárias – barrotes). Os acessórios mais utilizados são sapatas e suportes ajustáveis para regular a altura das torres; diagonais transversais tubulares com a finalidade de contraventar horizontalmente; colunas de amarração e braçadeiras (fixas ou reguláveis), que servem para alinhar e travar as torres em vários níveis entre si, evitando deformações e deslocamentos indesejados (PEREIRA, 2014).

Esse estudo de caso fez o uso do sistema de cimbramento metálico, conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Exemplo de cimbramento metálico nas lajes nervuradas



(Fonte: Autor)

Por fim, esse trabalho utilizou lajes nervuradas com seção transversal do tipo direta (nervuras inferiores - abaixo da mesa - responsáveis pelos esforços de momento fletor positivo), moldadas *in loco*, apoiadas em vigas perimetrais e com as bordas engastadas, armadas de maneira unidirecional (devido ao uso de tapa nervuras), com moldes pré-moldados de polipropileno (cubetas) sobre vigas metálicas deslizantes, contando com faixas maciças no perímetro e engrossamento na região dos pilares (capitéis).

## 4. ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo é apresentado o empreendimento onde foi realizado o estudo de caso, bem como as concepções de projeto, executivas e as etapas construtivas referentes à execução das lajes nervuradas protendidas com cordoalhas engraxadas.

### 4.1 Informações sobre o empreendimento

Esse trabalho refere-se à execução de lajes nervuradas protendidas com cordoalhas engraxadas em um edifício comercial (Figura 19) edificado na cidade de Porto Alegre, composto por 3 subsolos e 18 pavimentos acima (incluindo cobertura), restrito à análise do 6º ao 14º pavimento, totalizando o acompanhamento de 9 andares.

Figura 19 – Edifício objeto de estudo desse trabalho



(Fonte: Arquivo da Construtora)

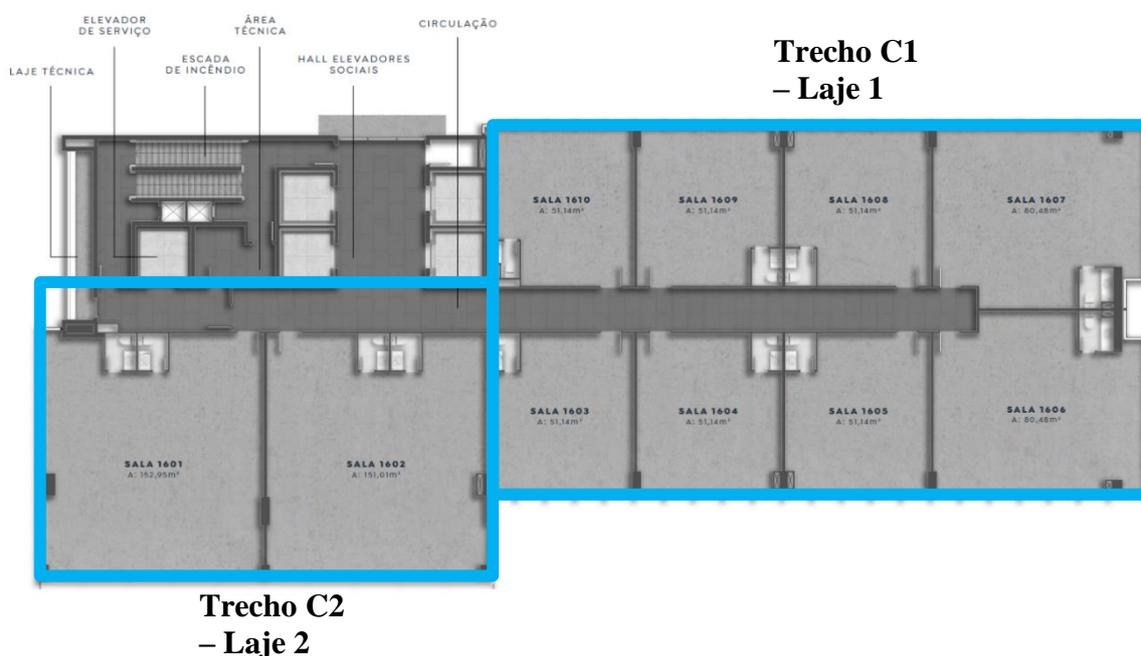
Executado em estrutura mista de concreto armado e protendido, o empreendimento possui lajes protendidas tipo repetidas em 12 pavimentos (6º ao 17º), sinalizadas na Figura 20 por retângulos

azuis. Cada andar, com pé direito de 3,5m, contará com salas comerciais de 51m<sup>2</sup> a 156m<sup>2</sup>, podendo ser transformado em lajes corporativas de até 771m<sup>2</sup>.

Além disso, possui 225 vagas de estacionamento nos subsolos e está situado dentro de um complexo comercial com aproximadamente 85 mil m<sup>2</sup> construídos, com um *shopping center* e outra torre comercial menor, contando com integração e acesso facilitado ao *shopping center* do 3º subsolo ao 5º pavimento. Ademais, conta com recuo frontal de 20m e pilares e vigas inclinadas na fachada principal, que trazem destaque para sua arquitetura juntamente com o revestimento externo em vidros laminados.

A estrutura do pavimento tipo analisado é composta majoritariamente por duas lajes nervuradas protendidas, identificadas pela construtora como “Trecho C1” e “Trecho C2”, conforme a Figura 20, sendo que esse trabalho se restringe a sua análise. É importante salientar que na região dos elevadores, escadas, halls e áreas técnicas foram empregadas lajes maciças, que não fazem parte desse estudo.

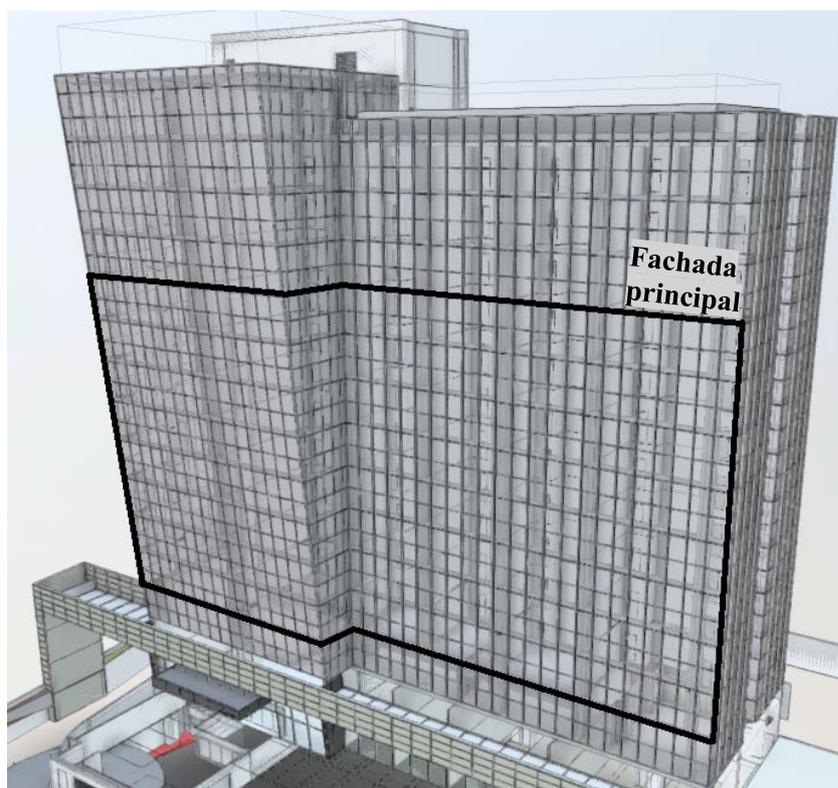
Figura 20 – Identificação das lajes protendidas e exemplificação do pavimento tipo



(Fonte: Arquivo da Construtora)

A Figura 21 ilustra em um modelo 3D os pavimentos acompanhados nesse trabalho (6º ao 14º).

Figura 21 – Modelo 3D dos pavimentos acompanhados no estudo de caso



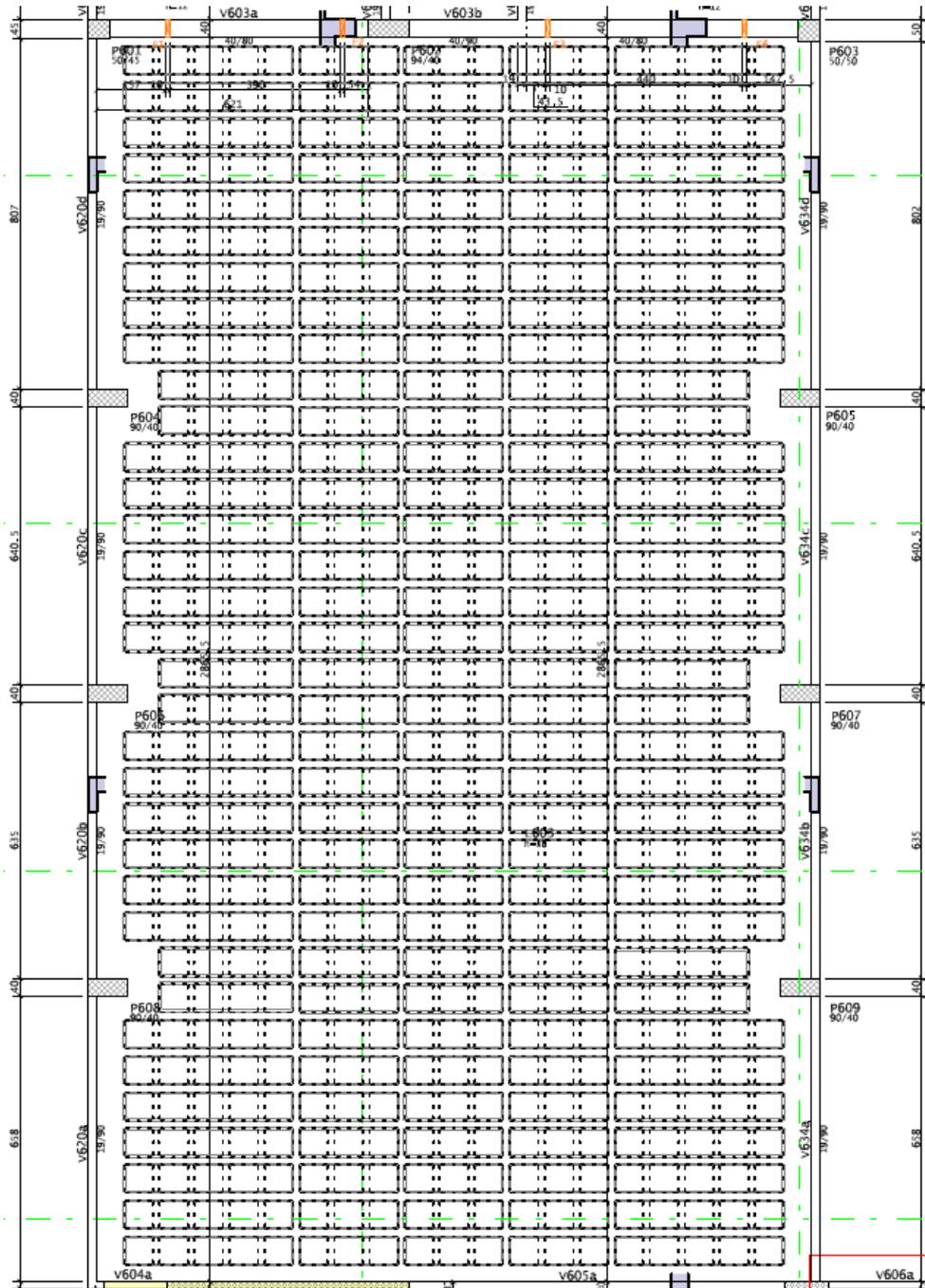
(Fonte: Arquivo da Construtora)

## 4.2 Concepções de projeto e executivas

### 4.2.1 Fôrma

Com relação à geometria do projeto estrutural, cada pavimento conta com dois trechos de lajes nervuradas protendidas, como já mencionado. A laje do trecho C1 (Figura 22) possui 28,66m de comprimento (maior vão), 16,31m de largura (menor vão) e área fixa de 465,6m<sup>2</sup>. Está apoiada diretamente sobre 10 pilares, sendo que 6 desses, os centrais, contam com capitéis. Ademais, possui 4 vigas de borda e trechos maciços armados ao longo de todo seu perímetro, maior nas duas laterais que na parte superior e inferior.

Figura 22 – Planta geométrica da laje do trecho C1



(Fonte: Arquivo da Construtora)

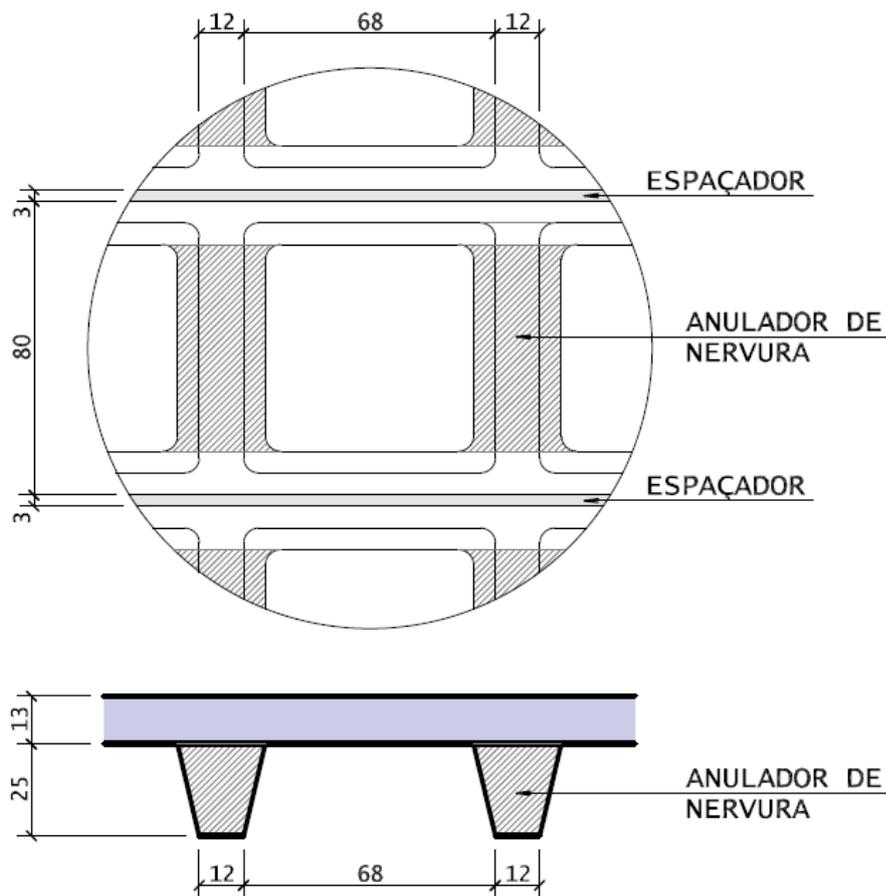
Já o trecho C2, exemplificado com o 8º pavimento pela Figura 23, possui 20m de comprimento (maior vão) e 13,4m de largura (menor vão), com área total de 260m<sup>2</sup>, estando engastado em 6 vigas. Destaca-se que a largura da laje é variável ao longo dos pavimentos devido à inclinação de três pilares e da viga de borda na lateral direita (fachada principal da edificação), que gera um aumento proporcional a 10% da altura do pé direito (3,5m) a cada subida de pavimento, resultando em 35cm de crescimento na largura da laje a cada novo andar edificado. Também



com uma mesa concreto superior de 13cm, totalizando 38cm de espessura total da laje, conforme a Figura 24. Ambos os trechos nervurados fazem o uso de tapa nervuras (Figura 25), que anulam a maior parte das nervuras na direção do maior vão da laje e transformam os moldes bidirecionais em blocos unidirecionais, armados e protendidos majoritariamente na direção do menor vão, reduzindo o consumo de concreto e de aço. Nesse caso também foram necessárias nervuras longitudinais (4 no trecho C1 e 2 no trecho C2 – 8º pavimento, conforme Figuras 22 e 23, respectivamente), com função de travamento e melhor distribuição dos esforços.

Para execução de um pavimento tipo foram necessárias aproximadamente 1000 unidades de cubetas inteiras (80x80x25cm), 30 unidades de ½ cubeta (40x80x25cm) utilizadas quando necessário no trecho C2 e 1000 unidades de tapa nervuras (80x25cm). Todo material foi locado de empresa especializada nesse sistema de fôrmas.

Figura 24 – Detalhamento geométrico das cubetas utilizadas



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 25 – Exemplificação do tapa nervura utilizado

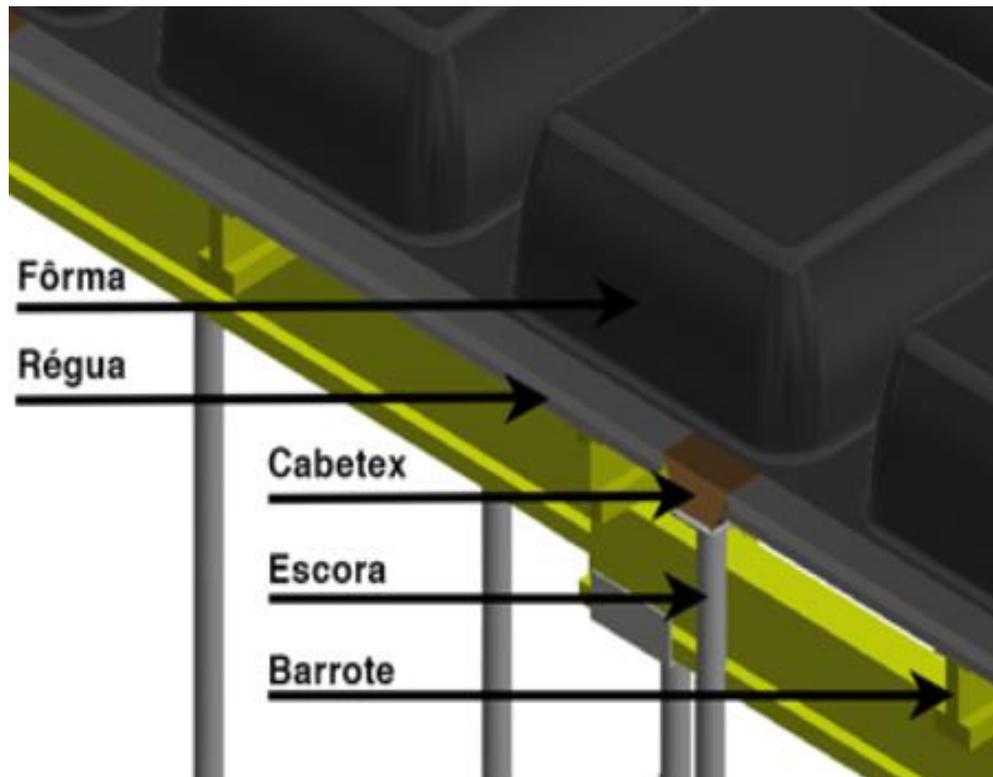


(Fonte: Autor)

Além disso, também foram necessárias peças de montagem adicionais: cerca de 385 unidades de réguas metálicas com 150cm de comprimento e 3cm de largura, que ficam apoiadas e travadas sobre o vigaento superior (barrotes), servindo como trilho para as cubetas além de serem espaçadores e responsáveis pelo encaixe das mesmas; somadas a 385 unidades de peças metálicas denominadas de “Cabtex”, com a finalidade de unir duas réguas e servir como ponto de apoio para o reescoramento após a concretagem, possibilitando rapidez na desforma das torres de andaime e dos moldes plásticos, necessários para a execução do pavimento seguinte.

As Figuras 26 e 27 visam exemplificar o sistema utilizado.

Figura 26 – Componentes do sistema de fôrma utilizado



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 27 - Sistema de fôrma montado em obra



(Fonte: Autor)

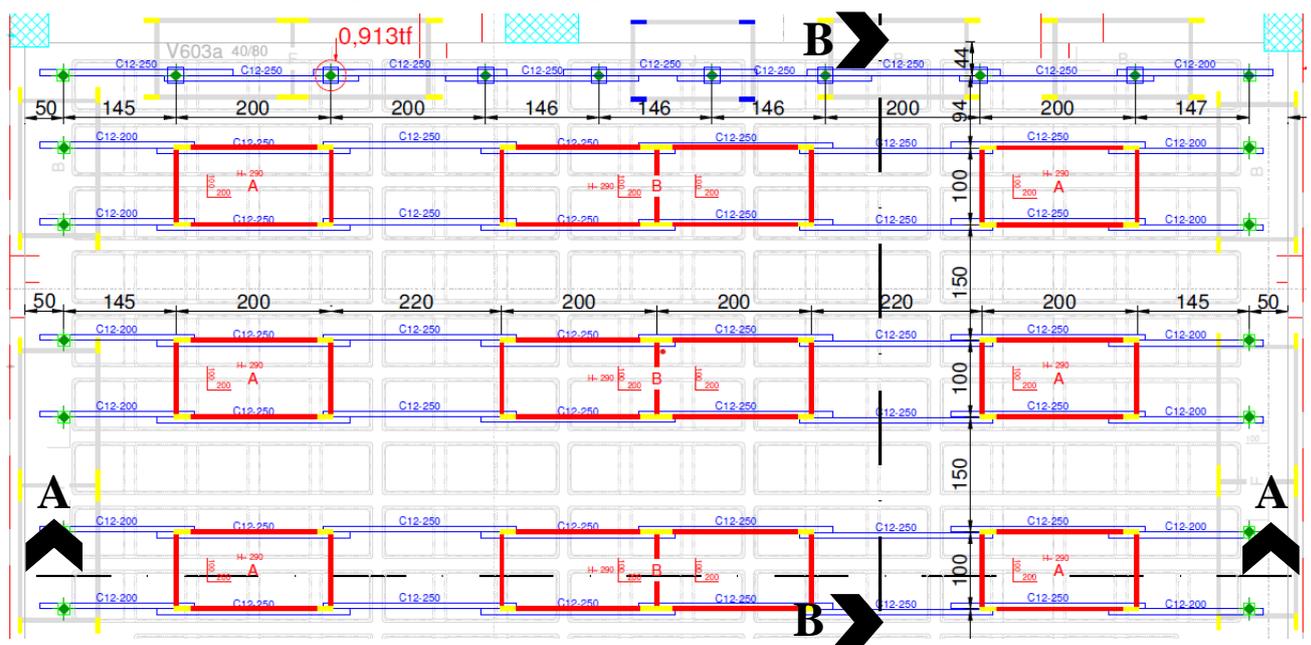
No que diz respeito a montagem dos trechos maciços, das vigas e dos pilares, utilizou-se como molde painéis de chapa compensada plastificada 18x1220x2440mm, sarrafos (2,5x5cm e 2,5x7cm), meio pontaletes (3,5x7cm) e pontaletes (7x7cm), todos compostos por madeira de pinus.

Referente ao cimbramento foram utilizados materiais metálicos locados de empresa especializada no ramo.

Para o escoramento (peças verticais resistentes aos esforços de compressão), tanto nas lajes quanto nas vigas usou-se torres metálicas (sinalizadas na Figura 28 por retângulos vermelhos) com adição de escoras (pontos verdes no perímetro) dotadas de cruzetas, tripés, forçados e prolongadores reguláveis. Para montagem dessas torres foram necessárias sapatas e suportes ajustáveis; diagonais transversais tubulares; colunas de amarração e braçadeiras (fixas ou reguláveis).

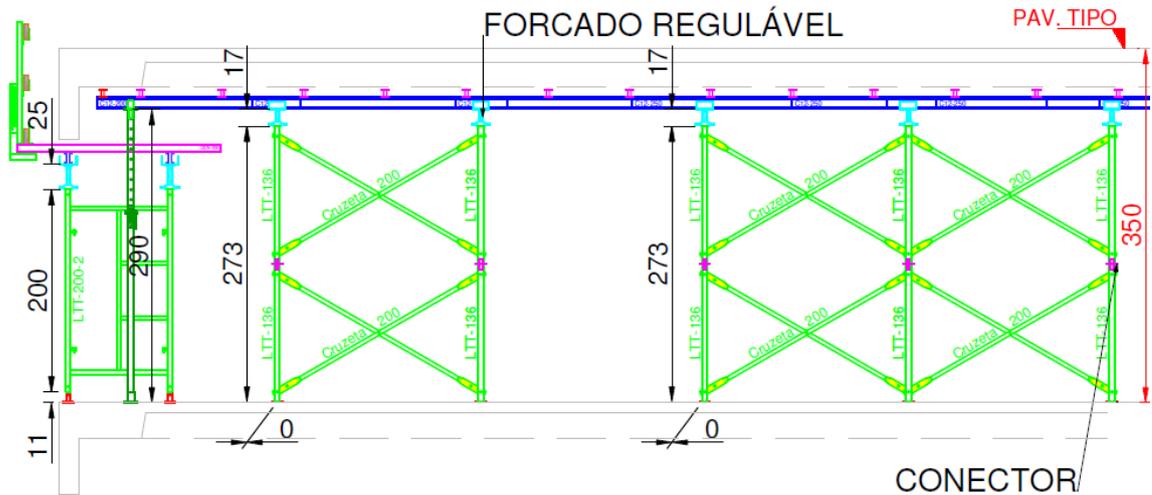
Nesse sentido, as Figuras 28, 29 e 30 exemplificam o esquema de montagem de projeto do escoramento em um trecho da laje C1, ilustrando uma vista em planta e dois cortes (identificados pela linha tracejada e pelas setas pretas). Todas figuras estão representadas em centímetro.

Figura 28 – Exemplo do projeto de escoramento – C1



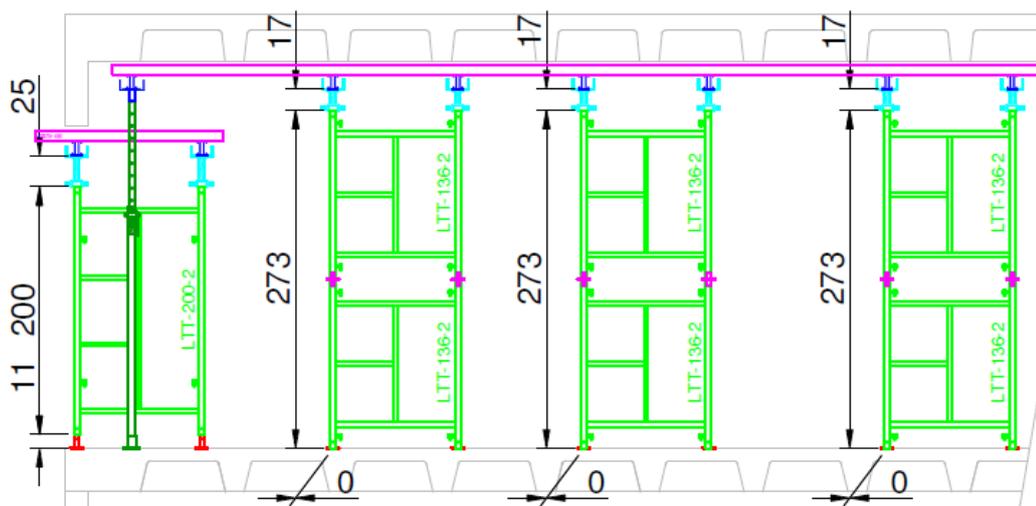
(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 29 – Representação do corte AA – C1



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 30 – Representação do corte BB – C1



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Com relação aos vigamentos, o inferior (identificado nas Figuras 28 e 29 em cores azuis) é composto por dois perfis metálicos tipo C-12mm unidos por elementos metálicos, com 15cm de altura e comprimentos de 200cm, 250cm e 300cm. São peças intermediárias que servem como apoio ao vigamento superior, transferindo suas cargas para o escoramento vertical. Pode-se dizer que fica apoiado nos forcados das torres metálicas e das escoras e serve como suporte para os barrotes.

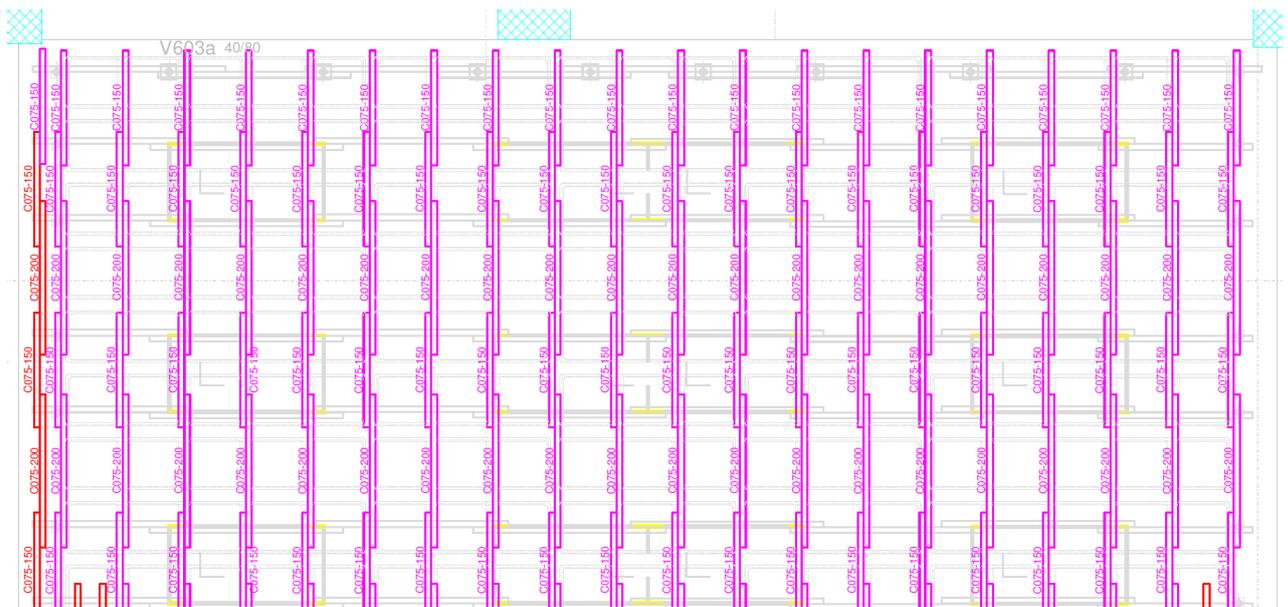
Já o vigamento superior é formado por dois perfis metálicos tipo C-7,5mm unidos por elementos metálicos, com 15cm de altura e comprimentos de 150cm e 200cm. Tais elementos

contam com um sarrafo de madeira entre os dois perfis, onde são fixadas as régua e as chapas compensadas (regiões maciças). É importante ressaltar que no sistema utilizado, conhecido por ser deslizante, as cubetas são apenas encaixadas nas régua, que ficam travadas nos barrotes. Esses, por sua vez, são apoiados e deslizam sobre as madres. O espaçamento máximo entre barrotes permitido em trechos nervurados é de 80cm, enquanto em trechos maciços é de 48,8cm.

Essa mobilidade possibilita facilidade no alinhamento dos moldes, mas pode ser um risco para segurança dos trabalhadores. Assim, faz-se necessário o uso de uma rede de proteção junto à trama que elimina os riscos de queda.

A Figura 31 ilustra o projeto do vigamento superior – barrotes - no mesmo trecho da laje C1 apresentado na Figura 28.

Figura 31 – Exemplo do projeto de vigamento superior no trecho C1

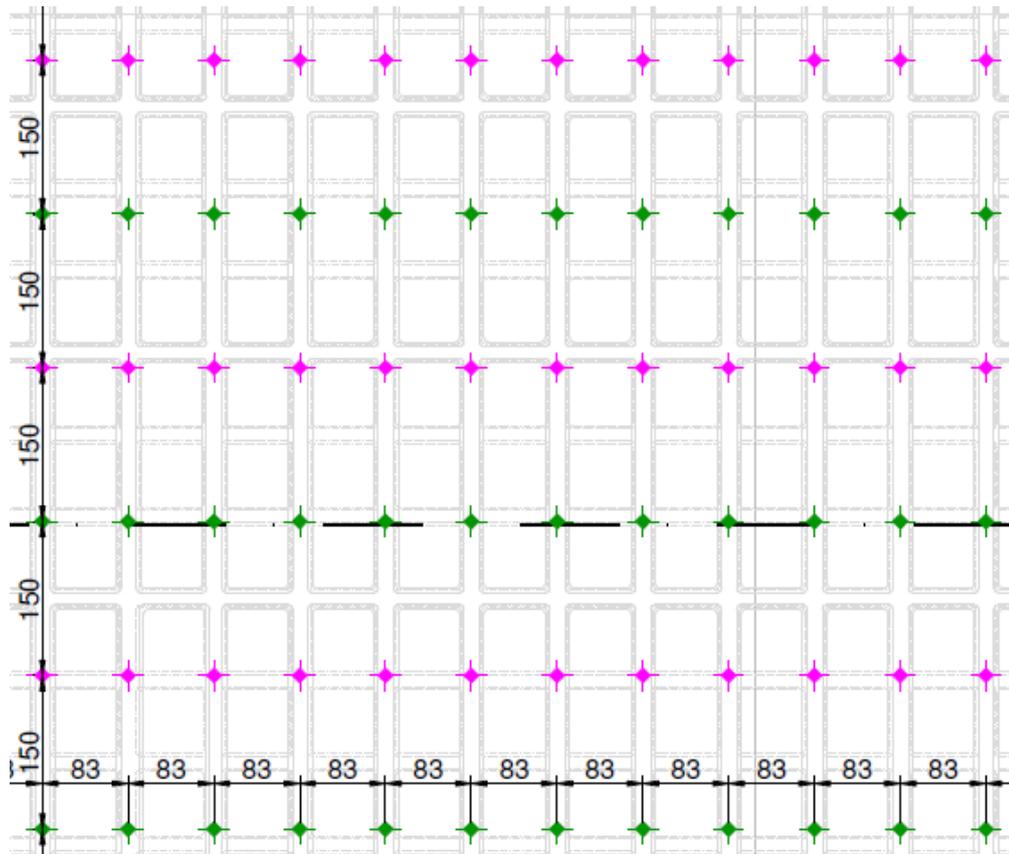


(Fonte: Arquivo da Construtora)

Por fim, tratando-se do reescoramento, etapa necessária para que seja possível a desforma do cimbramento e dos moldes plásticos após a concretagem, foram utilizadas escoras metálicas apoiadas diretamente nos Cabetex dispostas em todas nervuras a uma distância de 150cm e sinalizadas na Figura 32 pelos pontos verdes e magentas.

O resultado após a execução dessa fase pode ser visto na Figura 33.

Figura 32 – Exemplo do projeto de reescoramento - C1



(Fonte: Arquivo da Construtora)

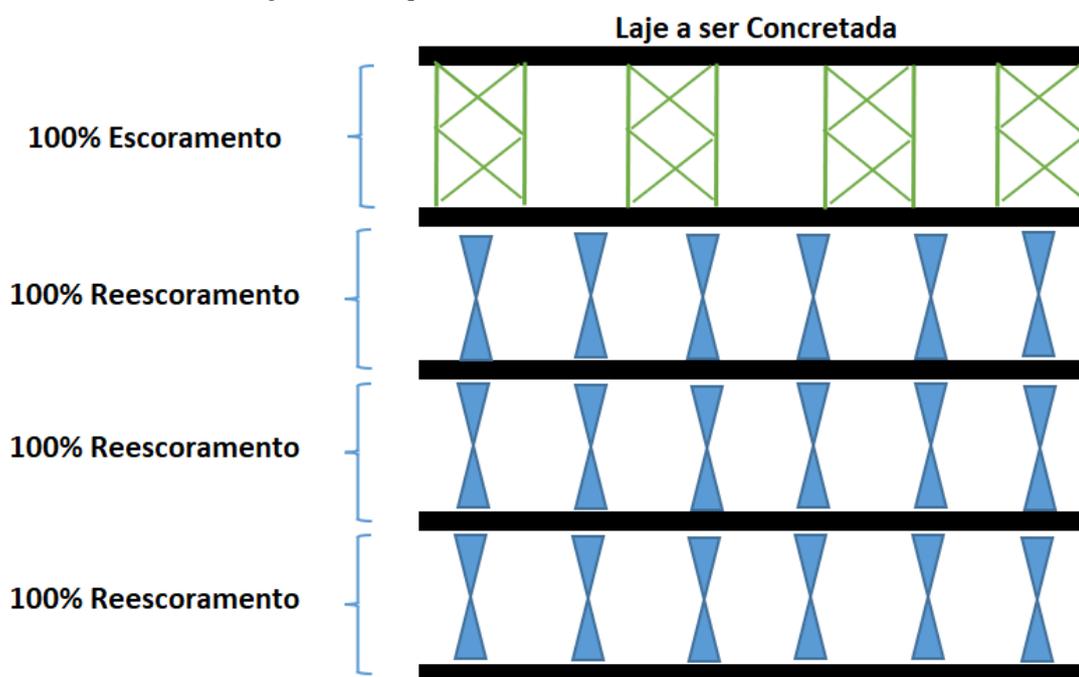
Figura 33 – Exemplo do reescoramento executado *in loco* – C1

(Fonte: Autor)

Ademais, inicialmente propusera-se um esquema de reescoramento presente em 3 pavimentos abaixo daquele que continha as torres metálicas, com os 2 primeiros estando 100% reescorado e o último, mais distante da concretagem, 50% reescorado (por isso a diferenciação entre cores na Figura 32). Entretanto, por opção da construtora e a fim de mitigar riscos de fissuras e deformações indesejadas, decidiu-se manter os 3 pavimentos abaixo com 100% do reescoramento (Figura 34).

Assim, para execução completa do cimbramento foram necessários materiais suficientes para 1 pavimento referentes ao escoramento e aos vigamentos (torres metálicas, guias, barrotes e afins) e 3 pavimentos tratando-se das escoras para o reescoramento.

Figura 34 – Esquema do sistema de escoramento utilizado



(Fonte: Autor)

## 4.2.2 Protensão

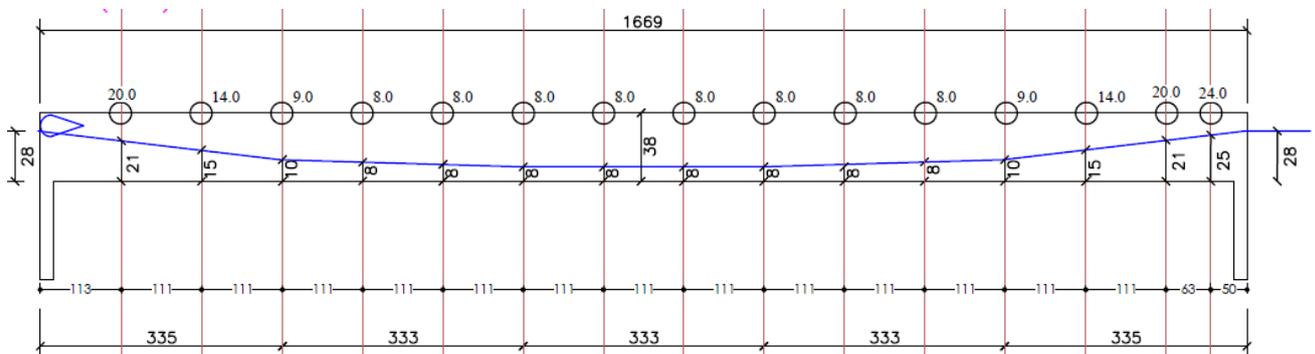
Para o sistema de protensão foram utilizadas cordoalhas engraxadas com 15,2mm de diâmetro do tipo CP190 RB, tracionadas a uma força de 21.000kgf cada. Todas as nervuras protendidas contêm 2 cabos de protensão, que estão posicionados na linha de atuação do momento fletor (paralelos ao menor vão da laje). No trecho C1 há um total de 33 nervuras protendidas, enquanto

no trecho C2 são 16 nervuras protendidas, totalizando 66 e 32 cabos por pavimento, respectivamente.

Para o trecho C1 foram utilizados cabos com 17,2m de comprimento (16,69m úteis e 0,51m externos à laje, para possibilitar o encaixe do macaco de protensão), totalizando 1135,2m de cabos por pavimento.

Nota-se pela Figura 35 que os cabos (em azul) iniciam nas ancoragens na altura de 28cm com relação ao fundo da laje, formando uma parábola e atingindo a cota mínima de 8cm nos pontos centrais, totalizando uma flecha útil de 20cm. Os círculos indicam a altura e a posição dos suportes de fixação (cadeirinhas), que possibilitam a execução das cotas conforme o projeto. Para tal foram utilizadas cadeirinhas metálicas com 24cm, 20cm, 14cm e 9cm. Já nos trechos de 8cm preferiu-se pelo uso de treliças metálicas contínuas com 7cm de altura e 4,2mm de diâmetro. Um ponto a ser observado é que a altura final dos cabos difere em 1cm (para mais) que os suportes, uma vez que a medida de projeto é dada a partir do eixo dos cabos, que são fixados sobre dos suportes.

Figura 35 – Perfil longitudinal dos cabos no trecho C1

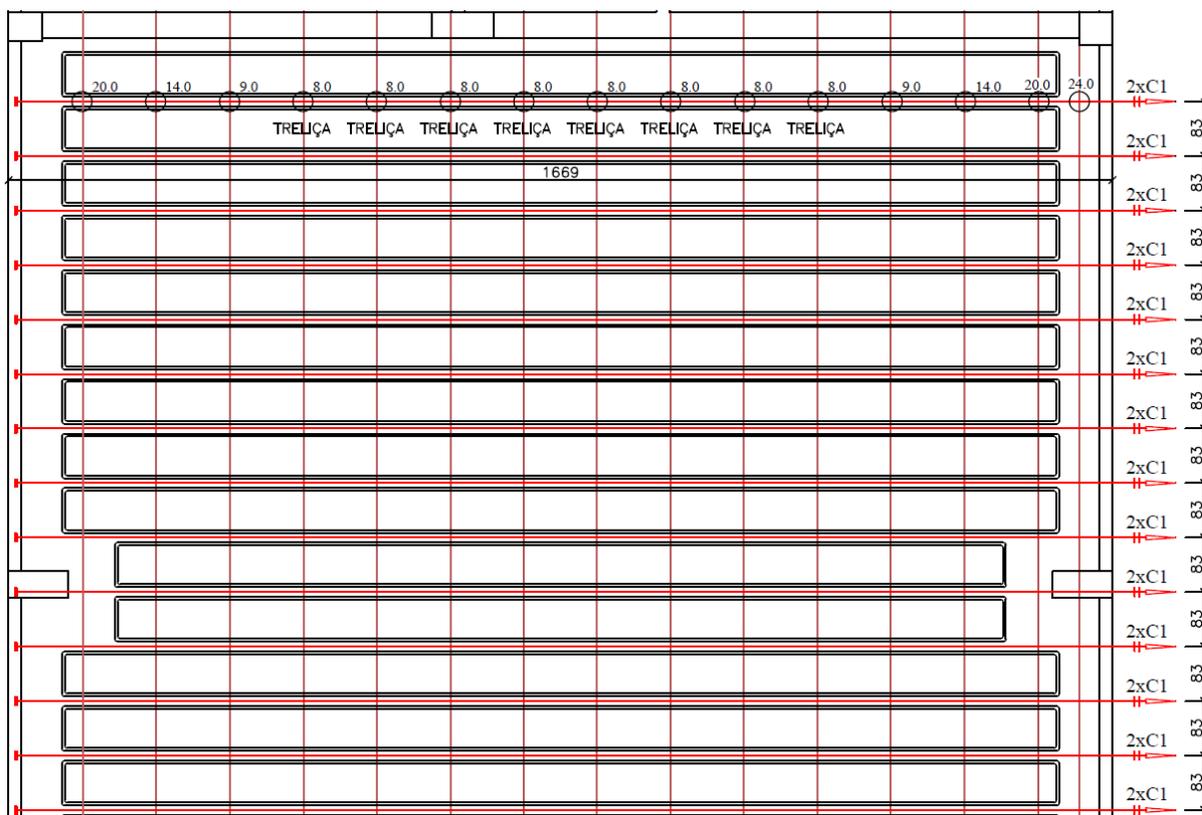


(Fonte: Arquivo da Construtora)

A Figura 36 mostra o arranjo de cabos em planta em uma parte do trecho C1 (indicado pelas linhas vermelhas onde “2xC1” representa o par de cordoalhas nas nervuras). Os cabos são posicionados nas nervuras, que distam 83cm entre si; partem, à esquerda, da ancoragem passiva, e chegam, à direita, na ancoragem ativa (fachada principal da edificação), ambas fixadas em vigas externas com 19cm de largura e 90cm de altura.

Tanto a Figura 35 quanto a 36 estão representadas em centímetro.

Figura 36 – Exemplo em planta do projeto de protensão – trecho C1



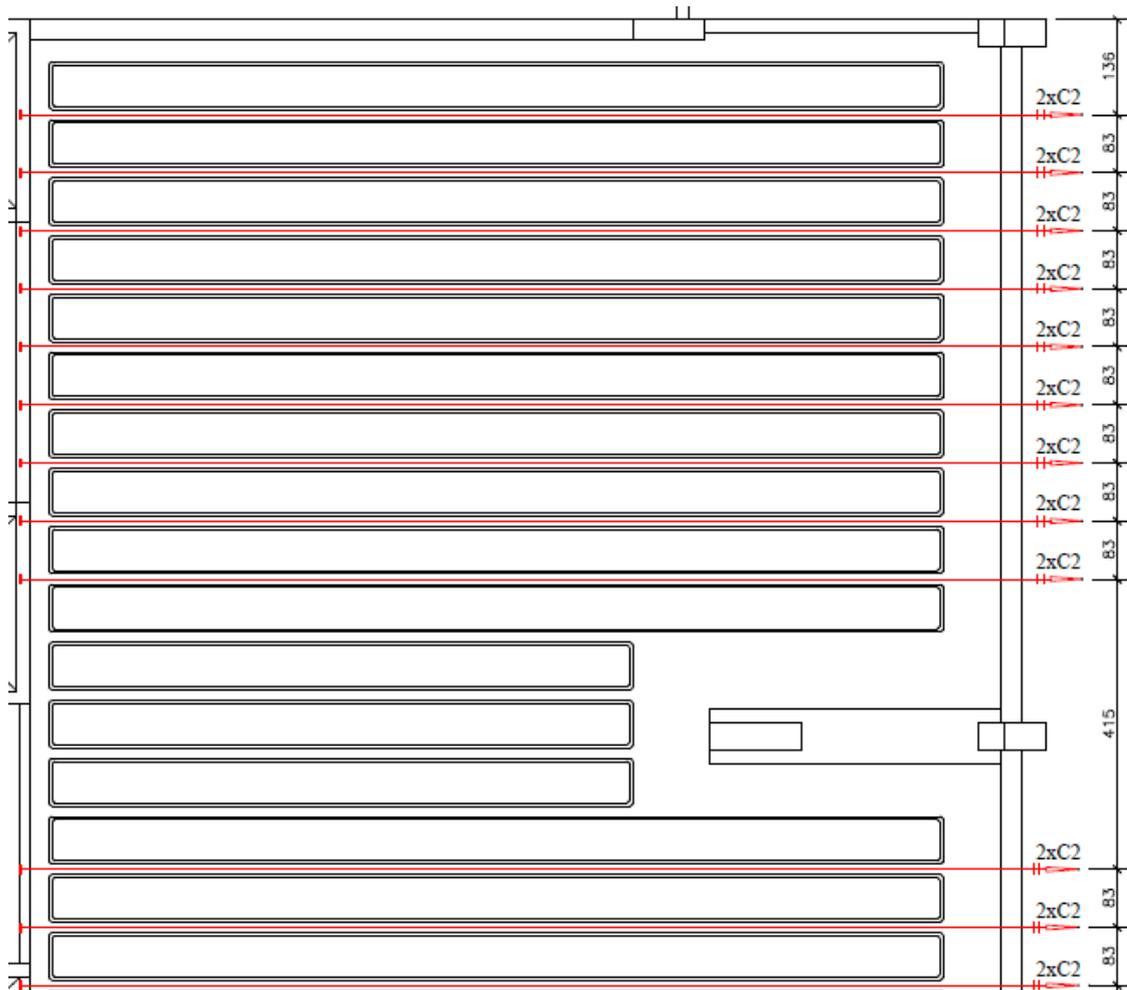
(Fonte: Arquivo da Construtora)

A Figura 37 ilustra o arranjo dos cabos em planta em uma parte do trecho C2 do 8º pavimento (indicado por linhas vermelhas nas quais “2xC2” representa o par de cordoalhas nas nervuras), juntamente com seu perfil longitudinal na Figura 38. Ambas figuras estão representadas em centímetro. Os cabos também partem, à esquerda, da ancoragem passiva (fixada em uma viga interna com 19cm de largura e 90cm de altura) e chegam, à direita, na ancoragem ativa (fachada principal da edificação), fixada na viga externa, que é inclinada, com 90cm de altura e uma largura variável que inicia em 19cm no fundo e acaba com 28cm no topo.

É importante destacar que há um erro na representação da Figura 38, mostrando a viga inclinada (que faz parte da fachada principal e encontra-se corretamente à direita) posicionada no lado esquerdo, contrário ao executado.

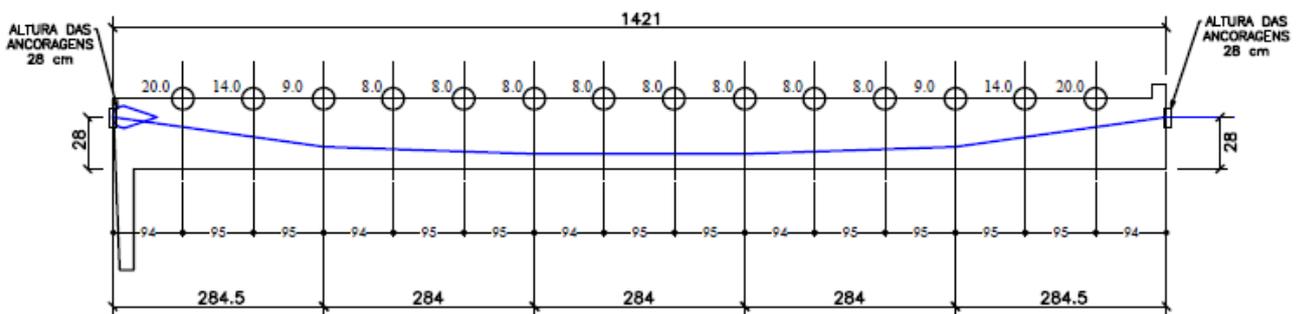
Para esse trecho foram utilizados cabos com 14,8m de comprimento (14,21m úteis e 0,59m externos à edificação), totalizando 474m de cabos no 8º pavimento.

Figura 37 – Exemplo em planta do projeto de protensão – 8º pavimento - trecho C2



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 38 – Perfil longitudinal dos cabos – 8º pavimento – trecho C2



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Pode-se pontuar que as diferenças na montagem da protensão do trecho C1 e trecho C2 estão no fato das lajes serem de tamanhos diferentes e diferirem no comprimento dos cabos e espaçamento das cadeirinhas, além de não ser necessário suporte de fixação com 24cm no

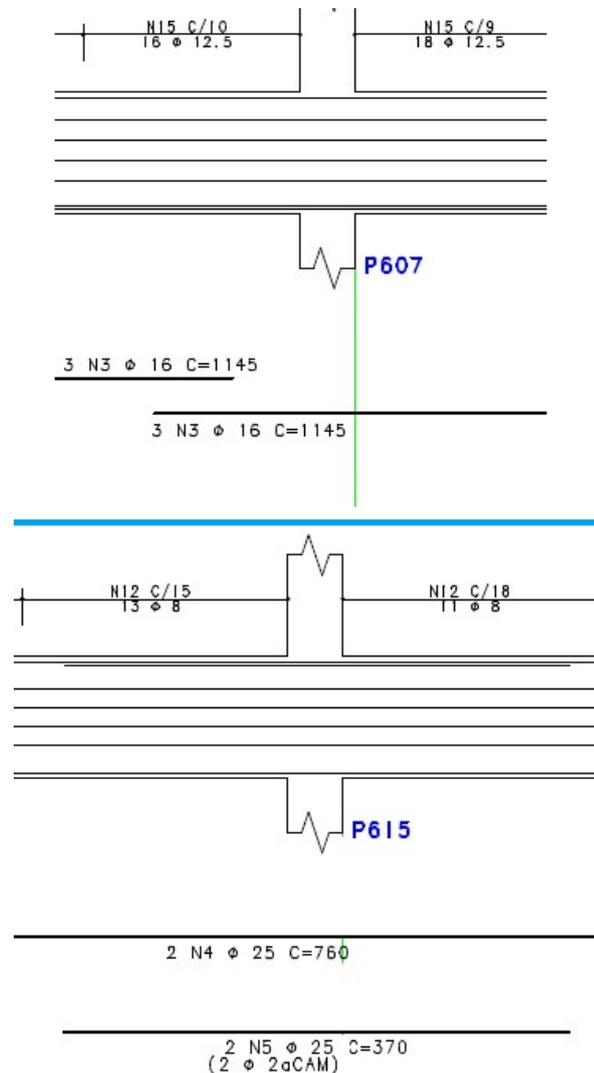
trecho C2. Vale mencionar também que no trecho C2 a ancoragem passiva encontra-se em uma viga interna da edificação e a ativa em uma viga inclinada, diferentemente do C1, que não possui vigas inclinadas e ambas as ancoragens estão fixadas em vigas externas.

Outro ponto a ser observado é que devido às regiões com grande concentração de armaduras nos estribos e na parte superior (negativa) das vigas laterais (onde as ancoragens são fixadas), houve dificuldades no posicionamento das placas de ancoragens conforme altura solicitada pelo projeto de protensão (28cm), tendo em vista interferências com o aço das vigas e da laje. Assim, foram necessárias novas verificações acerca do dimensionamento, que, por sua vez, resultaram na liberação, por parte do projetista, da instalação dessas ancoragens nas alturas de 26cm ou 27cm quando necessário, mantendo as demais com 28cm.

A Figura 39 visa exemplificar essa situação em dois pontos críticos com o detalhamento do projeto dos estribos e da armadura negativa nas vigas de borda (fachada principal) responsáveis pelas ancoragens ativas, no trecho C1 (acima) e no trecho C2 (abaixo).

Nota-se que os estribos do trecho C1 são espaçados a cada 9cm e com diâmetro de 12,5mm, além de, na região do traspasse, ocorrerem 6 barras com diâmetro 16mm referentes à armadura negativa em uma viga com 19cm de largura, enquanto no trecho C2 há 4 barras com 25mm de diâmetro na camada superior da viga e estribos com barras de 8mm de diâmetro a cada 15cm, com 28cm de largura no topo da viga.

Figura 39 – Detalhamento da armadura negativa e dos estribos das vigas de borda responsáveis pelas ancoragens ativas - C1 (acima) e C2 (abaixo)



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Tratando dos suportes de fixação para os cabos, a Figura 40 visa ilustrar o modelo utilizado, que é composto por aço com diâmetro de 6,3mm. Complementando, as peças já chegam no canteiro cortadas e dobradas conforme projeto específico.

Pontua-se que a dupla de cordoalhas fica presa e apoiada sobre o suporte na parte superior, enquanto seu corpo é fixado na armadura positiva da laje. É fundamental que as fixações impeçam qualquer movimento indesejado do cabo.

Além disso, para facilitar a correta distinção entre as alturas os suportes são pintados com cores e agrupados conforme suas dimensões.

Figura 40 – Modelo dos suportes para altura dos cabos utilizado



(Fonte: Autor)

Referente às ancoragens, que se encontram nas extremidades dos cabos e são fixadas nas vigas de borda das lajes, pode-se dizer que o conjunto da parte ativa é composto por uma placa de ferro fundido com dimensões de 13x6x4cm; um nicho cônico plástico engraxado para cordoalhas de 15,2mm; cunhas bipartidas de  $\frac{1}{2}$  polegada de diâmetro, rosqueáveis e em formato troncocônico com 3,3cm de comprimento, além de um bico plástico adicional que faz a ligação entre a placa e o cabo. A fixação do conjunto na chapa compensada da viga é realizada por meio de parafusos zincados, com arruelas, sextavados e autobrocantes com 5,5mm de diâmetro e 12,5cm de comprimento. Já a ancoragem passiva é composta pela mesma placa de ferro fundido da ativa, com cunhas pré-blocadas pelo macaco hidráulico nas cordoalhas antes mesmo de chegar no canteiro, além de um cap plástico preso na extremidade do cabo a fim de proteger a ponta do aço de protensão do contato com o concreto e das ações climáticas.

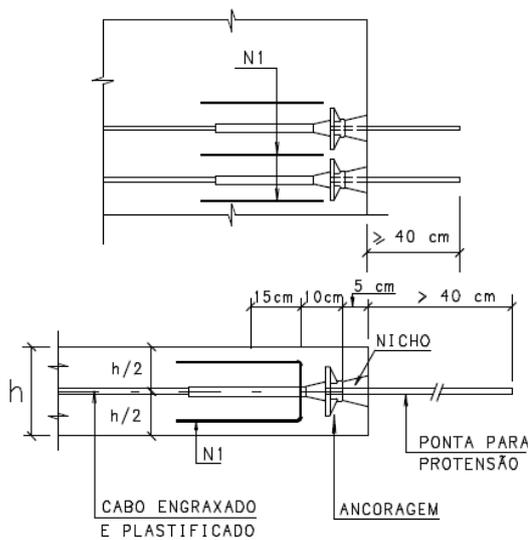
Quanto a armadura de fretagem, conforme detalhado na Figura 41, cada nervura protendida é composta por 3 peças de armadura de fretagem, constituídas por aço CA-50 com 10mm de

diâmetro, em formato de “C” e com comprimento total de 80cm cada. A Figura 41 também exemplifica detalhes de projeto das peças das ancoragens.

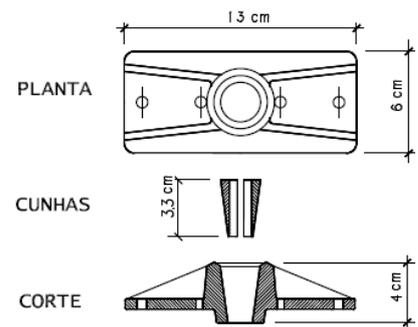
Já as Figuras 42 e 43 ilustram os elementos da ancoragem ativa e passiva, respectivamente, utilizados nesse estudo.

Figura 41 – Detalhamento de projeto da ancoragem ativa e da armadura de fretagem

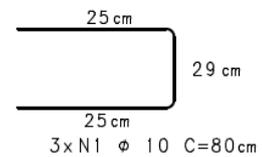
**DET. ANCORAGENS ATIVAS  
CABOS CONCENTRADOS (C/ FRETAGEM)**



**ANCORAGEM MONOCORDOALHA**

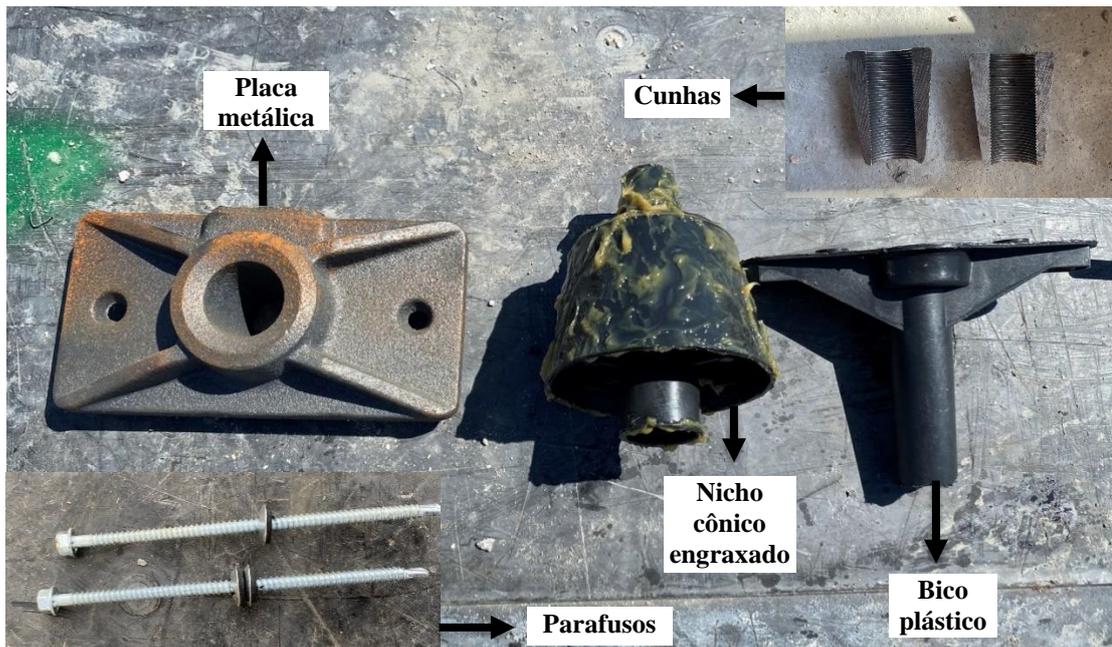


**ARMADURAS DE FRETAGEM**



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 42 – Exemplo dos elementos componentes da ancoragem ativa



(Fonte: Autor)

Figura 43 – Exemplo da ancoragem passiva



(Fonte: Autor)

Acerca das características do concreto utilizado, pontua-se que sua resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) é igual a 40Mpa, com relação água/cimento de 0,55, feito com cimento CP-V ARI RS

consumindo cerca de 380kg por m<sup>3</sup> de concreto. Já seu traço é composto por areia média (0,404 m<sup>3</sup><sub>areia</sub>/m<sup>3</sup><sub>concreto</sub>), areia fina (0,154 m<sup>3</sup><sub>areia</sub>/m<sup>3</sup><sub>concreto</sub>), brita 0 (0,630 m<sup>3</sup><sub>brita</sub>/m<sup>3</sup><sub>concreto</sub>) e aditivo “Adva Flow 837/Polifuncional” na proporção de 0,692 litro<sub>aditivo</sub>/m<sup>3</sup><sub>concreto</sub>. Ademais, possui *slump* de 160 ±30mm.

Por fim, referente à armadura passiva, tanto nas lajes quanto nas vigas foi utilizado aço CA-50, variando do diâmetro de 5,0mm até 25mm, conforme solicitado pelos projetos específicos.

Tratando-se da armadura positiva do trecho C1 as 33 nervuras protendidas foram armadas engastadas nas vigas laterais, com uma dupla de barras de diâmetro 25mm (em 27 das 33 nervuras) e uma dupla de diâmetro 16mm (nas 6 nervuras restantes). Já as nervuras longitudinais continham 2 barras com 25mm de diâmetro e 110cm de transpasse em todo comprimento da laje. Com relação aos capitéis dos pilares, foram armados nas duas direções com barras de 10mm espaçadas a cada 15cm, formando uma trama perpendicular. No que diz respeito à armadura negativa, as bordas da laje foram engastadas nas vigas com 2 barras de 25mm de diâmetro na região dos capitéis (em 15 das 33 nervuras) e 2 barras com 16mm de diâmetro (nas 18 nervuras restantes). As regiões maciças continham, além das barras na direção das nervuras, 3 barras com 25mm de diâmetro ao longo de todo perímetro da laje.

Tratando-se da armadura positiva do trecho C2, sua composição é dada por 2 barras com 20mm de diâmetro (em 8 das nervuras) e 2 barras com 16mm de diâmetro (em 14 das 22 nervuras), ao longo de toda extensão das nervuras. As nervuras longitudinais, assim como no trecho C1, possuem 2 barras com diâmetro de 25mm em todo comprimento da laje. Já no capitel central foram utilizadas barras com 16mm de diâmetro na direção das nervuras e barras perpendiculares com 10mm de diâmetro. Com relação à armadura negativa, utilizou-se, no lado da viga inclinada, 2 barras por nervura com 20mm de diâmetro na região do capitel (8 das 22 nervuras) e 2 barras com 16mm de diâmetro nas demais 14 nervuras, além de barras com 8mm de diâmetro adicionais em todo o trecho. Já na parte interna da laje, 4 das 22 nervuras possuíam 1 barra com 25mm de diâmetro enquanto as outras 18 nervuras foram armadas com 2 barras de 16mm de diâmetro.

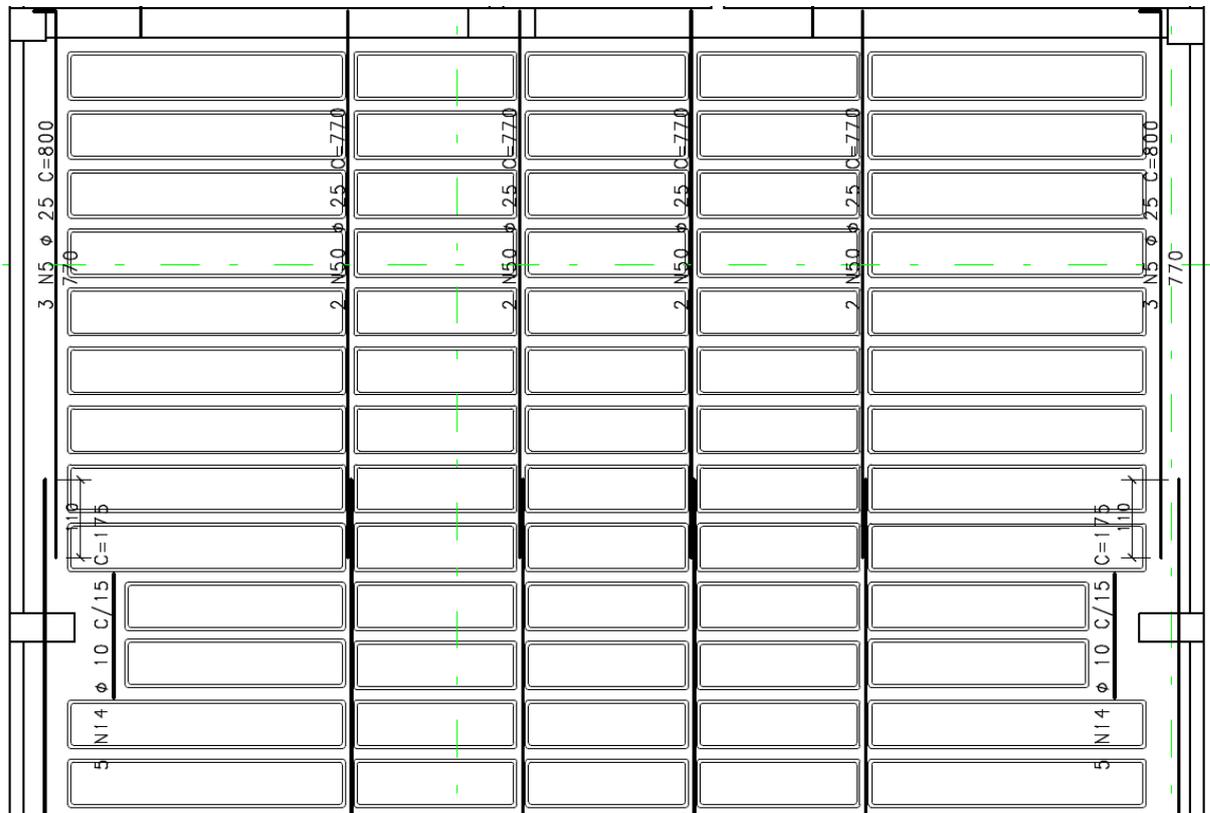
Para exemplificar, as Figuras 44 e 45 trazem o projeto das armaduras positivas, enquanto as Figuras 46 e 47 ilustram as armaduras negativas, ambas em uma parte do trecho C1.

Figura 44 – Detalhamento de projeto da armadura transversal positiva – C1



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 45 – Detalhamento de projeto da armadura longitudinal positiva – C1



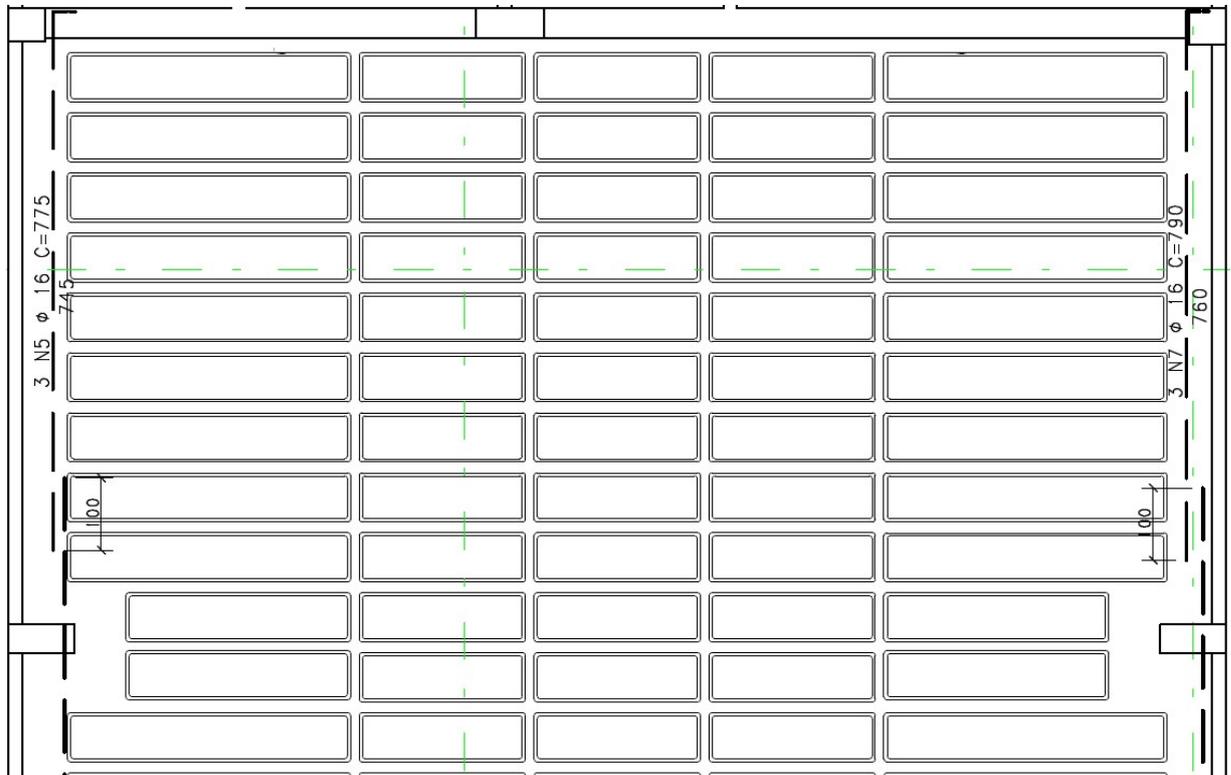
(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 46 – Detalhamento de projeto da armadura transversal negativa – C1



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Figura 47 – Detalhamento de projeto da armadura longitudinal negativa – C1



(Fonte: Arquivo da Construtora)

Por fim, tratando da armadura de distribuição, foram dispostas telas do tipo Q138 em ambas as lajes, por toda sua área, com espaçamento longitudinal e transversal de 10cm e diâmetro do aço de 4,2mm. Para o transpasse entre telas adotou-se 20cm. Já nos estribos da laje (nas nervuras) foram utilizadas peças com diâmetro de 5mm, 6,3mm e 8mm.

Ademais, o cobrimento adotado nas lajes foi de 2,5cm, enquanto nas vigas (ancoragens) e pilares foi de 3cm, conforme solicitado pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Para isso foram utilizados espaçadores plásticos multi-apoio do tipo centopeia no fundo das lajes e das vigas e entre as telas e as cubetas; e espaçadores plásticos do tipo circular (roseta) na lateral das vigas e nos pilares. Para o espaçamento entre as armaduras negativas e as telas foram utilizadas treliças metálicas com 5cm de altura.

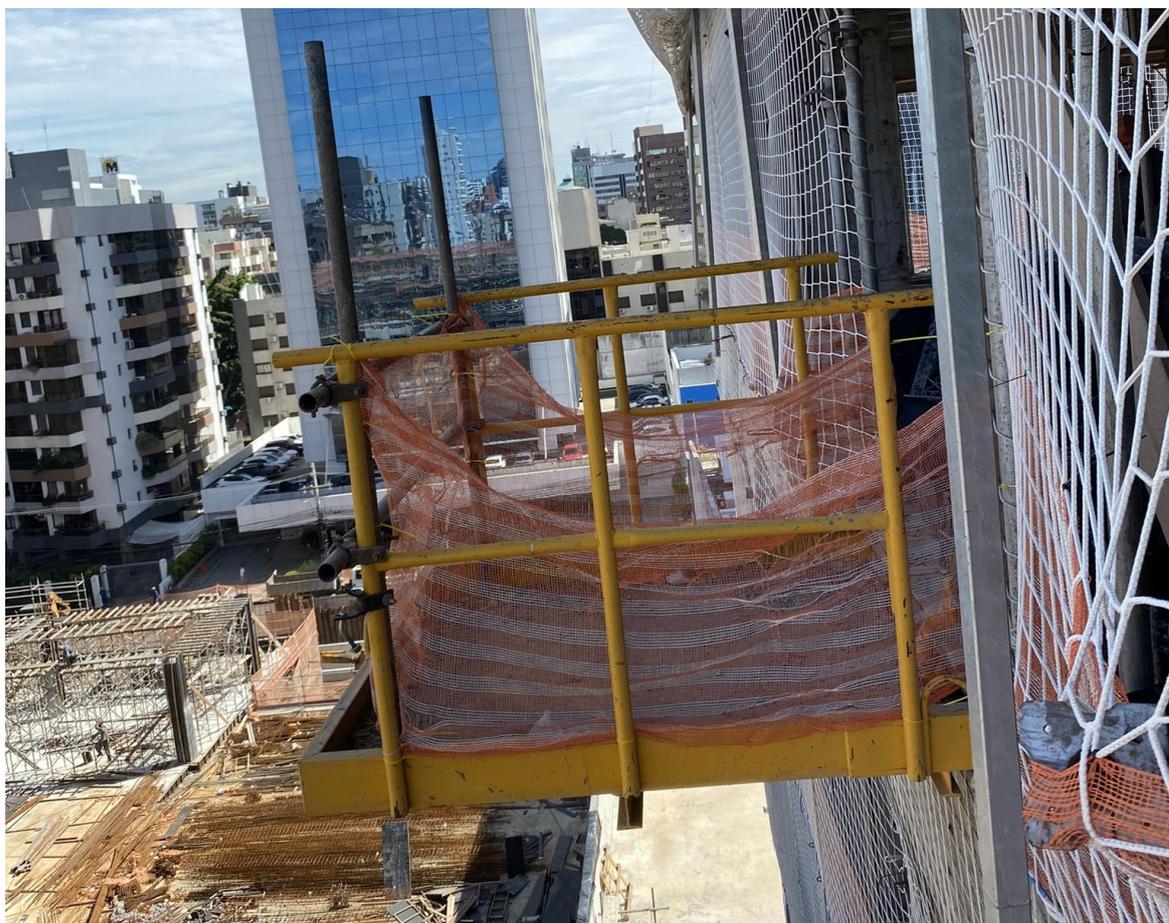
### **4.2.3 Transporte e logística de materiais**

O transporte horizontal e vertical de materiais foi realizado com o auxílio de uma grua modelo “MC 85 RA12” da marca “Potain”, com 35m de lança e carga máxima de 2500kg, responsável pelo içamento dos materiais e equipamentos inerentes ao processo de construção dos pavimentos.

Com relação aos elementos de fôrma (cimbramento, cubetas, chapas compensadas e reescoramento), a cada novo ciclo de produção realizava-se a desforma dos pavimentos abaixo pertinentes para cada caso. Depois, com auxílio de containers de entulho de 5 m<sup>3</sup>, da grua e de uma plataforma metálica (Figura 48) era realizado o carregamento e içamento dos materiais (cubetas, chapas compensadas, escoramentos, guias, barrotes, peças para travamento...), a exemplo da Figura 49, até o andar em execução (Figura 50).

O intuito da plataforma, como pode ser visto na Figura 49, é possibilitar acesso externo à edificação aos trabalhadores, que precisam alcançar o container suportado pela grua para carregar os materiais, uma vez que o sistema de proteção vertical da edificação é composto por redes do tipo UV e impossibilita esse acesso num primeiro momento (sem a plataforma).

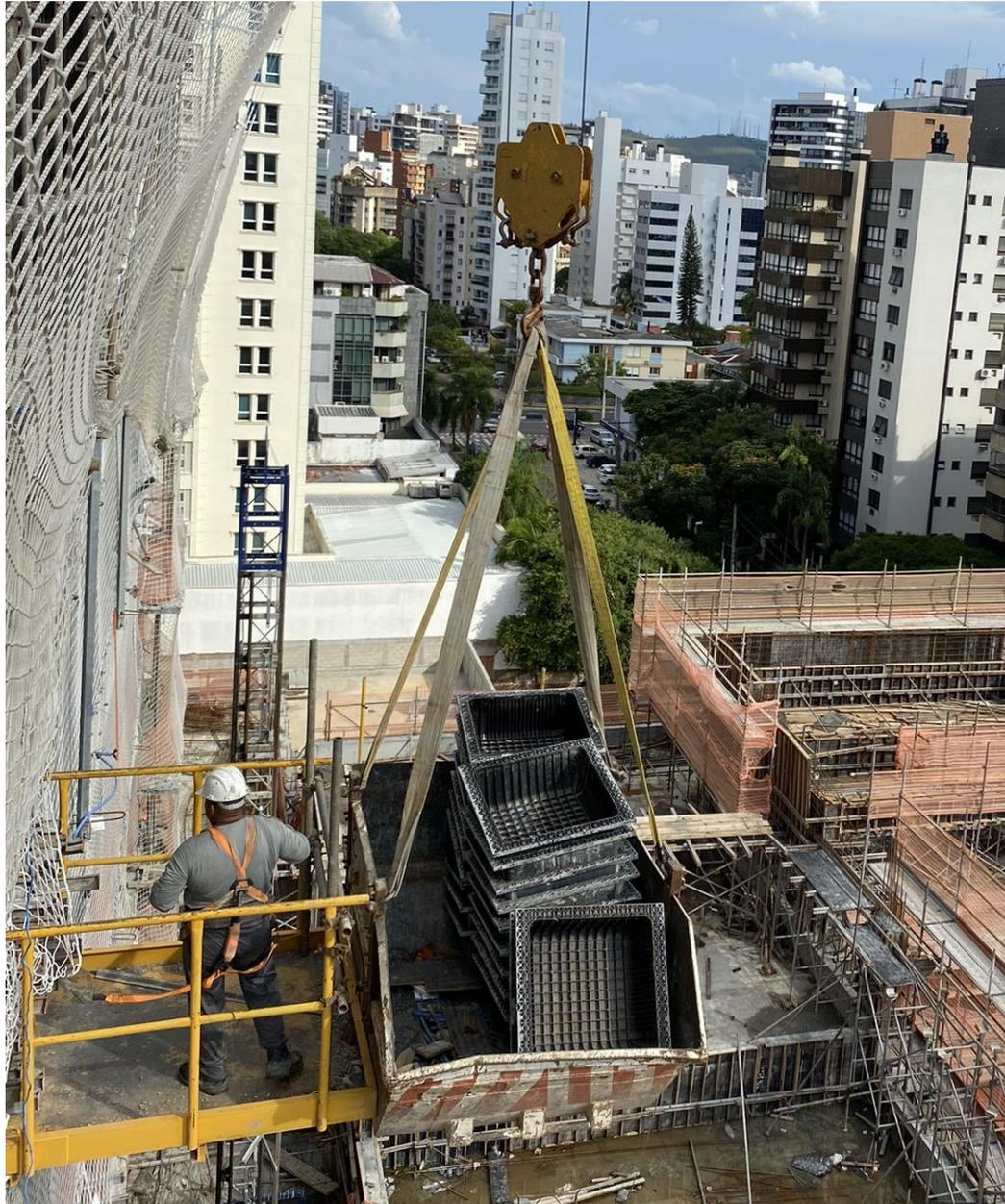
Figura 48 – Plataforma metálica utilizada para possibilitar o carregamento dos materiais



(Fonte: Autor)

Ademais, pontua-se que a solução adotada com o uso da plataforma móvel foi satisfatória. Vale ressaltar que a mesma foi projetada por uma empresa especializada para resistir aos esforços referentes ao içamento e trazer segurança aos trabalhadores, que mesmo assim ficam presos pelo cinto de segurança em linhas de vida internas à edificação. Como desvantagem do sistema percebe-se a necessidade de agilidade dos trabalhadores responsáveis pelo processo a fim de torná-lo o mais breve possível, uma vez que todas as outras tarefas realizadas pela grua precisam ser paralisadas nesse período. Como sugestão para melhora seria a adoção de uma estrutura maior, com extensão para frente, na qual o container pudesse ser apoiado e não fosse necessário o uso da grua para seu suporte. Contudo, isso demandaria maior tempo de montagem e desmontagem da plataforma, além do aumento dos riscos e dos custos com materiais.

Figura 49 – Posição de carregamento das cubetas, com a grua suportando o container que é abastecido pelo trabalhador na plataforma metálica



(Fonte: Autor)

Figura 50 – Cubetas transportadas até a laje em execução



(Fonte: Autor)

No que diz respeito aos materiais da protensão, conforme já mencionado, os cabos eram cortados e pré-blocados fora do canteiro, chegando nos portões, sendo descarregados e içados pela grua até um local provisório, descoberto, onde ficavam por no máximo 20 dias sobre estrados de madeira até serem içados para o pavimento (Figura 51) e utilizados na execução das lajes.

Apesar de não ser indicado o armazenamento em locais expostos, objetivava-se estoques mínimos, apenas para a execução de 1 ciclo, reduzindo, assim, o tempo de exposição. As demais peças necessárias para o sistema (ancoragem ativa, macaco hidráulico...), assim como as cordoalhas, eram fornecidas e de responsabilidade da empresa especializada contratada.

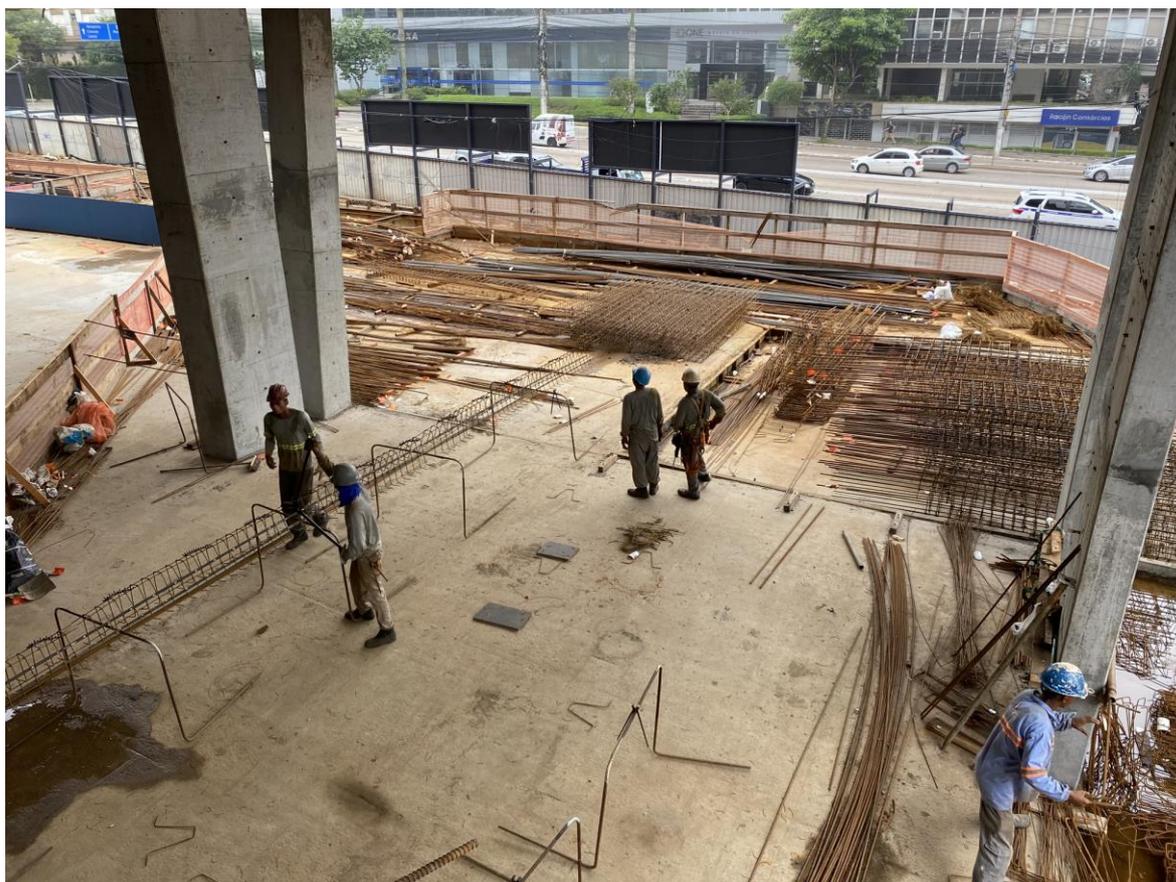
Figura 51 – Cabos de protensão sendo transportados até a laje em execução



(Fonte: Autor)

Tratando-se do aço passivo para execução das lajes, das vigas e dos pilares, todo material chegava no canteiro cortado e dobrado, identificado com uma etiqueta específica de acordo com seu elemento de uso. Após a chegada, era descarregado pela grua e transportado até a central de armação (Figura 52), que ficava no 3º pavimento da edificação e dispunha de local coberto para os trabalhadores, acesso externo para estocagem e espaço para içamento. As vigas e os pilares eram montados na central de armação e levados até o pavimento em execução prontos, enquanto a armadura das lajes era içada e montada no pavimento.

Figura 52 – Central de produção dos armadores (ferreiros)



(Fonte: Autor)

#### 4.2.4 Tempo de execução

Com relação ao tempo de execução, iniciou-se, nos primeiros pavimentos analisados, com tempos de ciclo de 20-25 dias por pavimento, contando com 12 carpinteiros, 6 ferreiros (armadores) e 2 especializados em protensão, além de trabalhadores adicionais em funções que não estão no caminho crítico da execução. Entretanto, a meta da construtora planejada em cronograma previa a execução de 1 pavimento a cada 15 dias. Assim, a partir do 10º pavimento, a equipe foi incrementada e passou a contar com 16 carpinteiros, 7 ferreiros e os mesmos 2 especializados em protensão. Com esse aumento e maior prioridade (principalmente da grua) nas tarefas relacionadas à produção, foi possível alcançar o objetivo de 15 dias por pavimento. Outro ponto a ser levado em conta são as condições do clima, que muitas vezes impediram que as atividades fossem realizadas no momento correto.

Além disso, é importante destacar o efeito da aprendizagem relacionado aos trabalhadores com o passar do tempo, que foram aprimorando e passaram a executar as tarefas de maneira mais

rápida e certa. Outro fator importante foi o reaproveitamento das fôrmas para pilares e vigas por até 4 andares (chapas compensadas) e das cubetas (mesmos moldes para todos os pavimentos, com uma pequena incrementação (cerca de 5% durante o período do estudo) na quantidade devido ao aumento da laje do trecho C2 e de eventuais quebras. Pontua-se também que foi aplicado desmoldante da marca “Quartzolit” uma vez (10º pavimento).

Uma das dificuldades enfrentadas tratando-se do prazo foi a necessidade de compartilhar o uso da grua com os demais setores do empreendimento, fazendo com que a produção fosse atrasada devido às tarefas paralelas.

A Tabela 5 visa exemplificar as principais atividades desenvolvidas no pavimento, em cada trecho, por dia de ciclo para um ciclo de 15 dias. Vale pontuar que a execução da região com laje maciça também está incluída nesse tempo, que contabiliza todo o andar.

Iniciando pelo trecho C1, percebe-se que a etapa de montagem do sistema de fôrmas (cimbramento e moldes) tem duração de 5 dias, com concretagem dos pilares no 6º dia de ciclo. Após, são necessários mais 3 dias para montagem da protensão (cabos e ancoragens) e do aço passivo (colocação das vigas e montagem das armaduras da laje), para que no 10º dia de ciclo ocorra a concretagem da laje e das vigas. Depois disso, do 11º ao 15º dia do ciclo ocorre majoritariamente desforma e montagem dos pilares do próximo pavimento, uma vez que o foco executivo passa a ser direcionado para o trecho C2.

Acerca do trecho C2 percebe-se que, nos primeiros dias de ciclo, a montagem do aço e da fôrma dos pilares requer mais tempo quando comparado ao C1. Isso ocorre devido a estrutura na região dos elevadores, que conta com 3 pilares-parede de execução complexa, e aos pilares inclinados, que demandam mais atenção e tempo de execução. A montagem de fôrma também se estende por 1 dia a mais que o C1 em função do trecho inclinado, das lajes maciças, das lajes em balanço (lajes técnicas) e escadas. Para que o ciclo de 15 dias seja cumprido é fundamental que os pilares sejam concretados no 10º dia de ciclo, juntamente com a laje e as vigas do trecho C1. Após a concretagem dos pilares é possível montar o sistema de protensão, o aço passivo das lajes e das vigas (que são em maior número que no C1), realizar o alinhamento e travamento final no 14º dia de ciclo para que, no 15º dia, ocorra a concretagem do trecho C2, finalizando assim o pavimento da edificação.

Tabela 5 – Principais atividades desenvolvidas por dia de ciclo em cada trecho

<b>DIA DO CICLO</b>	<b>TRECHO C1</b>	<b>TRECHO C2</b>
<b>01</b>	- Montagem escoramento vertical (fundos das vigas periféricas e laje).	- Desforma.
<b>02</b>	- Montagem escoramento vertical; - Montagem vigamentos.	- Desforma.
<b>03</b>	- Finaliza montagem escoramento vertical; - Finaliza montagem vigamentos; - Montagem de fôrma da laje (cubetas e trechos maciços).	- Montagem do aço dos pilares; - Montagem da fôrma dos pilares.
<b>04</b>	- Montagem de fôrma da laje (cubetas e trechos maciços).	- Montagem do aço dos pilares; - Montagem da fôrma dos pilares.
<b>05</b>	- Finaliza montagem de fôrma da laje (cubetas e trechos maciços).	- Finalização montagem do aço dos pilares; - Finalização montagem da fôrma dos pilares.
<b>06</b>	- <b>Concretagem dos pilares.</b>	- Montagem escoramento vertical (fundos das vigas e laje).
<b>07</b>	- Montagem do aço das vigas; - Montagem do aço passivo; - Montagem do sistema de protensão; - Tensionamento dos cabos de protensão do pavimento inferior.	- Montagem escoramento vertical; - Montagem vigamentos; - Montagem de fôrma das cubetas e trechos maciços; - Montagem de fôrma lajes maciças.
<b>08</b>	- Montagem do aço das vigas; - Montagem do aço passivo da laje; - Montagem do sistema de protensão.	- Finaliza montagem escoramento vertical; - Finaliza montagem vigamentos; - Montagem de fôrma das cubetas e trechos maciços; - Montagem de fôrma lajes maciças.
<b>09</b>	- Finaliza montagem do aço das vigas e das lajes; - Finaliza montagem do sistema de protensão; - Finaliza montagem de fôrma (alinhamento e travamentos).	- Finaliza montagem de fôrma das cubetas e trechos maciços; - Finaliza montagem de fôrma lajes maciças.

<b>10</b>	<b>- Concretagem (laje e vigas).</b>	<b>- Concretagem dos pilares.</b>
<b>11</b>	- Desforma.	- Montagem do aço das vigas; - Montagem do aço passivo; - Montagem do sistema de protensão; Tensionamento dos cabos de protensão do pavimento inferior.
<b>12</b>	- Desforma.	- Montagem do aço das vigas; - Montagem do aço passivo; - Montagem do sistema de protensão.
<b>13</b>	- Montagem do aço dos pilares; - Montagem da fôrma dos pilares.	- Finaliza montagem do aço das vigas; - Finaliza montagem do aço passivo; - Finaliza montagem do sistema de protensão.
<b>14</b>	- Finalização montagem da fôrma dos pilares.	- Finaliza montagem de fôrma (alinhamento e travamentos).
<b>15</b>		<b>- Concretagem (lajes e vigas).</b>

(Fonte: Autor)

#### 4.3 Etapas executivas

Concluídas às informações pertinentes ao empreendimento e às concepções de projeto, torna-se possível tratar das etapas construtivas referentes às lajes nervuradas protendidas com cordoalhas engraxadas, objetivo principal desse estudo de caso. Destaca-se que essa sessão visa ilustrar a parte prática, com ênfase na exemplificação por meio de figuras, etapa por etapa do processo executivo. Outro ponto importante é que a montagem do aço e da fôrma dos pilares não será discutida, já que o direcionamento desse trabalho está nos sistemas de fôrma e de protensão das lajes nervuradas.

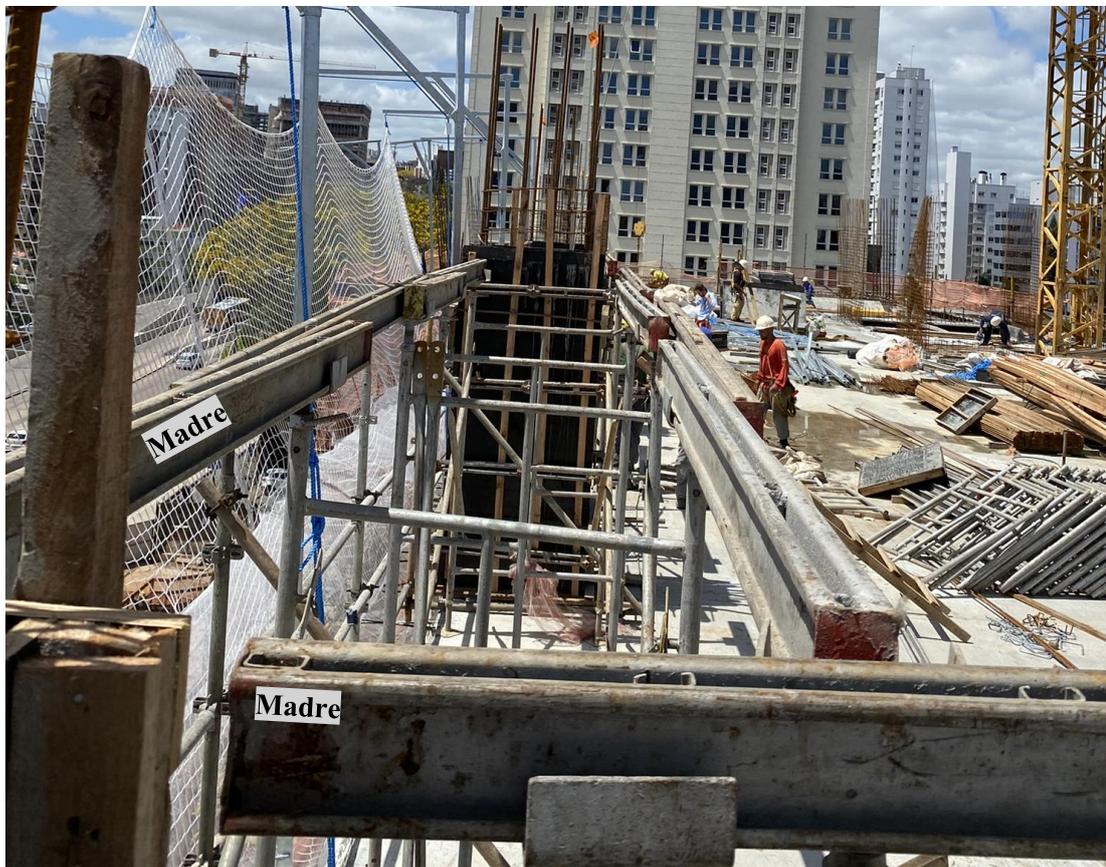
Assim, após o aço e a fôrma dos pilares estarem posicionados e travados, a próxima etapa diz respeito a montagem do cimbramento (escoramento, vigamento inferior e superior) das vigas perimetrais da laje (na linha dos pilares), contemplando inicialmente a montagem das torres de andaime (Figura 53). Depois são posicionadas as madres – vigamento inferior (Figura 54) e os barrotes – vigamento superior (Figura 55).

Figura 53 – Montagem do escoramento (torres de andaime) das vigas perimetrais – C1



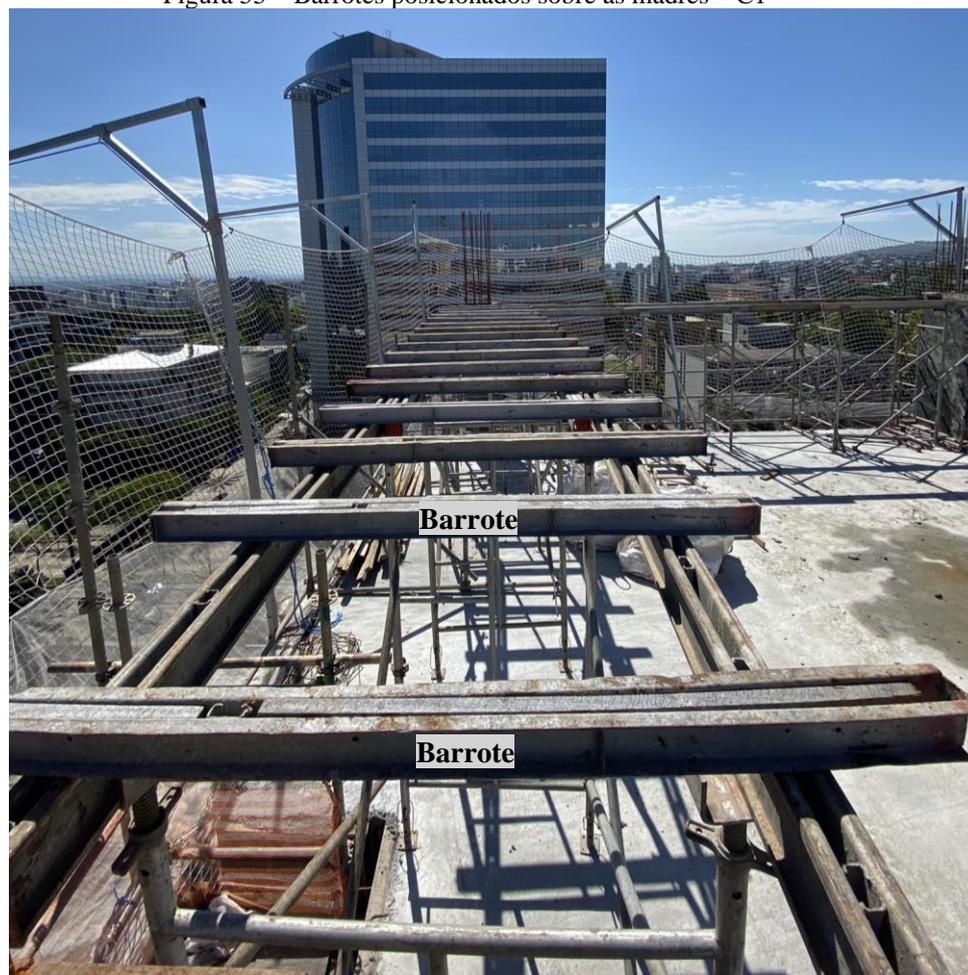
(Fonte: Autor)

Figura 54 – Madres posicionadas nos forcados das torres de andaime – C1



(Fonte: Autor)

Figura 55 – Barrotes posicionados sobre as madres – C1



(Fonte: Autor)

Após o cimbramento das vigas ser disposto, inicia-se a montagem do cimbramento da laje, começando pelo posicionamento das torres de andaime (Figura 56 e Figura 57), depois das madres (Figura 58 e Figura 59) e, por fim, dos barrotes (Figura 60 e Figura 61). Ademais, destaca-se que o termo “barroteamento” é comumente utilizado em obra para se referir ao posicionamento dos barrotes.

Outro fator relevante é a importância do uso de redes de proteção coletivas contra quedas verticais, como pode ser visto na Figura 61, que deve ser instalada antes do barroteamento. Como os barrotes ficam soltos sobre as madres (apenas apoiados), esse item torna-se fundamental para mitigar acidentes de trabalho, já que o sistema só se torna estável após a montagem dos trechos maciços e das cubetas.

Figura 56 – Início da montagem do escoramento (torres de andaime) da laje – C1



(Fonte: Autor)

Figura 57 – Montagem do escoramento (torres de andaime) em finalização – C2



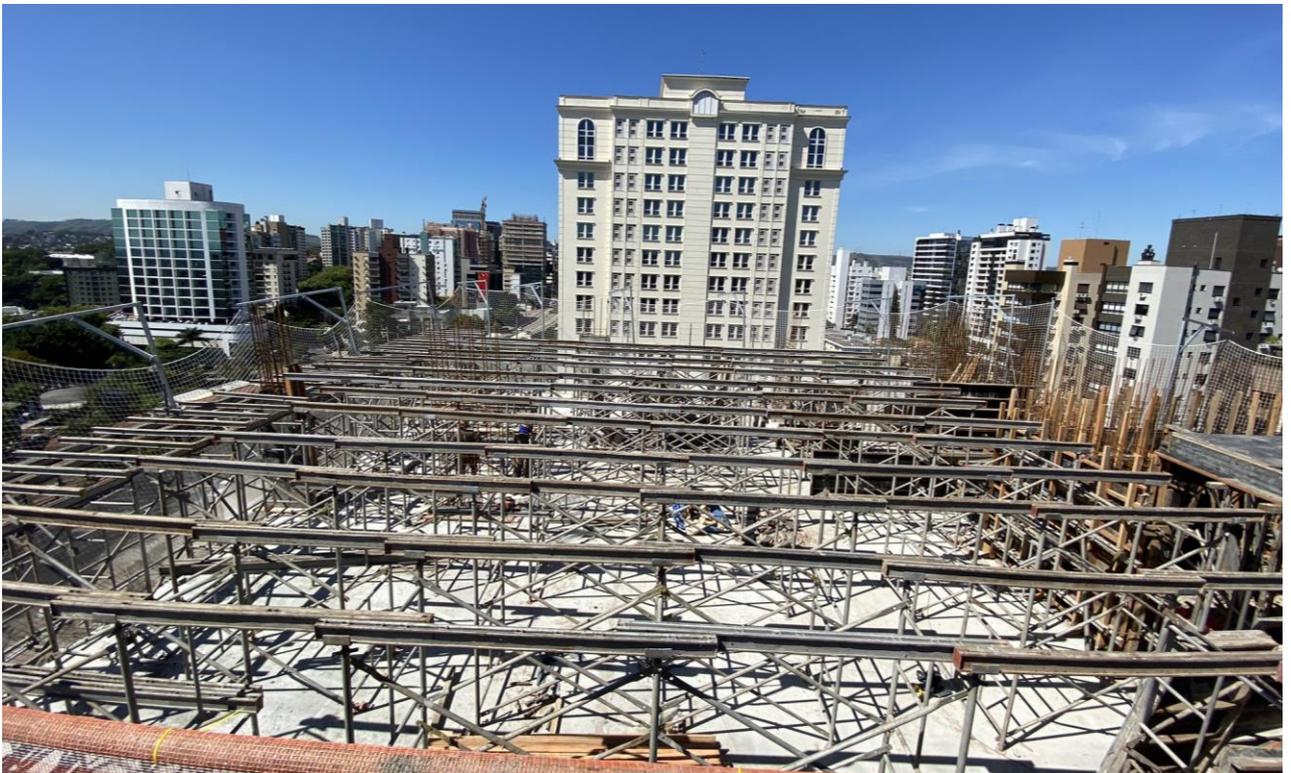
(Fonte: Autor)

Figura 58 – Posicionamento das madres da laje em andamento – C1



(Fonte: Autor)

Figura 59 – Posicionamento das madres da laje finalizado – C2



(Fonte: Autor)

Figura 60 – Vista inferior do posicionamento dos barrotes em andamento – C1



(Fonte: Autor)

Figura 61 – Vista superior dos barrotes posicionados – C1



(Fonte: Autor)

Em seguida, após a conclusão da etapa referente ao cimbramento, inicia-se a montagem dos moldes (chapas compensadas e cubetas), com o seguinte sequenciamento de atividades:

- montagem do fundo e da lateral interna das vigas;
- montagem dos trechos maciços das lajes e capitéis dos pilares;
- posicionamento das cubetas;
- montagem da lateral externa das vigas.

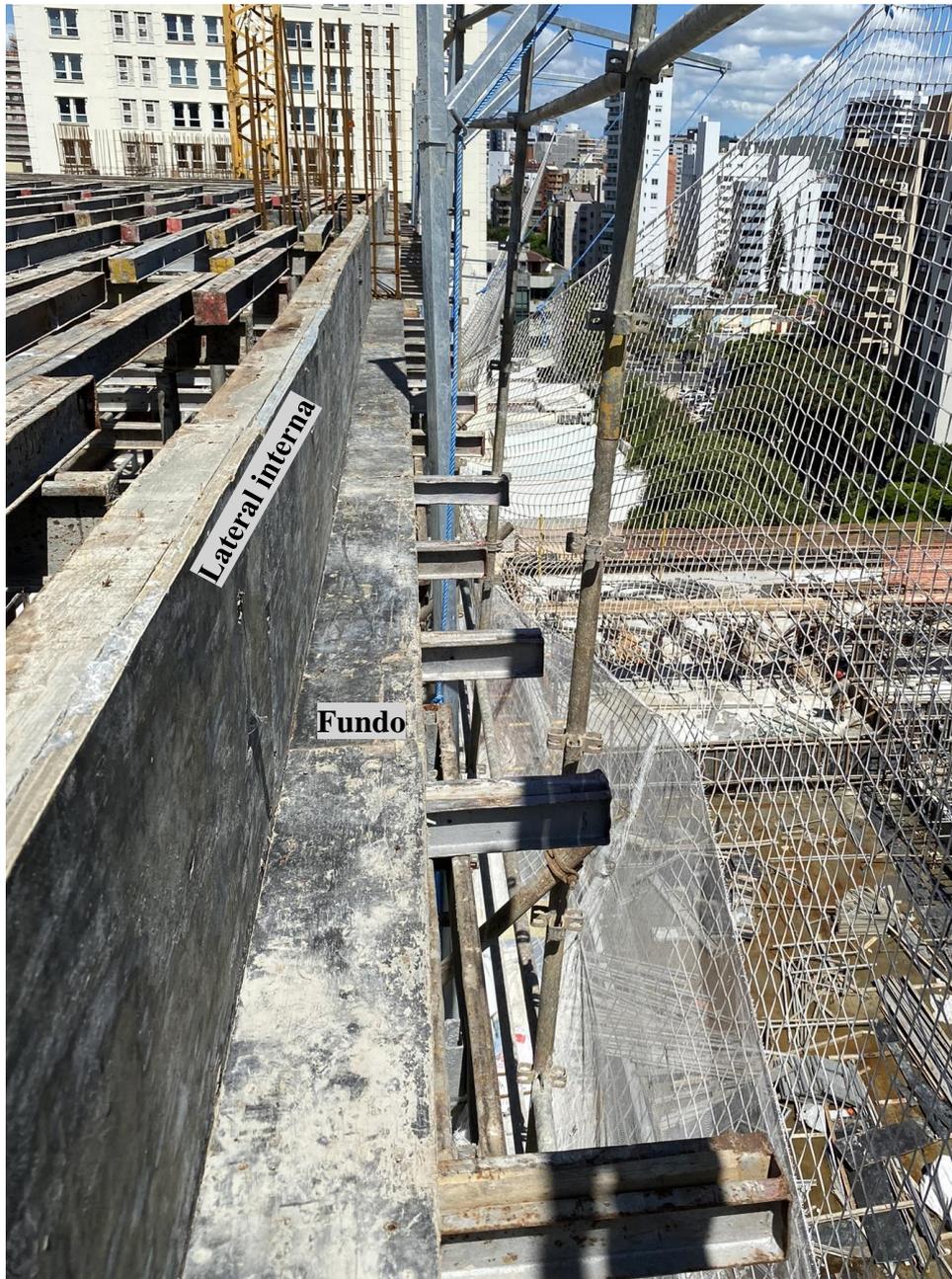
Nesse contexto, como pode ser visto na Figura 62, a montagem começa pelos moldes do fundo e da lateral interna das vigas, compostos por chapas compensadas pregadas nos barrotes.

Após, conforme a Figura 63, ocorre a montagem dos trechos maciços periféricos das lajes. É importante destacar que esses trechos são o ponto de partida para montagem das cubetas, ditando seu alinhamento e travamento de borda, sendo que as régua já são posicionadas durante a execução dos mesmos (setas vermelhas na Figura 63).

Ademais, anteriormente à montagem das cubetas também é necessário realizar o travamento horizontal desses trechos para que o sistema garanta segurança aos trabalhadores e impeça movimentações indesejadas da laje. Nesse caso foram utilizados sarrafos provisórios fixados no fundo e na lateral interna das vigas (Figura 64).

Com relação aos capitéis (regiões de engrossamento na região dos pilares), pode-se dizer que são montados de maneira semelhante aos trechos maciços, a exemplo da Figura 65.

Figura 62 – Montagem do fundo e da lateral interna do molde das vigas – C1



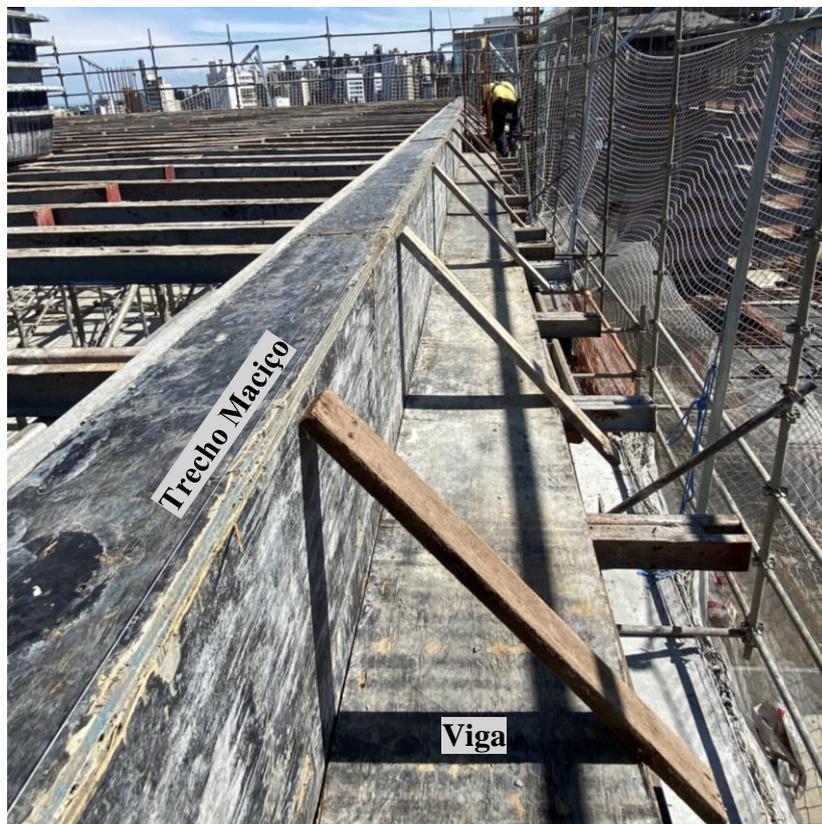
(Fonte: Autor)

Figura 63 – Montagem do molde do trecho maciço da fachada principal – C1



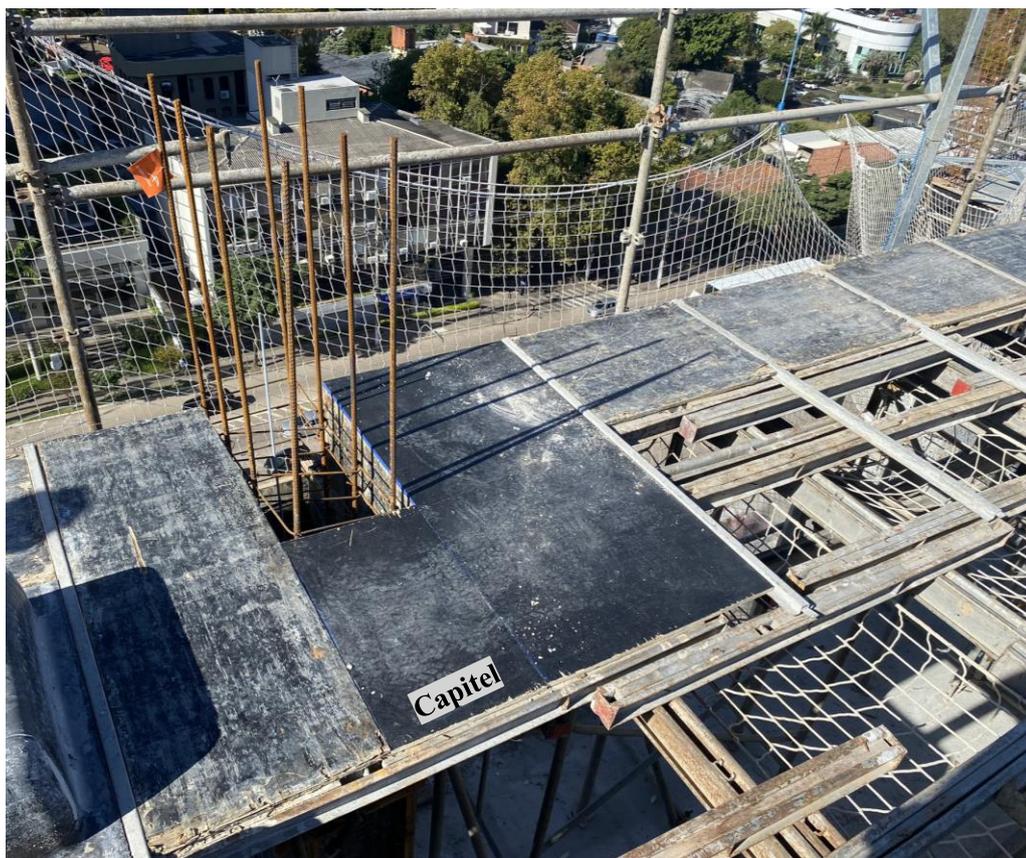
(Fonte: Autor)

Figura 64 – Montagem do trecho maciço perpendicular à fachada principal – C1



(Fonte: Autor)

Figura 65 – Montagem do molde dos capitéis finalizada – C1



(Fonte: Autor)

Concluídos os trechos lisos segue-se para a colocação dos moldes nervurados.

Assim, se inicia a montagem pela periferia das lajes (Figura 66) tendo como referência as régua já alocadas nos trechos maciços, preenchendo com cubetas o alinhamento na direção das nervuras e seguindo para extremidade oposta (Figura 67).

Ilustra-se com a Figura 68 o trilho formado pelas régua para o encaixe dos moldes. Já a Figura 69 exemplifica as cubetas sendo posicionadas nesse trilho. As régua, por sua vez, ficam travadas nos barrotes por meio de pregos (Figura 70), que ficam soltos sobre as madres, possibilitando certo deslocamento horizontal ao sistema (cubeta-régua-barrote), essencial para que os ajustes finais de alinhamento, onde são utilizados gabaritos com linhas mestras compostas por fios de nylon (Figura 71) e uma marreta para deslocar os moldes, sejam bem sucedidos.

Ademais, nota-se as peças “cabetex” metálicas na união entre duas régua, que também servem também como ponto de apoio para o reescoramento da laje.

Figura 66 – Início da montagem das cubetas – C1



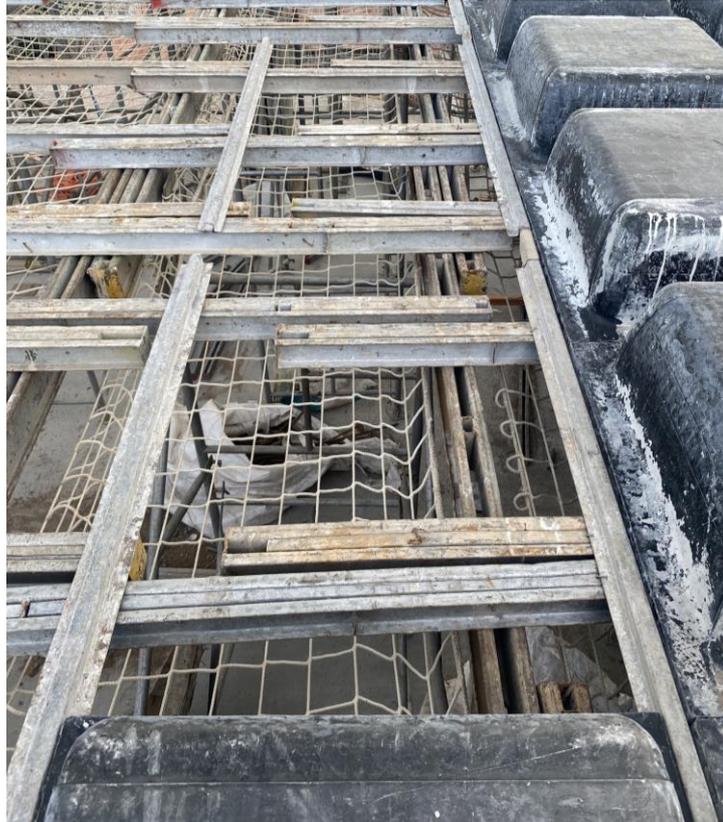
(Fonte: Autor)

Figura 67 – Montagem das cubetas em execução – C2



(Fonte: Autor)

Figura 68 – Trilho formado pelas régulas onde encaixam-se as cubetas



(Fonte: Autor)

Figura 69 – Cubeta sendo encaixada durante a montagem



(Fonte: Autor)

Figura 70 – Exemplificação do travamento das régua nos barrote com pregos



(Fonte: Autor)

Figura 71 – Linhas mestras responsáveis pelo alinhamento final da laje



(Fonte: Autor)

Após a conclusão da montagem das cubetas é iniciado o posicionamento dos tapa nervuras. As Figuras 72 e 73 exemplificam o trecho C1 com as cubetas montadas e os tapa nervuras em execução, enquanto as Figuras 74 e 75 ilustram o trecho C2 nessas mesmas etapas.

Figura 72 – Montagem das cubetas finalizada – C1



(Fonte: Autor)

Figura 73 – Posicionamento dos tapa nervuras em execução – C1



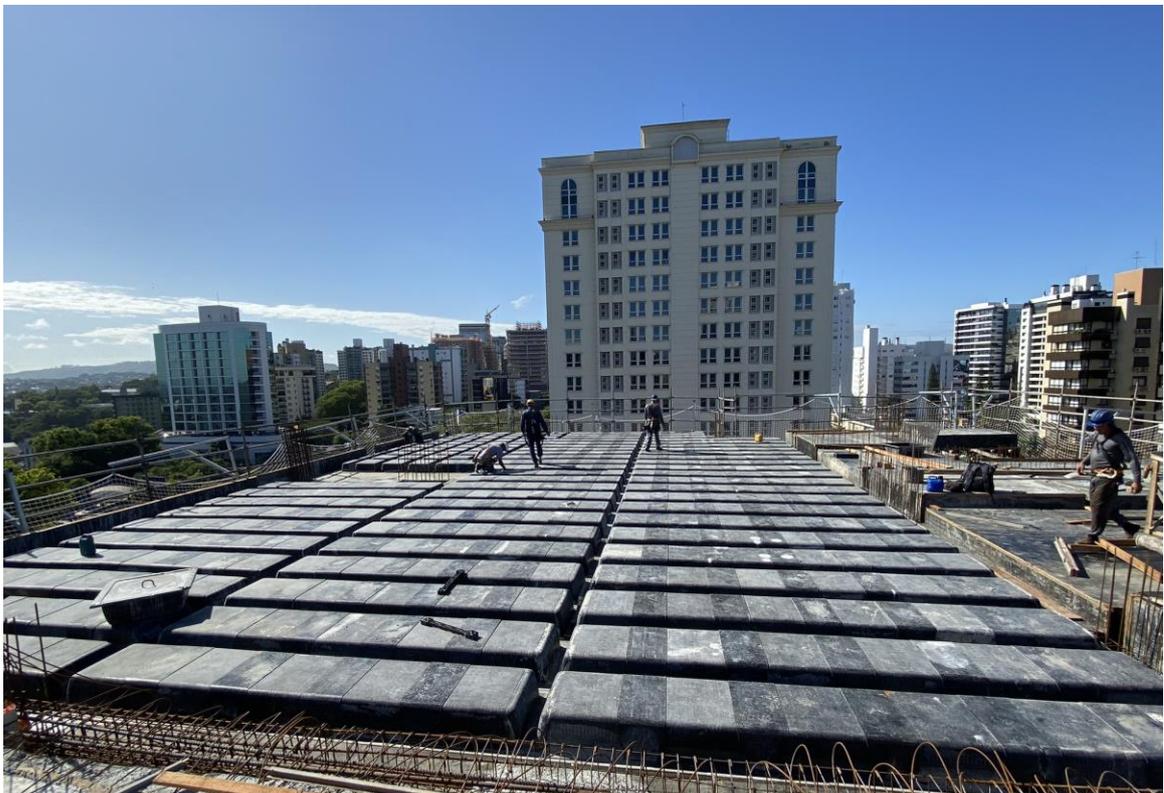
(Fonte: Autor)

Figura 74 – Montagem das cubetas finalizada – C2



(Fonte: Autor)

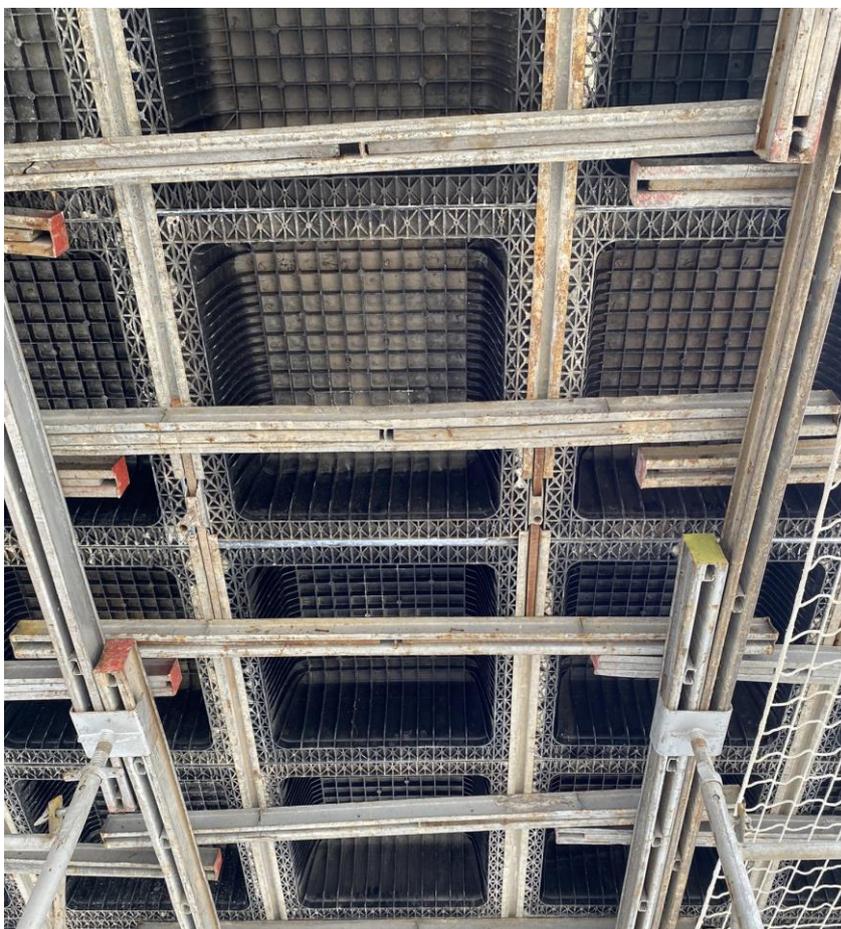
Figura 75 – Posicionamento dos tapa nervuras em fase final de execução – C2



(Fonte: Autor)

Por fim, visa-se exemplificar o sistema de fôrmas da laje finalizado com uma vista inferior (Figura 76).

Figura 76 – Vista inferior do sistema de fôrmas após finalização da montagem



(Fonte: Autor)

Depois de terminada a montagem de fôrma pelos carpinteiros ocorre a concretagem dos pilares. Essa, por sua vez, libera o início das atividades dos armadores e dos trabalhadores especializados em protensão. Entretanto, também é preciso realizar o posicionamento dos moldes (painéis) externos das vigas (Figura 77), necessários para que o aço das vigas seja içado na central de armação e alocado em sua posição no pavimento (Figura 78).

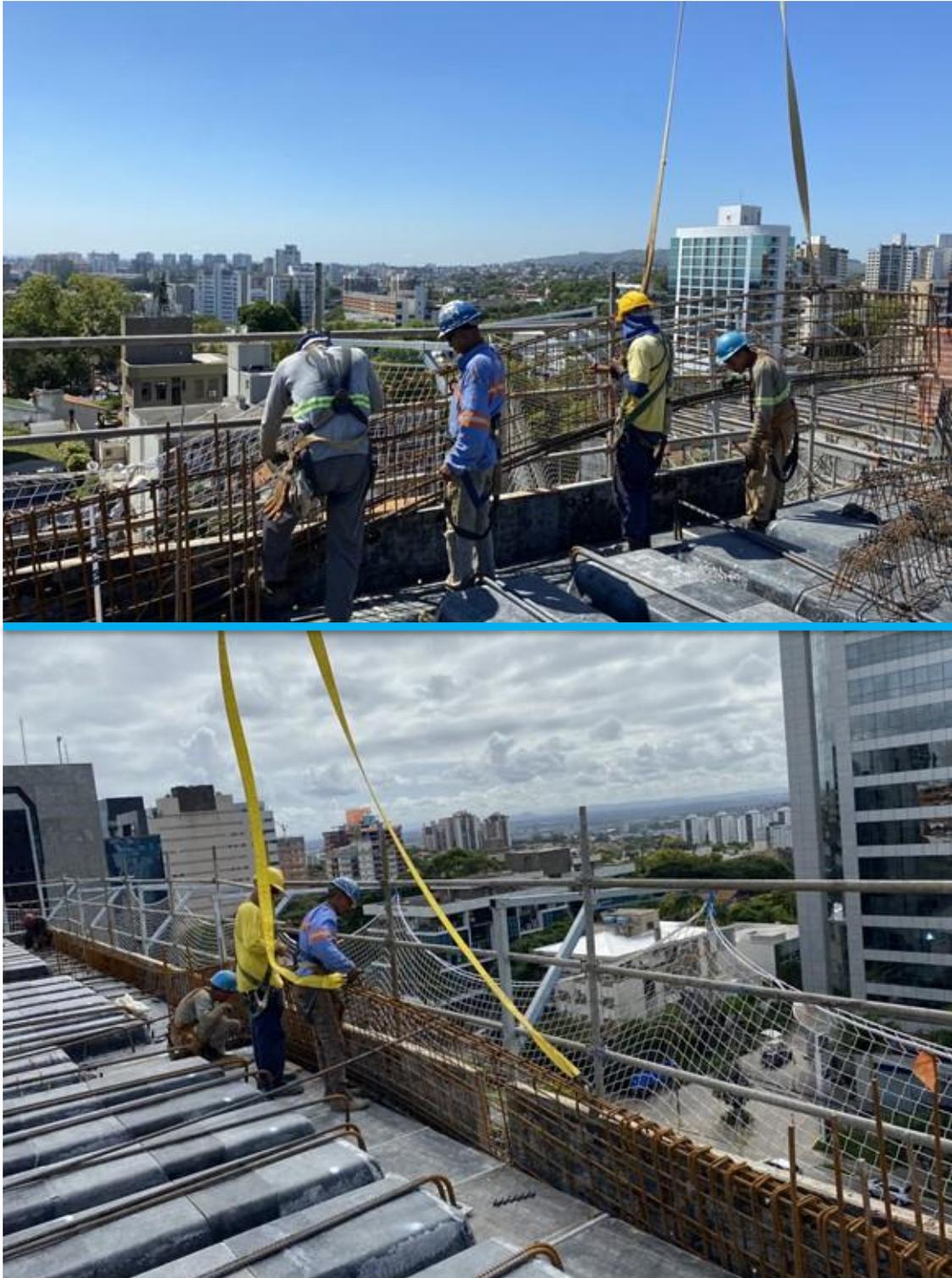
Em paralelo ao posicionamento do aço acontece a locação (Figura 79) e a furação (Figura 80) dos pontos pertinentes às ancoragens ativas nos painéis externos das vigas, marcando sua altura (26-28cm com relação ao fundo da laje) nas chapas compensadas e furando um orifício circular com o diâmetro de 25mm, onde será alojado o nicho cônico.

Figura 77 – Posicionamento dos painéis externos das vigas



(Fonte: Autor)

Figura 78 – Exemplificação do posicionamento do aço de viga com o auxílio da grua  
– C1



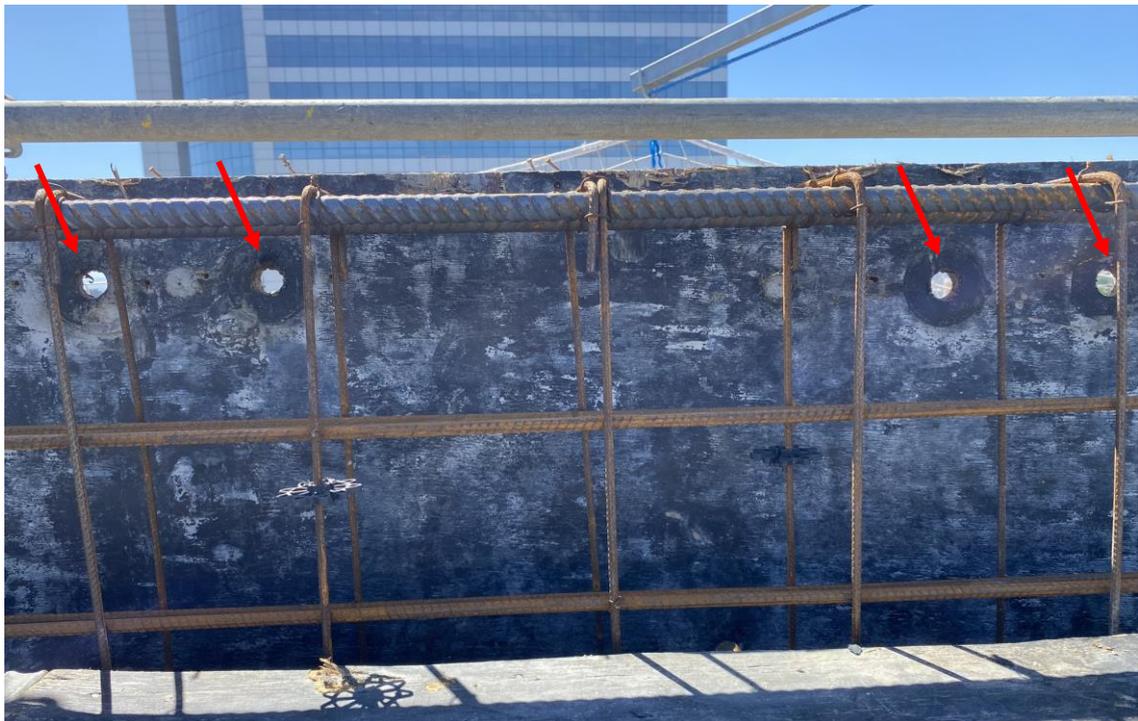
(Fonte: Autor)

Figura 79 – Locação dos pontos de furação para montagem da ancoragem ativa



(Fonte: Autor)

Figura 80 – Ilustração dos furos com 25mm de diâmetro executados para 4 cabos



(Fonte: Autor)

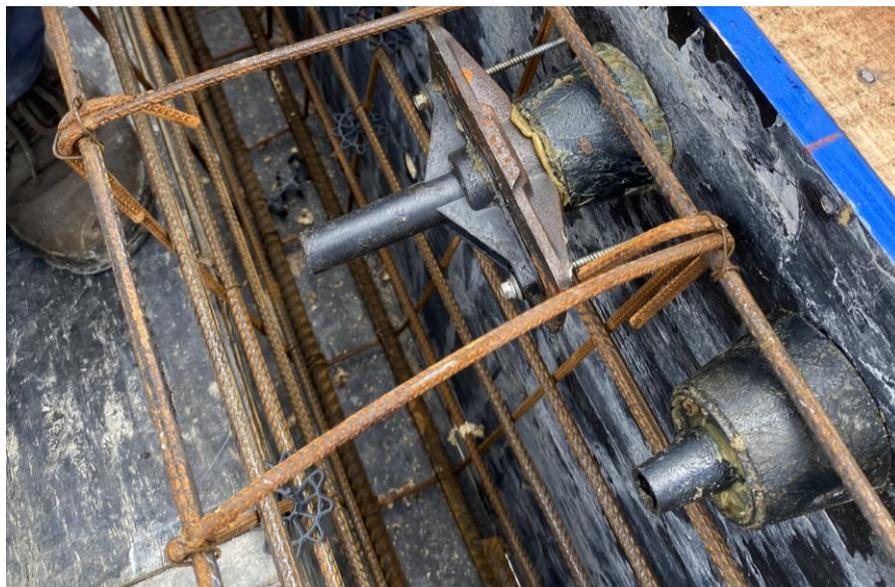
Em seguida prossegue-se com a montagem da ancoragem ativa partindo pela inserção do nicho cônico engraxado no orifício, onde depois a placa metálica e o bico plástico serão encaixados. Por fim, o conjunto é fixado por meio de parafusos e arruelas com o auxílio de uma parafusadeira no painel externo da viga responsável pela ancoragem (Figuras 81 e 82).

Figura 81 – Montagem da ancoragem ativa – parte 1



(Fonte: Autor)

Figura 82 – Montagem da ancoragem ativa – parte 2



(Fonte: Autor)

O resultado final referente ao posicionamento da ancoragem ativa para um par de cabos pode ser visualizado na Figura 83.

Figura 83 – Resultado final da ancoragem ativa para um par de cabos



(Fonte: Autor)

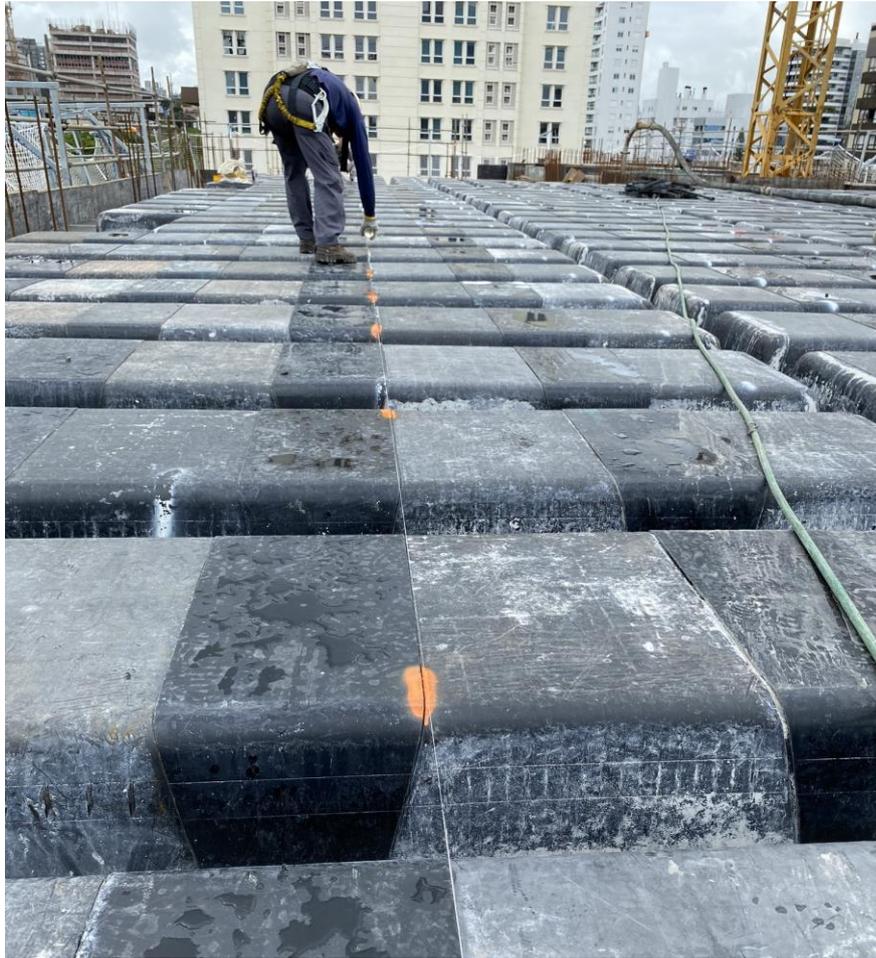
Em paralelo ocorre a marcação horizontal da posição dos suportes responsáveis pela altura dos cabos de protensão. Para tal, parte-se pela marcação das cubetas nas duas extremidades protendidas da laje (Figura 84). Após, um fio de nylon é esticado ligando pontos de mesmas cotas e com um spray colorido as nervuras intermediárias são demarcadas (Figuras 85 e 86).

Figura 84 – Marcação horizontal dos suportes de fixação dos cabos – parte 1



(Fonte: Autor)

Figura 85 – Marcação horizontal dos suportes de fixação dos cabos – parte 2



(Fonte: Autor)

Figura 86 – Marcação horizontal dos suportes de fixação concluída – C2



(Fonte: Autor)

Seguindo, o próximo passo (executado junto às outras atividades desde a colocação do aço das vigas) diz respeito ao posicionamento dos estribos e da armadura positiva da laje. Num primeiro momento são distribuídos os espaçadores tipo centopeia nas nervuras (Figura 87). Depois ocorre o posicionamento dos estribos (Figura 88) e do aço responsável pela armadura positiva no fundo das nervuras (Figura 89). Na Figura 88 também pode ser visto a geometria dos estribos, representada em centímetros.

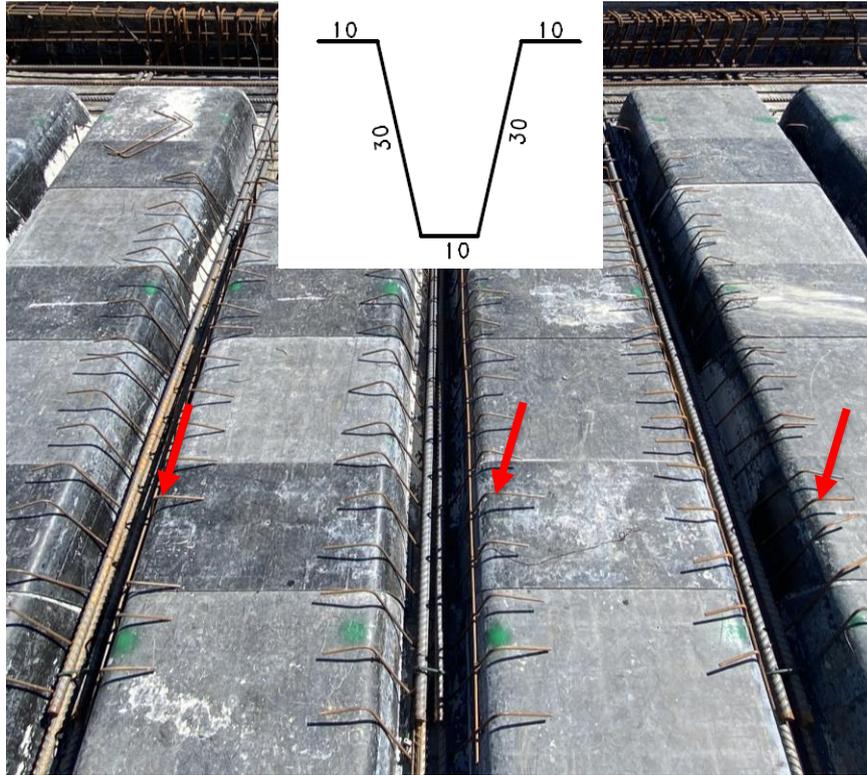
Nota-se pela Figura 89 a representação que ocorre em grande parte das nervuras, composta pelo conjunto de 2 barras de aço com 25mm de diâmetro. Vale ressaltar que foram encontradas dificuldades na realização do traspasse de 110cm dessas barras quando o mesmo ocorria no cruzamento entre nervuras perpendiculares (seta vermelha) devido à falta de compatibilização entre projetos, já que 4 barras de aço com 25mm de diâmetro precisavam coexistir em uma nervura com 12cm de largura e o mesmo não podia ser realizado verticalmente devido à curva acentuada gerada nos cabos de protensão. Sabe-se que houve prejuízos no cobrimento devido ao traspasse lateral nesses trechos.

Figura 87 – Posicionamento dos espaçadores nas nervuras



(Fonte: Autor)

Figura 88 – Posicionamento dos estribos nas nervuras



(Fonte: Autor)

Figura 89 – Posicionamento da armadura positiva da laje

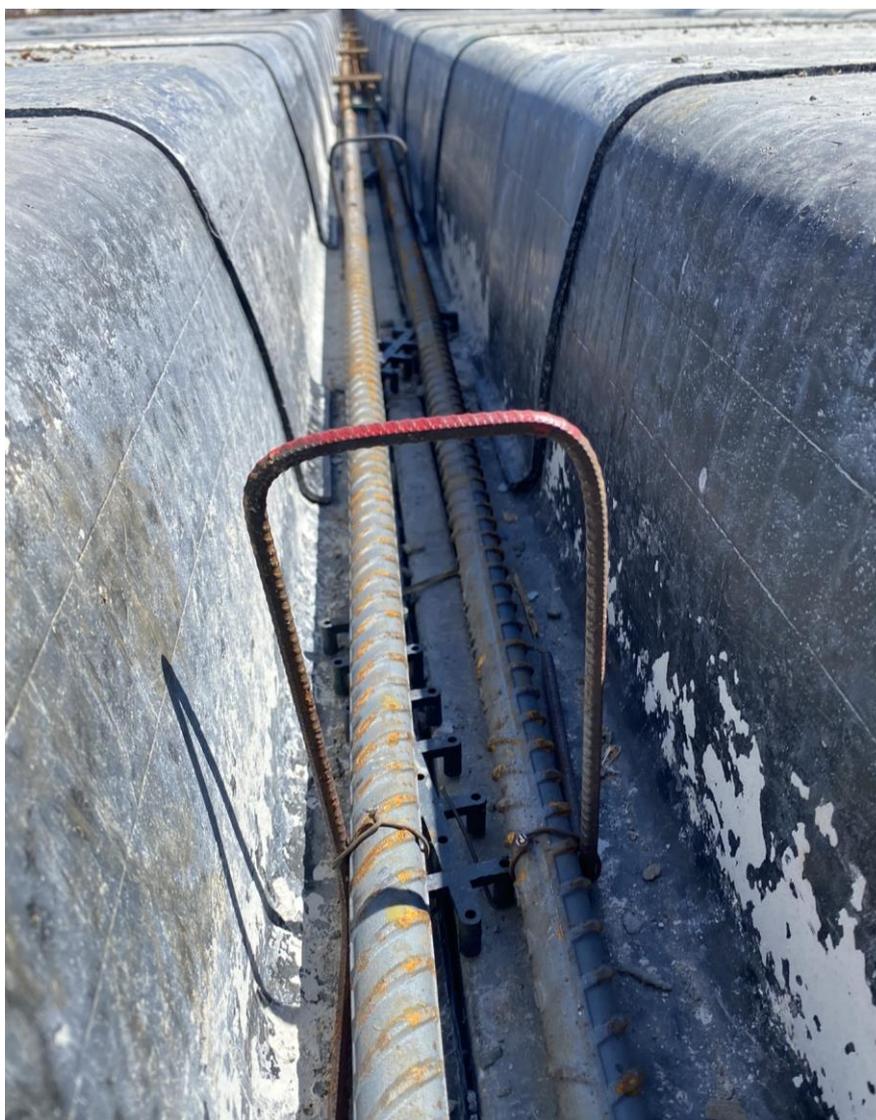


(Fonte: Autor)

Dando sequência, o próximo passo versa acerca da alocação e da fixação das cadeirinhas na armadura positiva (Figura 90) nos pontos previamente demarcados. Lembrando que são elas as responsáveis pela altura correta dos cabos ao longo do trecho protendido. Nota-se que a fixação precisa ser firme e impedir qualquer movimentação indesejada. Uma não conformidade observada na imagem é que as pernas das cadeirinhas estão apoiadas diretamente no fundo da fôrma, causando problemas de cobertura. Uma solução seria o maior cuidado na distribuição dos espaçadores plásticos, garantindo que ambas as pernas das peças ficassem apoiadas.

Ademais, nos trechos de altura mínima (8cm) foram utilizadas treliças metálicas contínuas apoiadas nos espaçadores como suportes de fixação (Figura 91).

Figura 90 – Posicionamento e fixação dos suportes para os cabos (cadeirinhas)



(Fonte: Autor)

Figura 91 – Posicionamento e fixação dos suportes para os cabos (treliças)

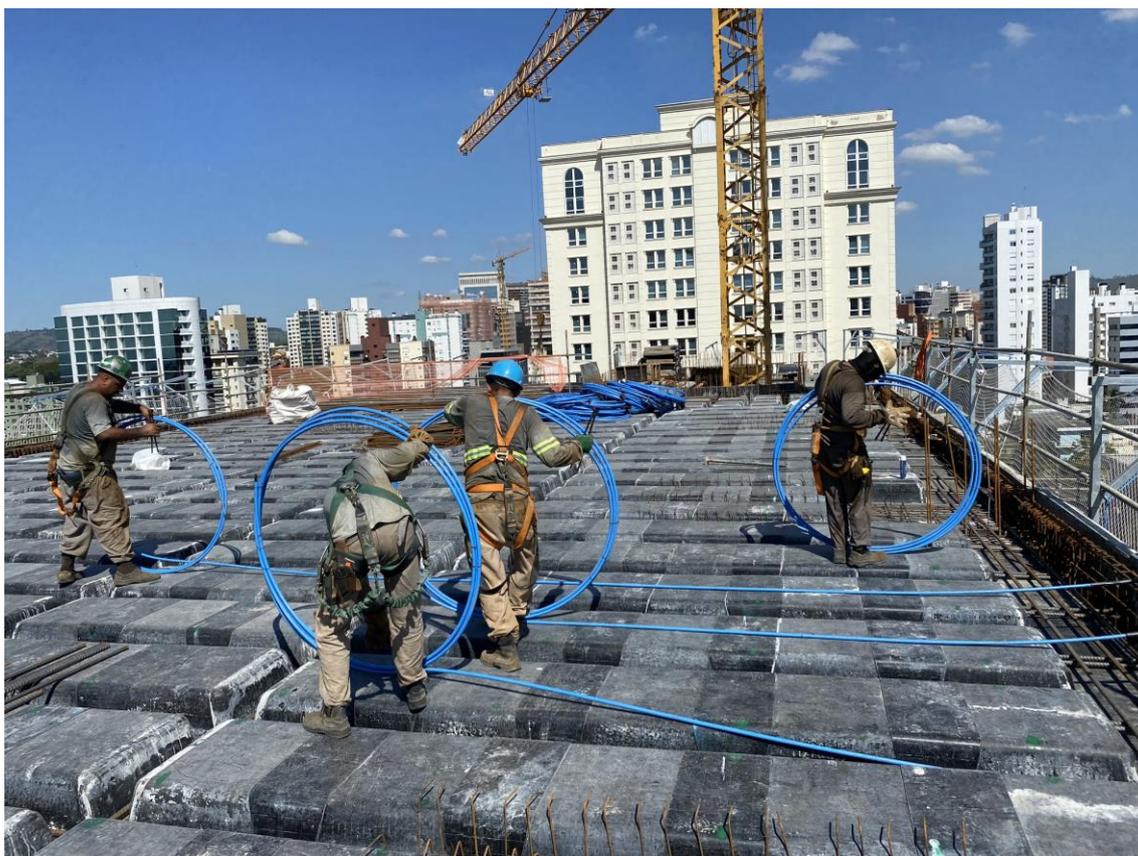


(Fonte: Autor)

Depois de concluída a etapa das cadeirinhas torna-se possível posicionar os cabos de protensão nas nervuras correspondentes. Inicia-se a montagem pela extremidade da ancoragem passiva indo em direção à ativa. Primeiro, o par de cabos é desenrolado na nervura (Figura 92). Depois, a ancoragem passiva é alocada na altura de 28cm e fixada na viga (Figura 93). Observa-se pela Figura 93 que no conjunto há uma bainha de plástico envolvendo o cabo próximo à ancoragem, essencial para que não haja contato do aço de protensão com o concreto. Além disso, nem sempre era utilizada essa barra de suporte adicional (seta vermelha), como mostrado.

Ademais, a Figura 94 visa ilustrar um trecho com o arranjo de cabos da ancoragem passiva após o término de sua instalação.

Figura 92 – Início da montagem dos cabos de protensão – C1



(Fonte: Autor)

Figura 93 – Exemplo de posicionamento e fixação da ancoragem passiva



(Fonte: Autor)

Figura 94 – Arranjo dos cabos na ancoragem passiva após finalização da montagem



(Fonte: Autor)

Após, continua-se com a montagem dos cabos realizando a fixação dos mesmos em seus suportes nos pontos previamente demarcados em spray (Figuras 95 e 96).

A Figura 97 visa ilustrar o perfil longitudinal dos cabos que compõem uma nervura, onde é possível visualizar a curvatura realizada pelos mesmos apoiados sobre as cadeirinhas.

Figura 95 – Dupla de cabos posicionada na nervura e fixada nos suportes



(Fonte: Autor)

Figura 96 – Vista para ancoragem passiva dos cabos posicionados nas nervuras



(Fonte: Autor)

Figura 97 – Perfil longitudinal evidenciando a curvatura dos cabos de protensão



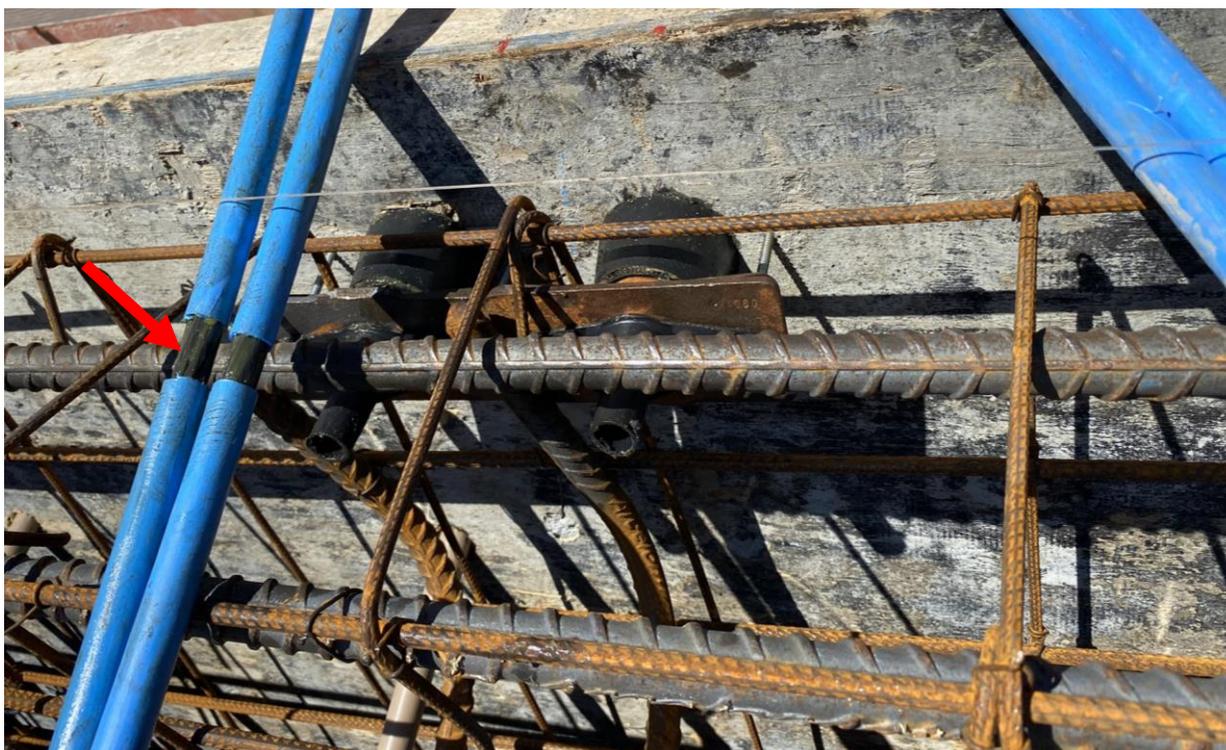
(Fonte: Autor)

Por fim, após a fixação dos cabos nos suportes ser finalizada, termina-se a etapa de montagem dos cabos com a inserção das cordoalhas na ancoragem ativa. Para isso, próximo ao orifício de inserção, na extremidade do cabo, a bainha de plástico é cortada e removida (Figura 98).

Depois, o aço de protensão é inserido no bico plástico correspondente da ancoragem ativa (Figura 99). O resultado dessa inserção pode ser visto na Figura 100. Ademais, para que o macaco hidráulico possa encaixar corretamente nas cordoalhas é fundamental que a ponta das mesmas fique exposta no mínimo 40cm para fora da viga, garantindo a correta execução do tensionamento.

Por último, fixa-se com arame a união dos bicos plásticos e das cordoalhas, para que a bainha não deslize e não ocorra contato do concreto com o aço de protensão (Figura 101).

Figura 98 – Corte e remoção da bainha plástica protetora dos cabos



(Fonte: Autor)

Figura 99 – Inserção das cordoalhas engraxadas expostas nos bicos da ancoragem ativa



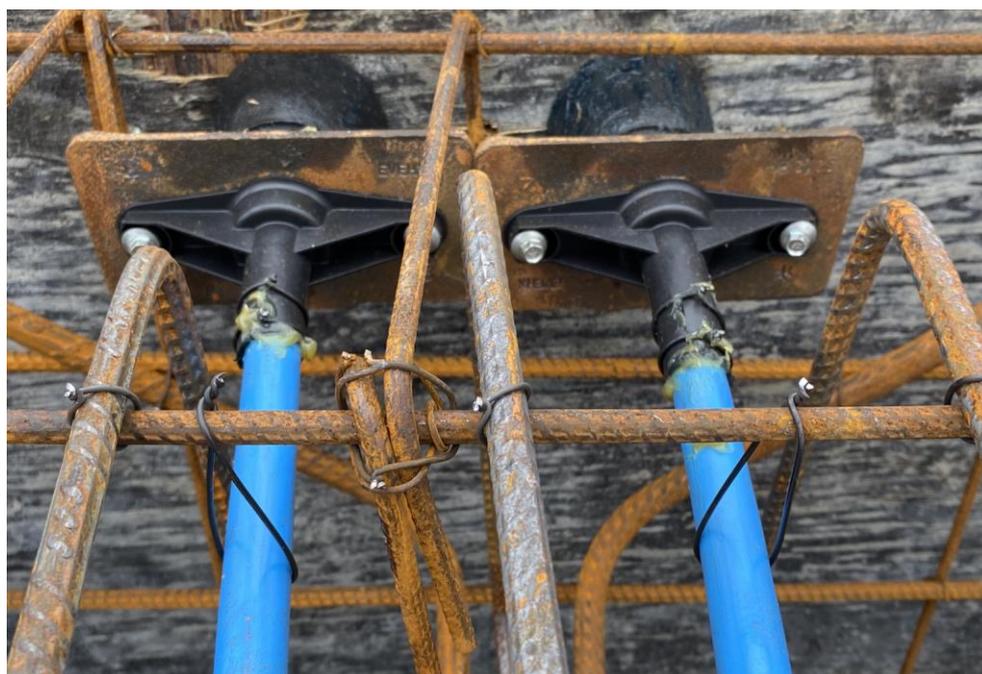
(Fonte: Autor)

Figura 100 – Resultado da inserção dos cabos na ancoragem ativa



(Fonte: Autor)

Figura 101 – Fixações adicionais pertinentes à ancoragem ativa

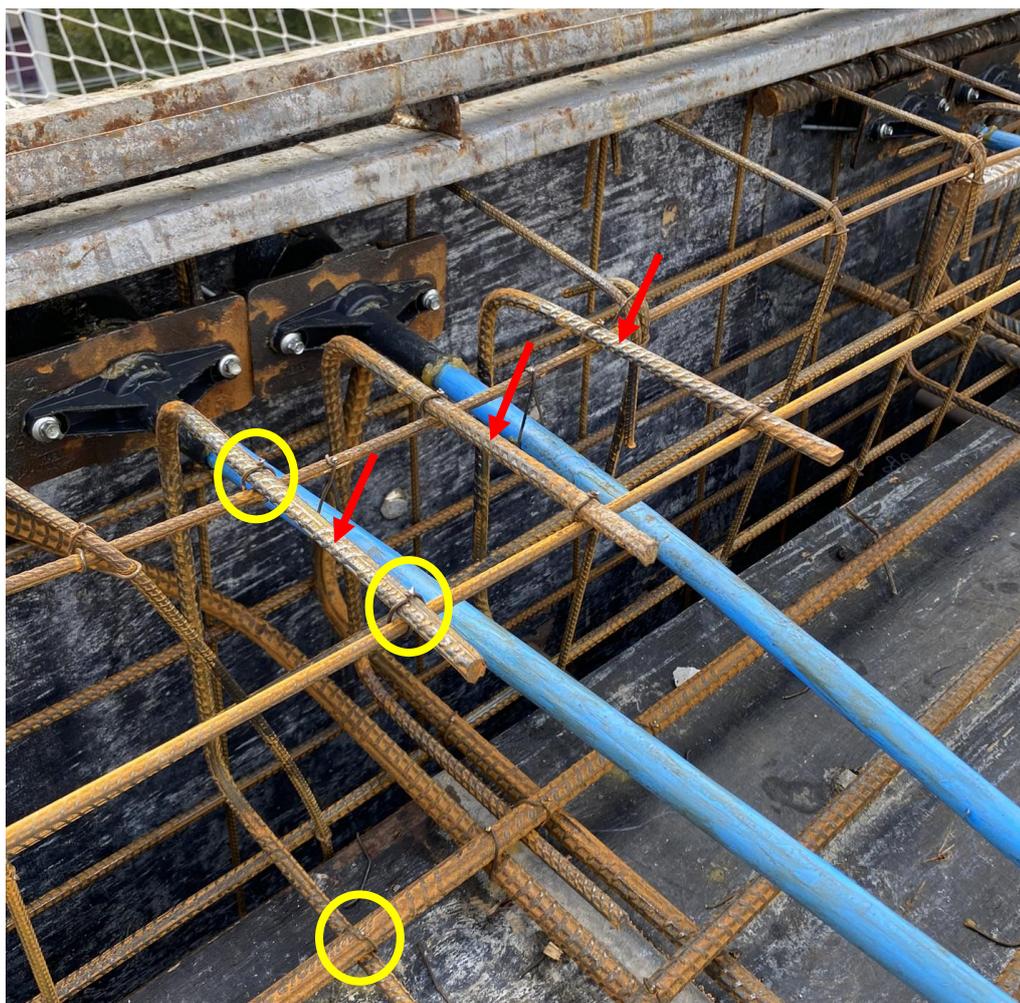


(Fonte: Autor)

Ainda sobre a Figura 101, nota-se que foram utilizados arames para dar sustentação aos cabos, amarrados na barra de aço superior da viga. Esse artifício era empregado para que os mesmos iniciassem seu trajeto horizontais, facilitando que a altura de projeto fosse atingida, uma vez que a gravidade tendia a curv-los para baixo e o espaço nem sempre era favorável.

Seguindo, em paralelo ao serviço de montagem dos cabos ocorre o posicionamento da armadura de fretagem. Como pode ser visto na Figura 102, ela é composta por 3 elementos de aço (flechas vermelhas) por nervura protendida com diâmetro de 10mm, distribuídos nas duas laterais e no meio da dupla de cordoalhas. Além disso, é fundamental que o corpo de cada peça seja fixado em no mínimo 3 pontos estando firme e impedindo movimentaes indesejadas. Nesse caso, notam-se os pontos de fixação (círculos amarelos) na armadura positiva da laje, no fechamento superior da viga e em uma barra de montagem auxiliar, que percorre todo o trecho protendido.

Figura 102 – Montagem da armadura de fretagem finalizada



(Fonte: Autor)

Por fim, a última etapa referente a montagem do aço (ativo e passivo) da laje diz respeito ao posicionamento das telas de distribuição e das barras de armadura negativa. Num primeiro momento são distribuídos espaçadores plásticos sobre as cubetas (Figura 103), a fim de garantir o cobrimento correto de 2,5cm das telas de distribuição, compostas por aço com diâmetro de 4,2mm e as próximas a serem posicionadas (Figuras 104 e 105).

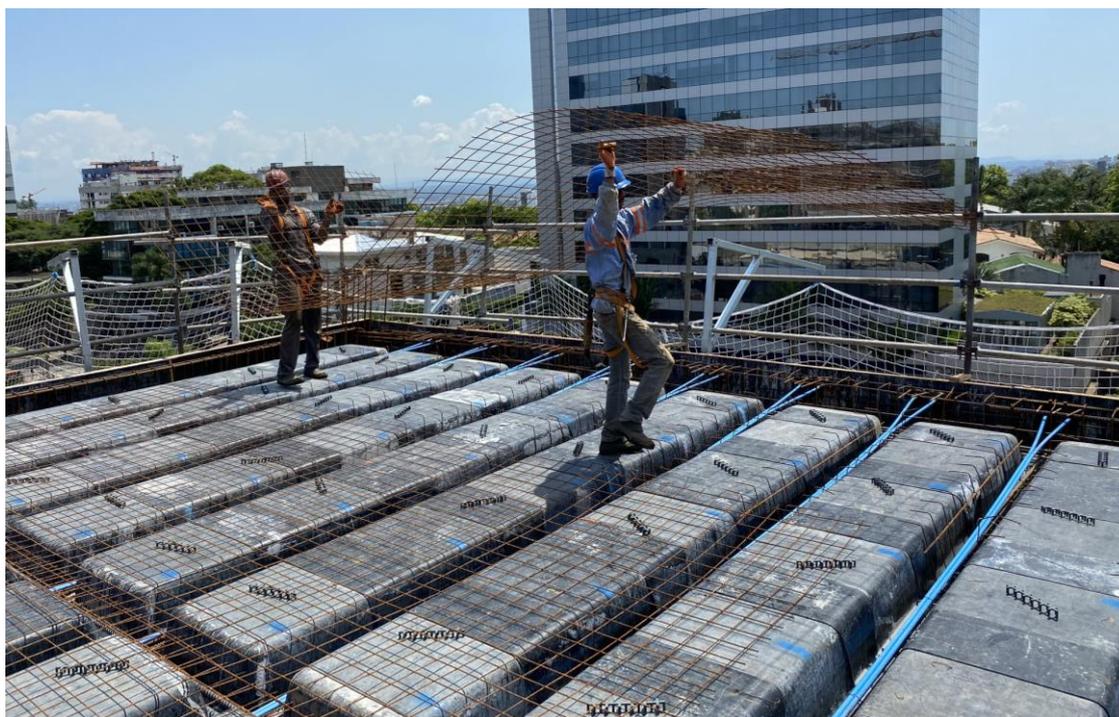
Percebeu-se ao longo dos ciclos executivos a necessidade de fixar os espaçadores nas telas, uma vez que o trânsito de pessoas, de materiais e a vibração do mangote nos dias de concretagem acaba deslocando os mesmos, que caem nas nervuras, causam retrabalhos e prejuízos.

Figura 103 – Posicionamento dos espaçadores nas cubetas



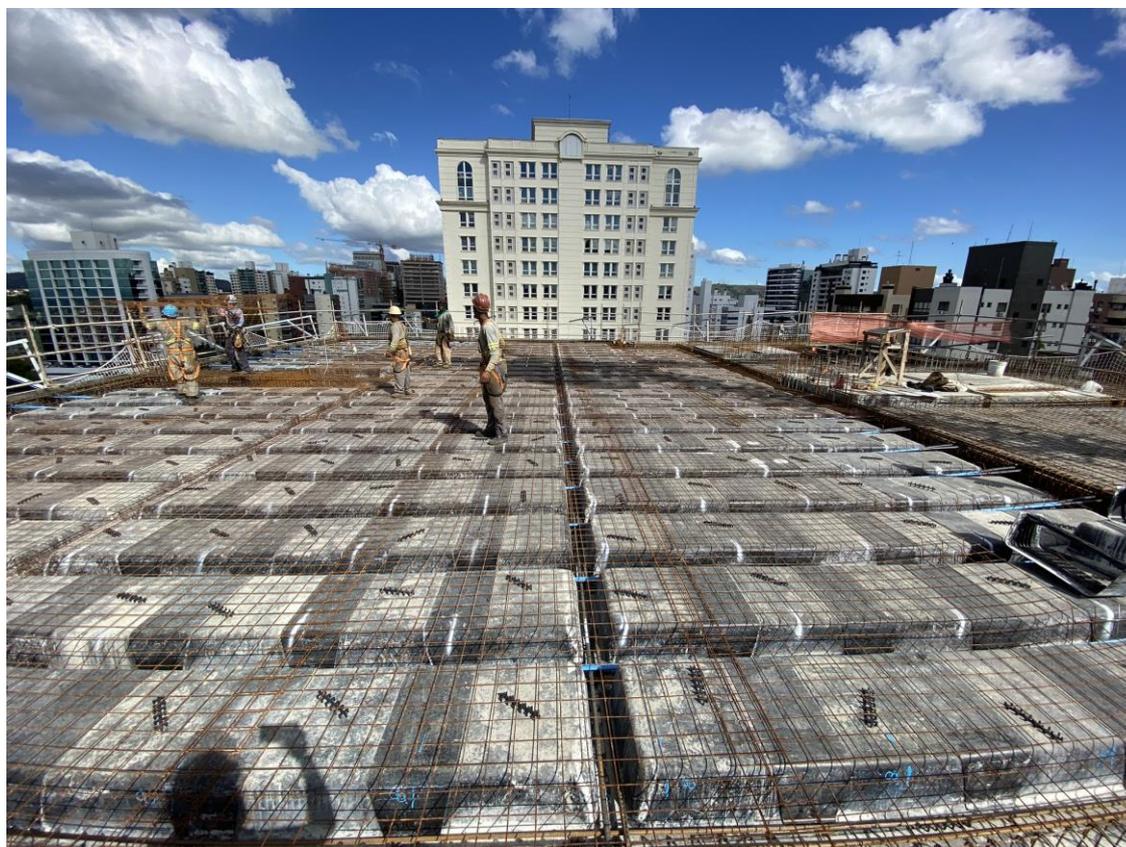
(Fonte: Autor)

Figura 104 – Posicionamento das telas de distribuição em execução



(Fonte: Autor)

Figura 105 – Finalização do posicionamento das telas de distribuição



(Fonte: Autor)

Depois das telas ocorre a montagem da armadura negativa, que fica engastada nas vigas de borda e é composta por uma dupla de barras na direção das nervuras (Figuras 106 e 107), variando no diâmetro e no comprimento conforme solicitado por projeto. Perpendicularmente às nervuras e ao longo de todo o perímetro da laje, nas bordas, também são posicionadas barras de aço para combate dos esforços negativos (Figura 108). Ademais, a armadura negativa é separada das telas por meio de treliças metálicas, onde são ponteadas com arame.

Figura 106 – Armadura negativa na direção das nervuras com diâmetro de 16mm



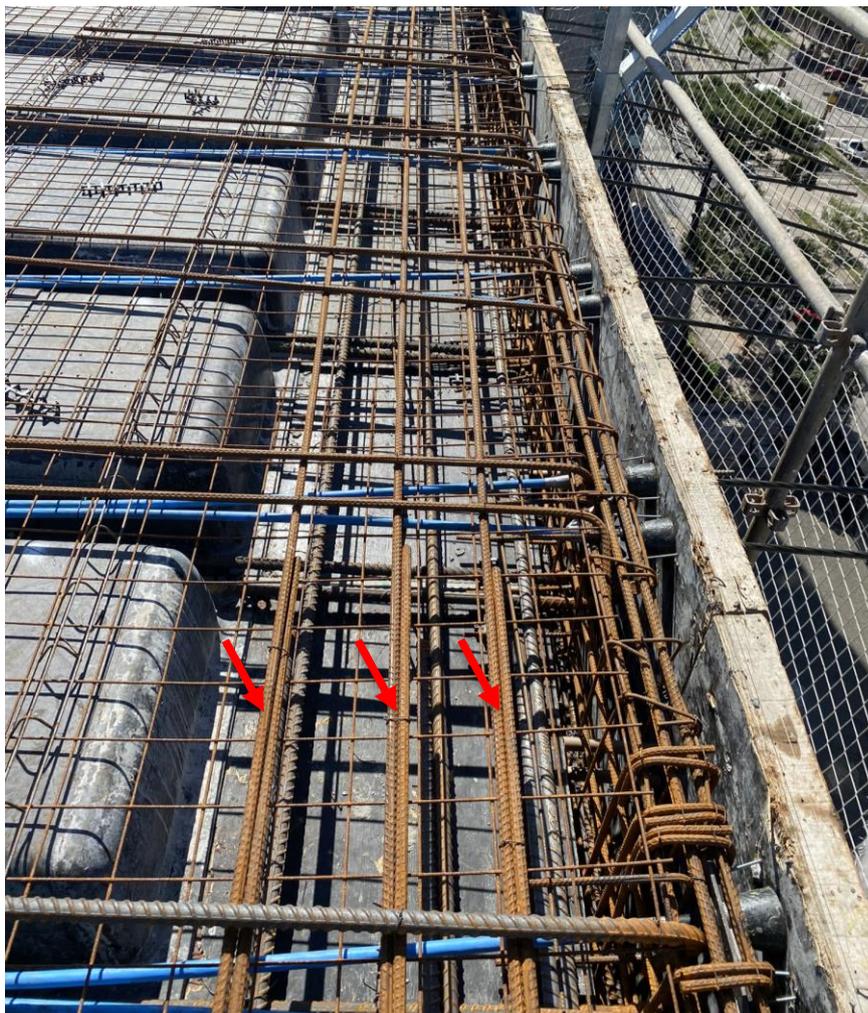
(Fonte: Autor)

Figura 107 – Armadura negativa na direção das nervuras com diâmetro de 25mm



(Fonte: Autor)

Figura 108 – Armadura negativa perimetral (na direção dos trechos maciços)

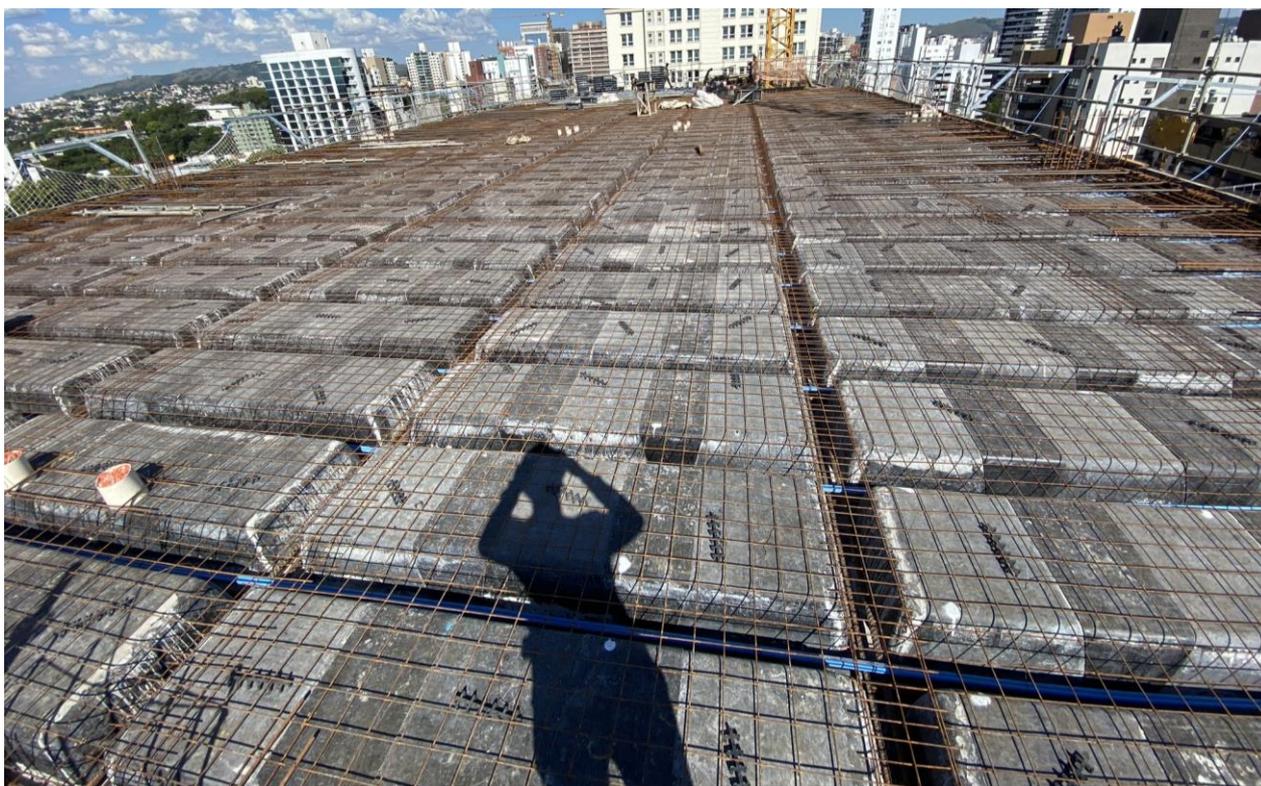


(Fonte: Autor)

Concluída a montagem do aço ativo e passivo da laje ocorre a última etapa antes da concretagem, que diz respeito aos ajustes finais de alinhamento, nivelamento e travamento das fôrmas (lajes, vigas e pilares).

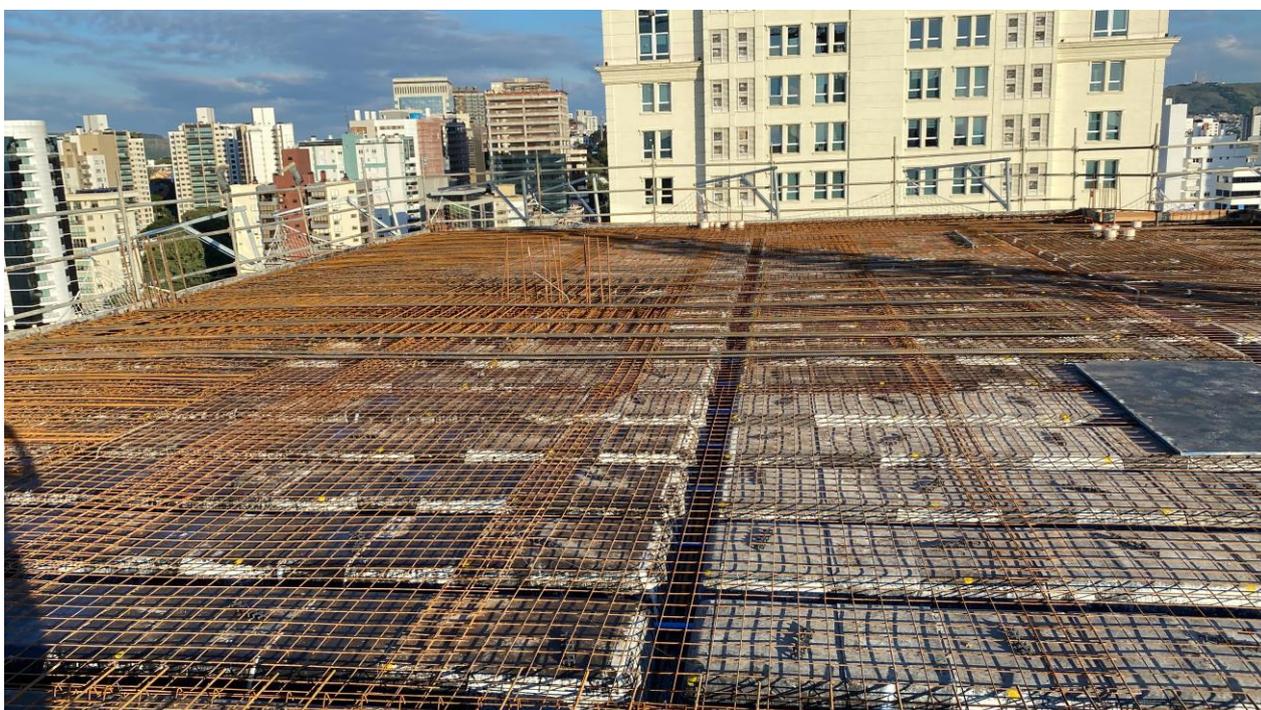
Por fim, a configuração final nesse momento dos trechos C1 e C2 pode ser vista nas Figuras 109 e 110, respectivamente. A fim de exemplificação também está ilustrada a região maciça do trecho C2 (Figura 111).

Figura 109 – Configuração final da montagem da laje antes da concretagem – C1



(Fonte: Autor)

Figura 110 – Configuração final da montagem da laje antes da concretagem – C2



(Fonte: Autor)

Figura 111 – Configuração final de trecho maciço antes da concretagem – C2



(Fonte: Autor)

Outro ponto importante a ser mencionado são as verificações *in loco* realizadas pela equipe de engenharia referentes ao controle de qualidade da execução, fundamental para que o sistema protendido seja eficiente, durável e seguro.

Nesse sentido a empresa dispunha de três tipos de fichas de verificação de serviço com os principais pontos a serem observados. Um para protensão (Tabela 6), outro para lajes e vigas (Tabela 7) e um último para os pilares.

Vale ressaltar que o trabalho realizado pela equipe de engenharia ia muito além da aplicação das fichas de verificação, acompanhando a execução diariamente, sanando dúvidas e evitando problemas antes mesmo que acontecessem, diminuindo retrabalhos e otimizando o processo.

Tabela 6 – Ficha de verificação de serviço (FVS) - Protensão

OBRA:		EMPREENHEIRO EXECUTANTE:													
PAVTO:		TRECHO:													
*Caso o serviço conferido esteja além da tolerância permitida, o valor encontrado na medição deve ser anotado.															
*Caso o serviço conferido esteja dentro da tolerância permitida, preencher com visto.															
NÚMERO DO CABO	Critérios:	A	B	C	D	E	F	H	I	J	K	L	M	N	O
		Verificação da Bainha	Verificação das alturas dos Cabos e das amarrações	Verificar aspecto das curvas suaves	Firmeza das ancoragens ativas e das saídas	Fretagens e reforços	Espaço útil do macaco para a protensão	Quantidade dos cabos	Afastamento dos cabos	Alinhamento o de acordo com o projeto estrutural	Altura dos pontos máximos e mínimos	Alturas das ancoragens ativas e passivas	Alinhamentos das ancoragens ativas e passivas	Terminalidade	Limpeza
Tolerâncias		Visual	Conforme Projeto	Conforme Projeto	Visual	Conforme Projeto	Visual	Visual	Conforme Projeto	Conforme Projeto	Conforme Projeto	Conforme Projeto	Conforme Projeto	Visual	Visual
1															
2															
3															
Data:										Ass. Eng.º Responsável:					
<input type="radio"/> APROVAÇÃO OBRA <input checked="" type="radio"/> REPROVAÇÃO OBRA <input checked="" type="radio"/> APROVAÇÃO OBRA COM RETRABALHO												VISTORIAS OBRA Ass. Conferente 1º VISTORIA _____ 2º VISTORIA _____ 3º VISTORIA _____			

(Fonte: Arquivo da Construtora)

Tabela 7 - Ficha de verificação de serviço (FVS) – Vigas e lajes

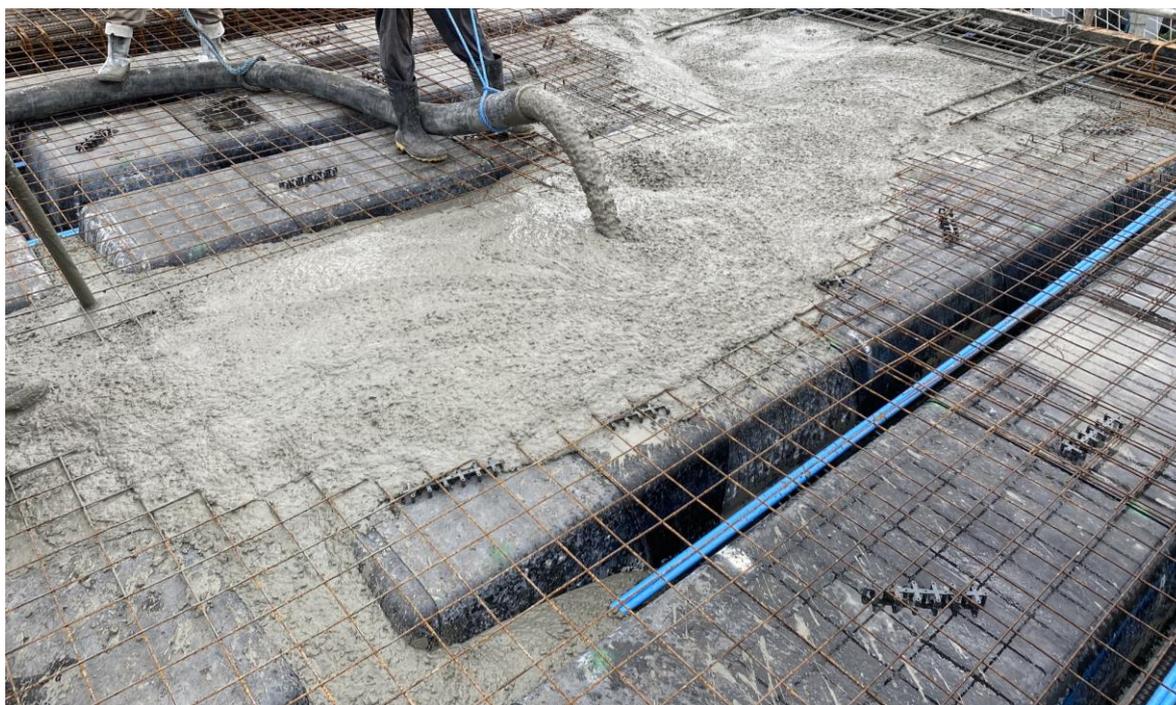
OBRA:		EMPREENHEIRO EXECUTANTE:															
PAVTO:		TRECHO:															
*Caso o serviço conferido esteja além da tolerância permitida, o valor encontrado na medição deve ser anotado.																	
*Caso o serviço conferido esteja dentro da tolerância permitida, preencher com visto.																	
ELEMENTO	Elemento / Pavto	Critérios:	A	B	C	E	F	G	H	I	J	K	L	M	Observações:	Volume de concreto do trecho (m3)	Nota Fiscal
			CONFEÇÃO FORMAS		MONTAGEM DAS FORMAS			MONTAGEM ARMADURA					Termin	Limpeza			
			Dimensões das peças	Estruturação dos painéis	Locação da estrutura	Nivelamento e alinhamento (vigas e lajes)	Marcação dos furos para tubulações	Escoramento / Reescoramento	Conferência das bitolas	Conferência da distribuição e quantidade cfe projeto	Cobrimento cfe projeto	Limpeza da forma antes do lançamento do concreto	Visual	Visual			
		Tolerâncias	5mm	VISUAL	PROJETO	5mm	PROJETO	VISUAL	PROJETO	15mm	5mm	VISUAL	VISUAL	VISUAL			
1																	
2																	
3																	
Data:				Ass. Conferente Empreiteiro:				Ass. Eng.º Responsável:				Nome do Conferente obra:					
<input type="radio"/> APROVAÇÃO EMPREENHEIRO <input checked="" type="radio"/> REPROVAÇÃO DA OBRA <input checked="" type="radio"/> APROVAÇÃO DA OBRA <input checked="" type="radio"/> APROVAÇÃO COM RETRABALHO												VISTORIAS DA OBRA Ass. Conferente: 1º VISTORIA: _____ data: _____ 2º VISTORIA: _____ data: _____ 3º VISTORIA: _____ data: _____					

(Fonte: Arquivo da Construtora)

Dando sequência, após todas as inspeções serem realizadas e validadas é chegado o momento da concretagem das lajes e das vigas. Utiliza-se para tal o método bombeado, no qual uma bomba específica recebe o concreto dos caminhões e o bombeia para o pavimento em execução por meio de tubulações horizontais e verticais previamente instaladas.

Assim, após a montagem dos mangotes na laje, inicia-se a concretagem (Figura 112) pela extremidade oposta ao centro da edificação (onde encontrava-se a tubulação vertical de subida do concreto), possibilitando ir-se diminuindo/cortando o tamanho dos mangotes ao longo do tempo.

Figura 112 – Início da concretagem das lajes e vigas



(Fonte: Autor)

Um dos pontos chave para o sucesso dessa etapa está na atenção com o preenchimento e o adensamento correto das nervuras (Figuras 113) e dos trechos maciços (Figura 114), fazendo com que o concreto envolva totalmente os cabos de protensão e as barras de aço, de maneira que não ocorram vazios de concretagens e o cobrimento mínimo seja respeitado.

Além disso, pontua-se que o uso de concreto com *slump* alto (17-18cm) e apenas brita 0 foi essencial para que os vazios de concretagem fossem mitigados (até zerados em alguns pavimentos).

Uma das possíveis soluções a ser adotada nesse caso seria o uso de concreto autoadensável. Entretanto, esse sistema enfrentaria complicações frente à dificuldade de estanqueidade total dos moldes plásticos (cubetas).

Figura 113 – Concreto preenchendo completamente a nervura após ser adensado



(Fonte: Autor)

Figura 114 – Concretagem e adensamento em andamento em trecho maciço



(Fonte: Autor)

Após o lançamento e o adensamento ocorrem os serviços referentes ao acabamento superficial do concreto. Inicialmente, com o auxílio de um nível a laser, são marcados pontos de referência (Figura 115) de acordo com o nível final do piso do pavimento. A partir desses pontos, conhecidos também como “mestras”, nivela-se o piso com o uso de régua metálicas (Figura 116). Por fim é realizado o acabamento do tipo *float* (Figura 117) com o uso de um *float* metálico, responsável pelo alisamento e nivelamento final da superfície.

Pontua-se também que o piso, posteriormente, será do tipo elevado, com 15cm de distância para a laje bruta, possibilitando a alocação das tubulações elétricas, hidráulicas e afins.

O resultado após a finalização dos serviços de concretagem do trecho C1 e do trecho C2 pode ser visto nas Figuras 118 e 119, respectivamente.

Figura 115 – Marcação dos pontos de referência de nível do concreto



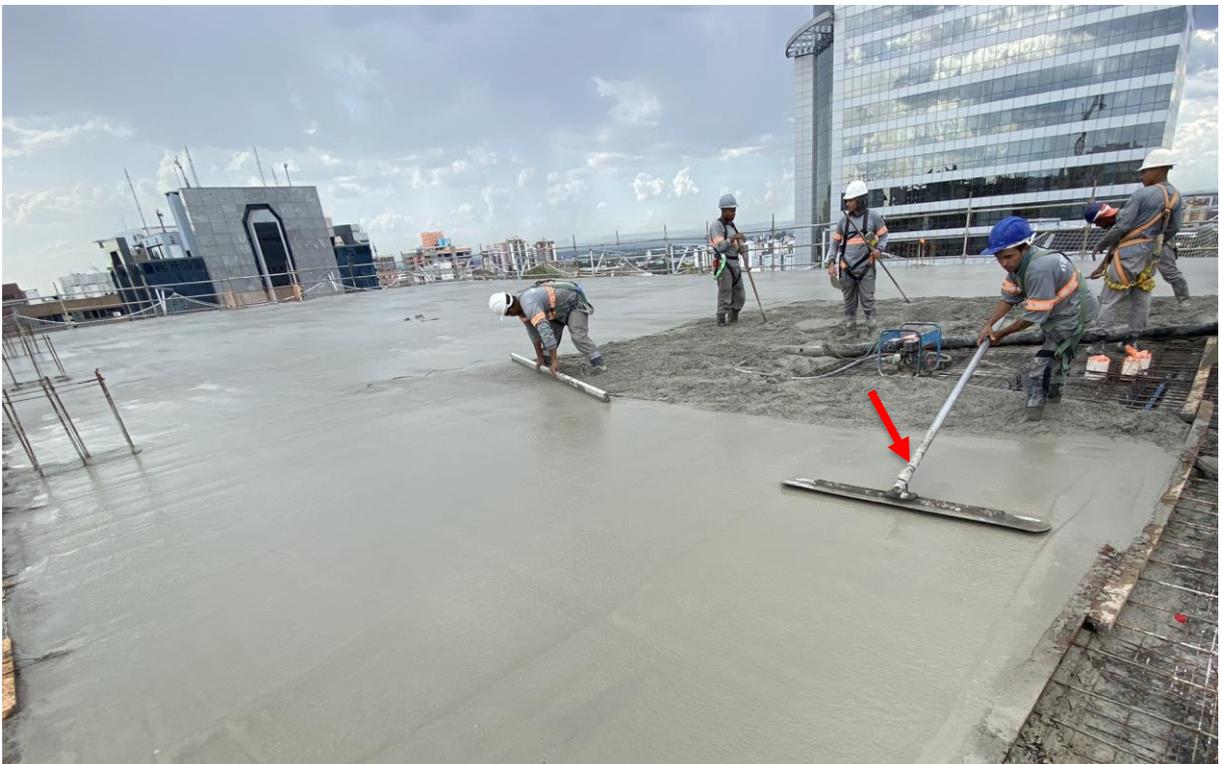
(Fonte: Autor)

Figura 116 – Nivelamento do concreto com o uso de régulas metálicas



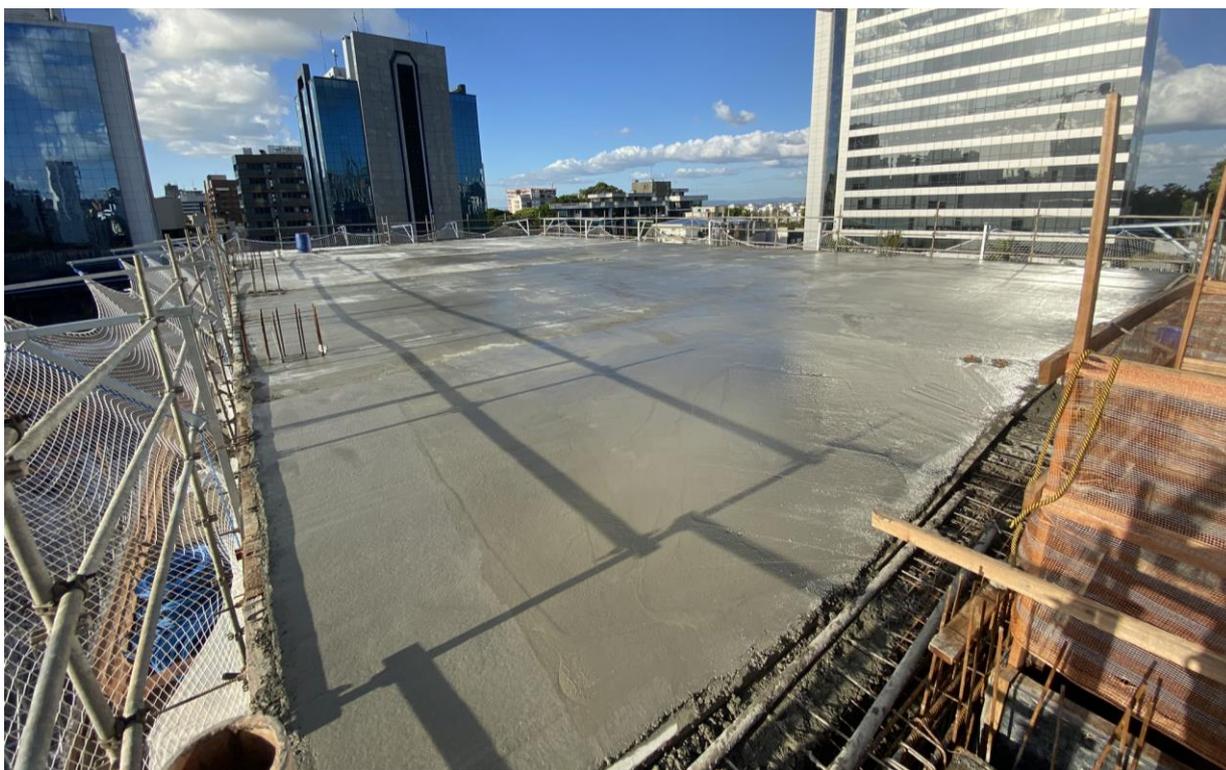
(Fonte: Autor)

Figura 117 – Acabamento final floateado com o uso de float metálico



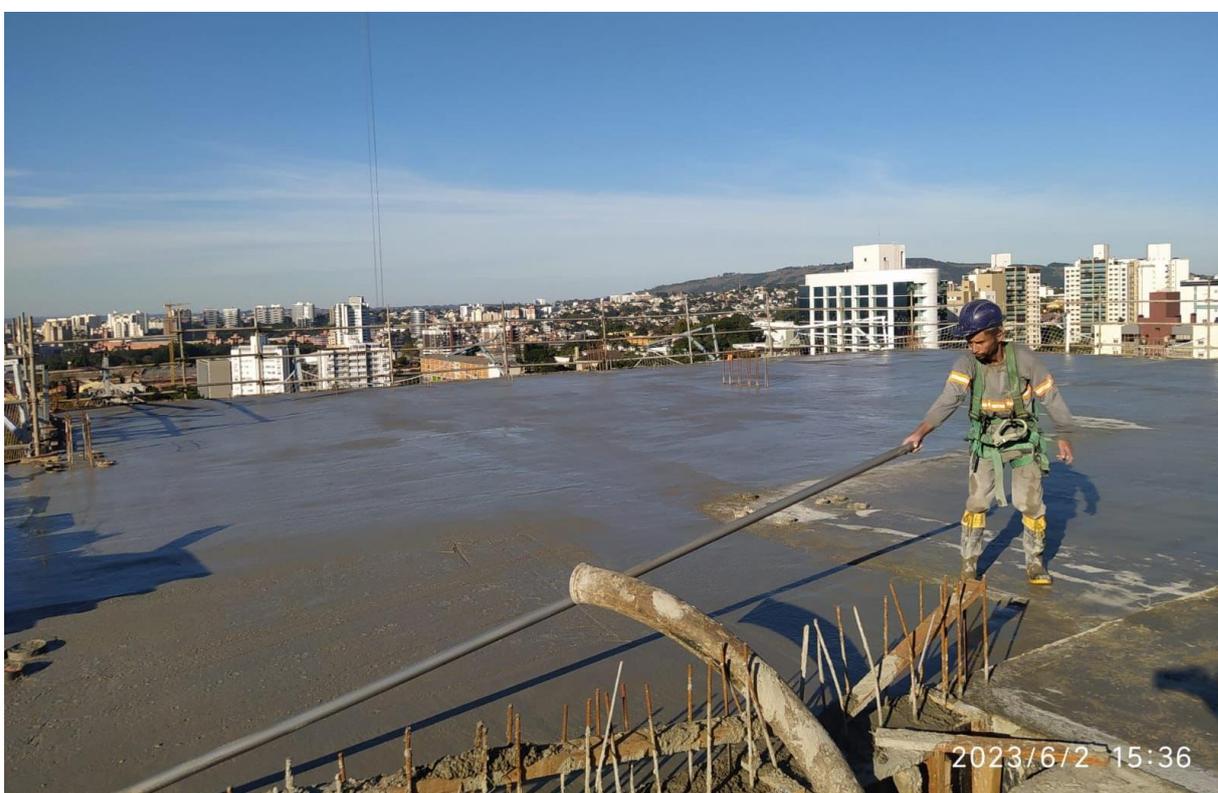
(Fonte: Autor)

Figura 118 – Resultado final da laje após concretagem – C1



(Fonte: Autor)

Figura 119 – Resultado final da laje após concretagem – C2



(Fonte: Autor)

Por fim acontece a cura do concreto, podendo-se classificar como cura química o método adotado nesse trabalho, uma vez que foi utilizado o produto “Hidrocura SF” da marca “Polipiso”, aplicado na superfície por meio de microaspersão em forma de pequenas gotículas (Figura 121). Tal produto é composto por silicato de sódio e nanossílica, que penetram por capilaridade na superfície e reagem junto aos hidróxidos de cálcio do concreto, tratando-se de uma cura de ação interna, sem formação de película superficial.

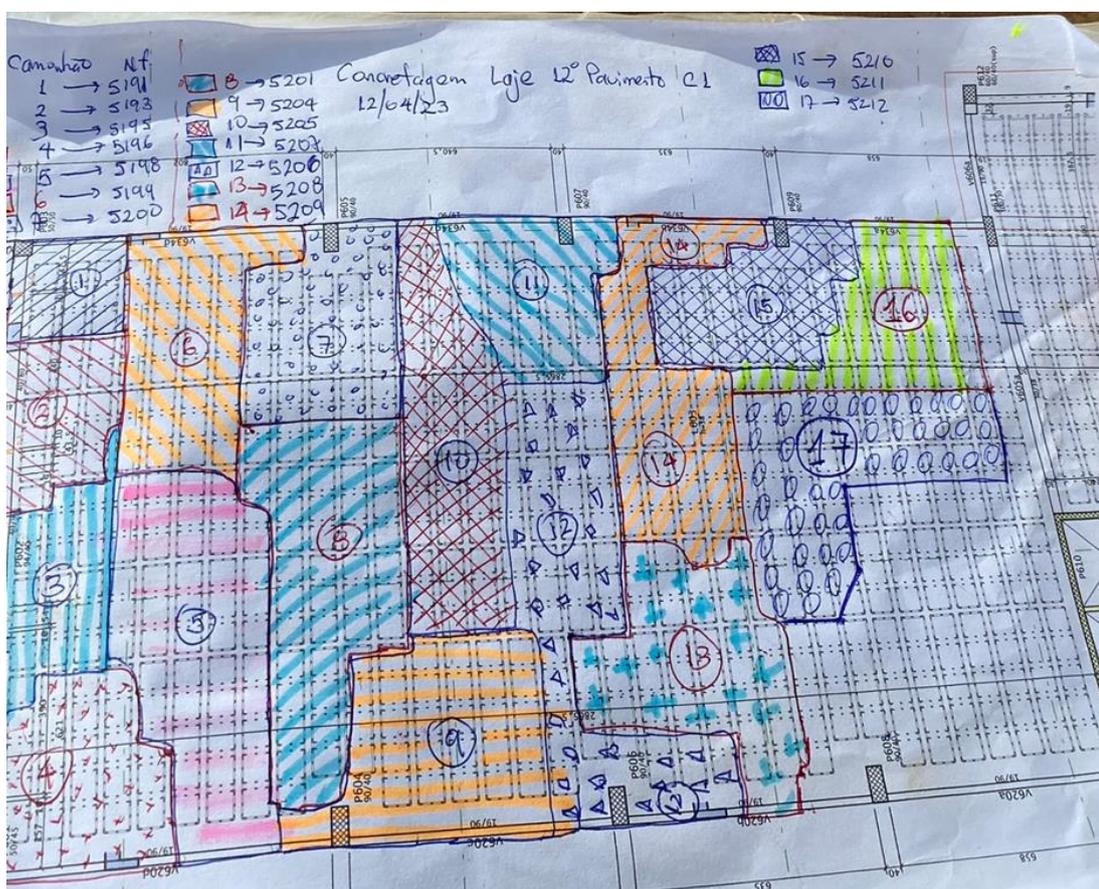
Figura 120 – Aplicação de produto para cura química do concreto



(Fonte: Autor)

Dando sequência, a próxima etapa diz respeito ao tensionamento dos cabos de protensão. Entretanto, para que isso seja possível o concreto precisa apresentar resistência maior ou igual a 30MPa. Nesse sentido atua o controle tecnológico de qualidade do concreto, realizado por duas empresas terceirizadas além da própria concreteira, fornecendo relatórios com ensaios de ruptura dos corpos de prova para cada caminhão de concreto após 7 dias, 21 dias, 28 dias e, se necessário, nos 63 dias. Eram extraídos 12 corpos de prova por caminhão. Pontua-se também a importância da realização da rastreabilidade do concreto durante as concretagens (Figura 121), fundamental para se ter ciência da resistência em cada ponto (após os resultados dos relatórios de ruptura) de acordo com o caminhão correspondente.

Figura 121 – Rastreabilidade do concreto de acordo com o caminhão correspondente  
– trecho C1



(Fonte: Autor)

Normalmente no 7º dia as amostras já apresentavam valores superiores à 30MPa. Contudo, a pedido do cliente e com a justificativa de esperar para se protender quando o concreto atingisse um módulo de elasticidade maior, deixou-se para tensionar os cabos mais tardiamente, entre 10

e 13 dias após a concretagem, de 2 a 5 dias antes do pavimento superior ser concretado. Pontua-se que não eram realizados ensaios para medir o módulo de elasticidade, uma vez que o critério de protensão real estava diretamente relacionado à resistência à compressão conhecida nos relatórios de ruptura dos corpos de prova.

Ademais, para que o tracionamento dos cabos possa ser realizado é necessário deformar os painéis laterais externos das vigas correspondentes ao espaço da ancoragem ativa (Figura 122). Também é preciso remover o nicho cônico plástico (Figura 123) e realizar a limpeza do orifício (anteriormente a colocação das cunhas para que sujidades não prejudiquem no processo de cravação). Depois as cunhas bipartidas são inseridas nas cavidades das placas de ancoragem, aguardando pelo macaco hidráulico, responsável pela cravação.

Por último, antes do tensionamento propriamente dito, são realizadas marcas com spray (Figura 124) na ponta dos cabos a uma distância constante do concreto, utilizadas para a medição do alongamento dos mesmos. Outro ponto importante é a certificação de que o macaco hidráulico e o manômetro estão aferidos, além de que não existam falhas de concretagens na região.

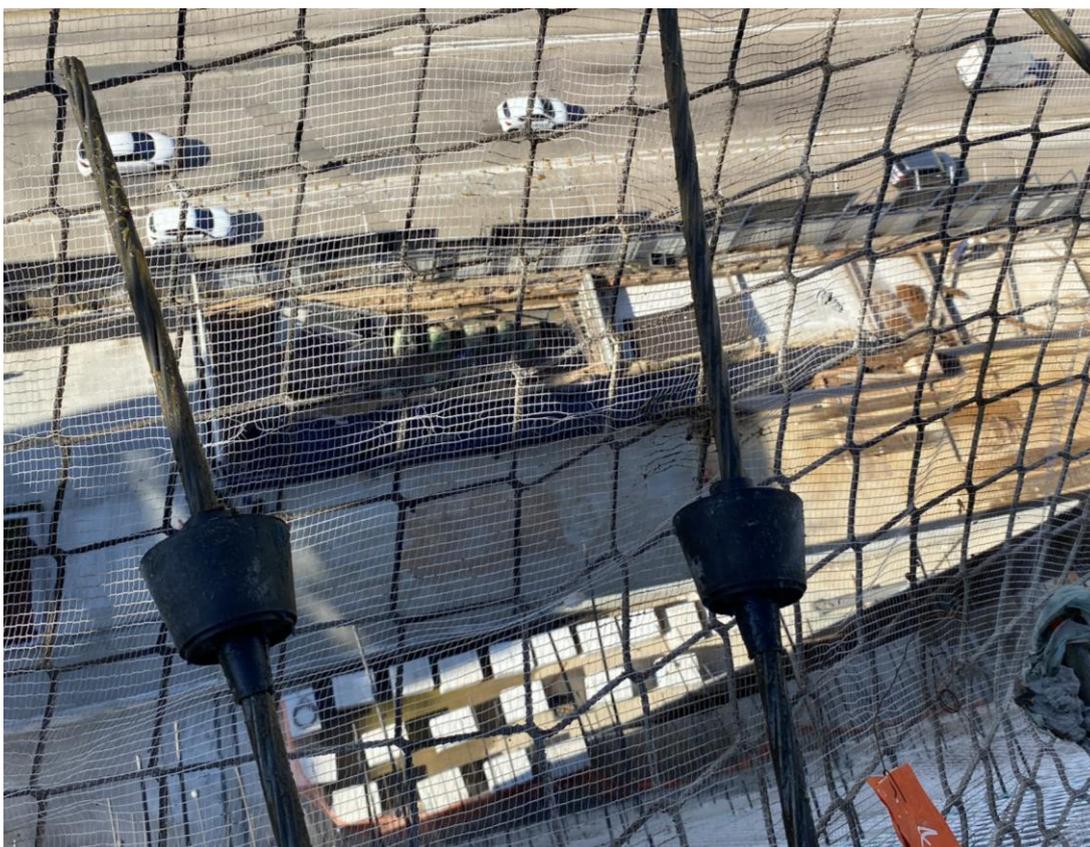
Por fim ocorre a protensão dos cabos com o macaco hidráulico (Figuras 125 e 126), sendo que o parâmetro de controle para o processo é a força de protensão (21.000kgf). Para exemplificar, a Figura 127 apresenta uma vista frontal dos cabos protendidos e encunhados.

Figura 122 – Desforma dos painéis externos da viga na ancoragem ativa



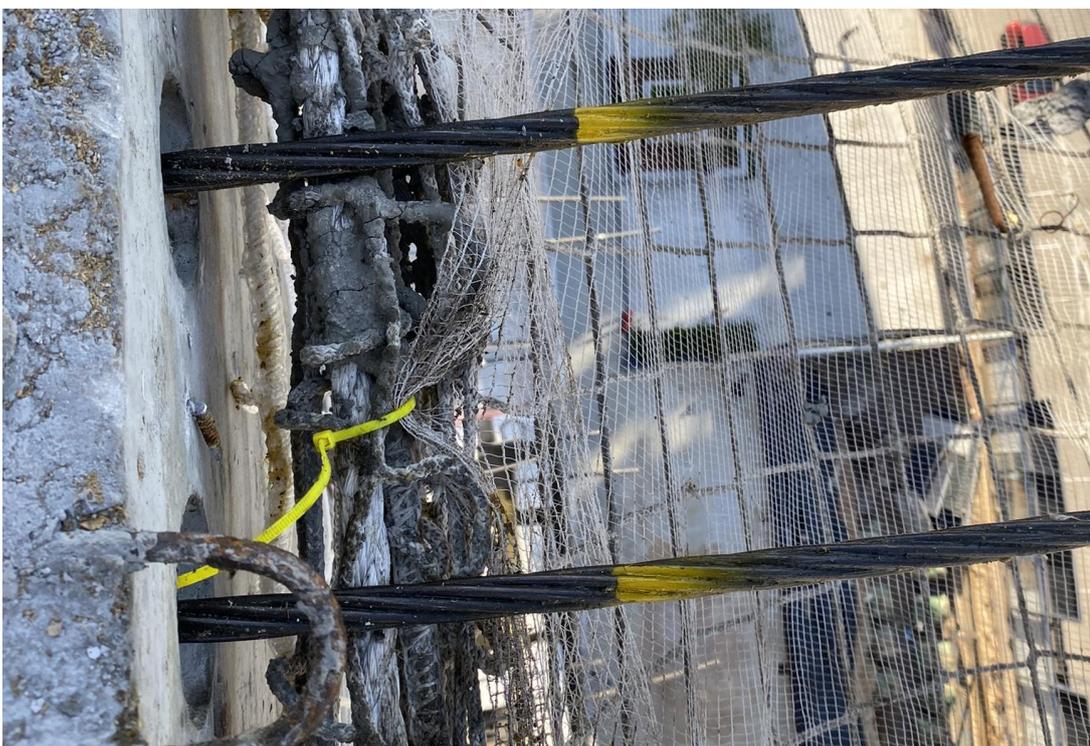
(Fonte: Autor)

Figura 123 – Remoção dos nichos cônicos para possibilitar a protensão



(Fonte: Autor)

Figura 124 – Marcação nos cabos com spray para medir o alongamento final



(Fonte: Autor)

Figura 125 – Macaco hidráulico realizando a protensão dos cabos



(Fonte: Autor)

Figura 126 – Vista do manômetro acoplado à bomba do macaco durante a protensão



(Fonte: Autor)

Figura 127 – Cordoalha após ser protendida e encunhada



(Fonte: Autor)

Após a finalização da protensão são gerados relatórios de alongamento dos cabos (a exemplo da Tabela 8), encaminhados ao engenheiro projetista responsável para que faça sua análise e possível aprovação para próxima etapa, que diz respeito ao corte dos cabos e ao acabamento dos furos. Eventualmente, caso alguma cordoalha não atinja o alongamento esperado, realizasse uma nova protensão e uma nova avaliação.

Tratando do critério de aceitação utilizado, o mesmo diz respeito à análise do erro relativo entre o alongamento real e o alongamento de projeto dos cabos, que deve estar na faixa de -5% até +10%. Nota-se pela Tabela 8 que nesse caso todos foram aprovados.

Tabela 8 – Relatório de alongamento dos cabos após protensão

Número do cabo	Trecho	Comprimento (m)	Alongamento previsto (cm)	Alongamento real (cm)	Erro relativo (%)
1	C2	14,8	8,5	8,8	<b>3,53</b>
2	C2	14,8	8,5	8,9	<b>4,71</b>
3	C2	14,8	8,5	8,9	<b>4,71</b>
4	C2	14,8	8,5	8,4	<b>-1,18</b>
5	C2	14,8	8,5	8,4	<b>-1,18</b>
6	C2	14,8	8,5	8,6	<b>1,18</b>
7	C2	14,8	8,5	8,4	<b>-1,18</b>
8	C2	14,8	8,5	8,7	<b>2,35</b>

(Fonte: Arquivo da Construtora)

Por fim ocorre o corte da ponta das cordoalhas deixando em torno de 2cm para que o cobrimento de 2,5cm possa ser respeitado. Depois, as cordoalhas são tamponadas com caps plásticos (Figura 128), responsáveis pela proteção das mesmas até que o furo seja preenchido com graute estrutural de baixa retração.

Figura 128 – Vista do cap de proteção após corte dos cabos em dupla de cordoalhas



(Fonte: Autor)

Destaca-se também que até o final da coleta de dados desse estudo não havia sido realizado o acabamento final do furo com graute, motivo pelo qual não será possível exemplificar com imagens essa etapa.

Finalmente, o resultado do pavimento finalizado pode ser conferido nas Figuras 129 e 130 (trecho C1) e nas Figuras 131, 132 e 133 (trecho C2).

Figura 129 – Pavimento finalizado – Trecho C1



(Fonte: Autor)

Figura 130 – Vista inferior do arranjo unidirecional em blocos formado pela laje nervurada – Trecho C1



(Fonte: Autor)

Figura 131 – Pavimento finalizado – Trecho C2 (vista 1)



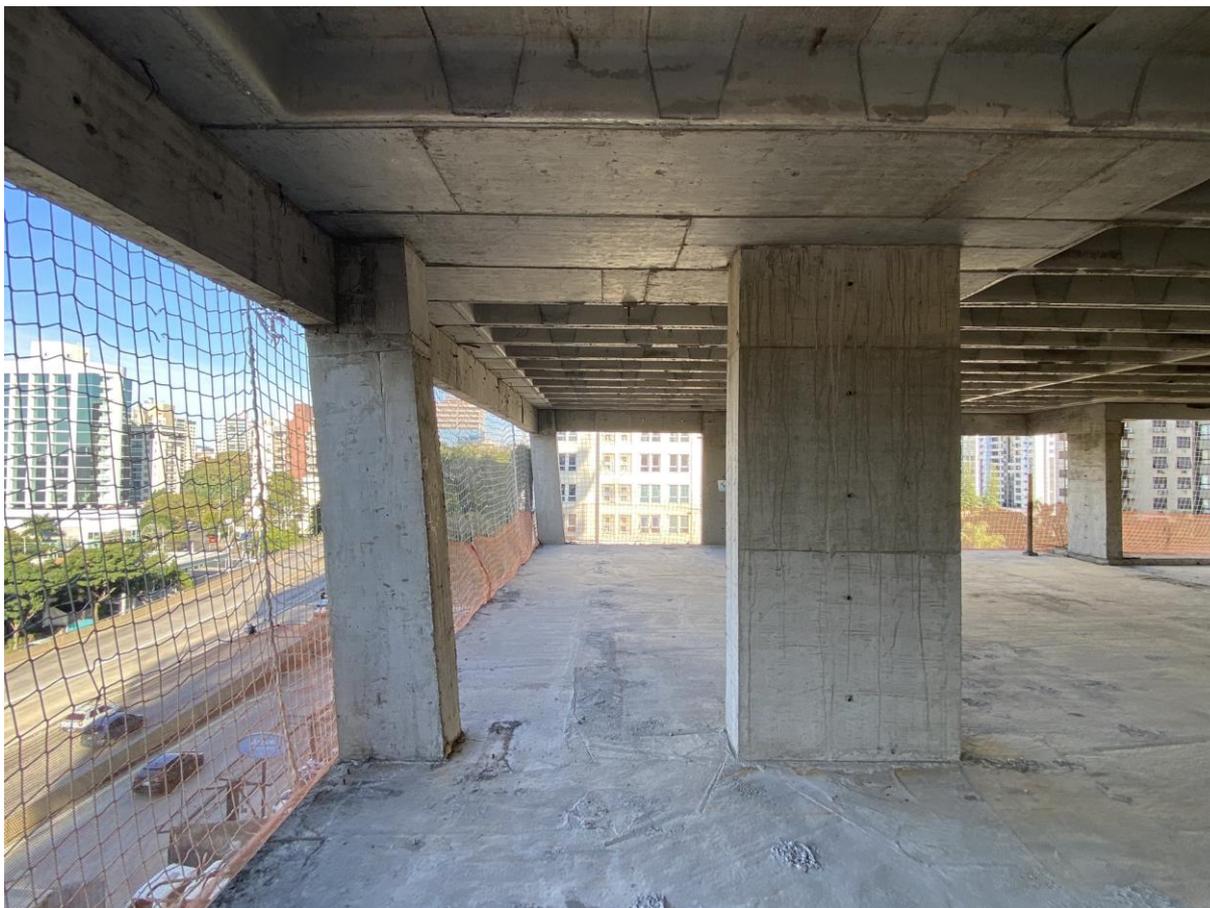
(Fonte: Autor)

Figura 132 – Pavimento finalizado – Trecho C2 (vista 2)



(Fonte: Autor)

Figura 133 – Pavimento finalizado – Trecho C2 (vista do maciço e da lateral inclinada)



(Fonte: Autor)

Após o término da execução destaca-se um último passo que versa acerca do controle de qualidade.

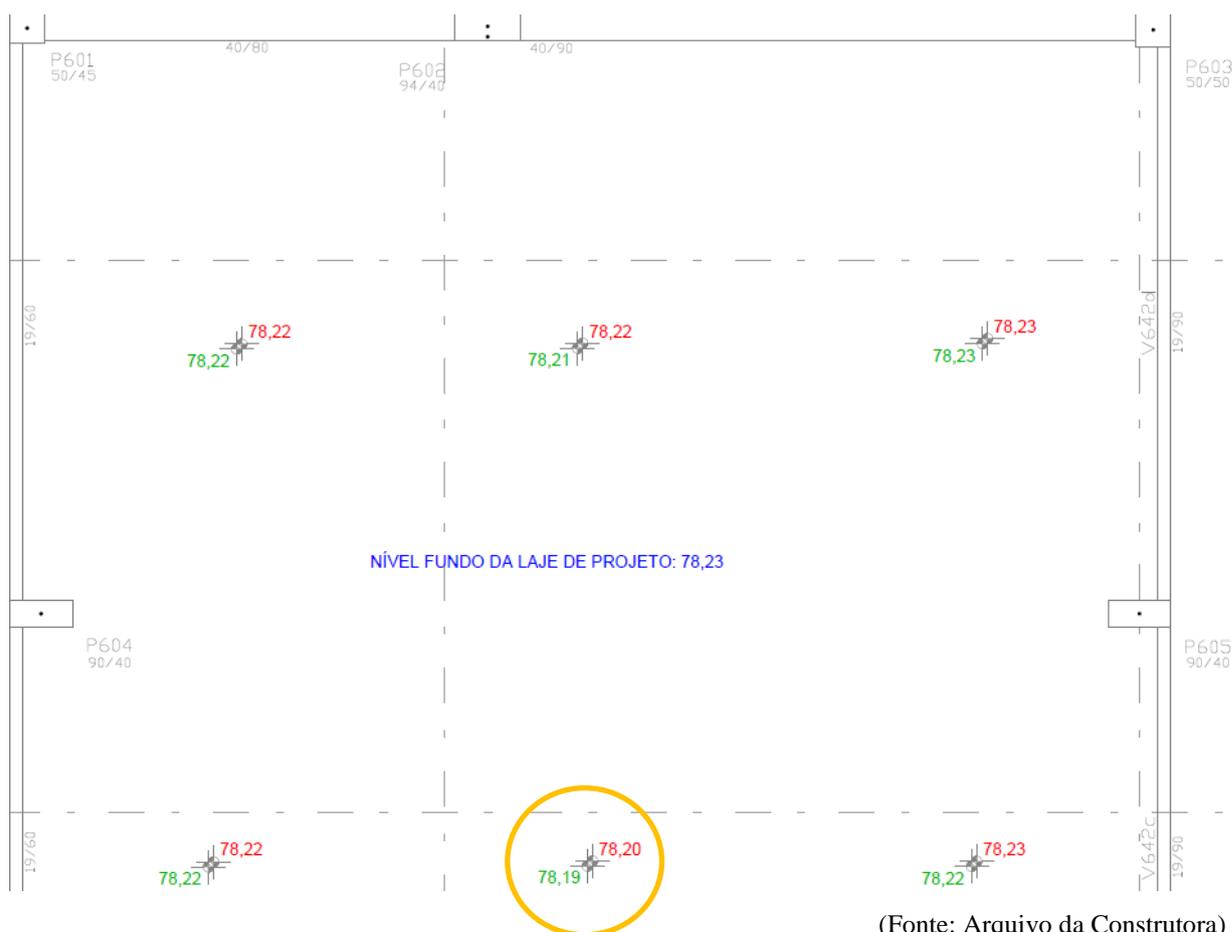
Através de uma equipe especializada em topografia realizava-se uma análise da deformação da laje, na qual eram avaliados os níveis do fundo em 12 pontos no trecho C1 e em 6 pontos no trecho C2, na semana após a concretagem e depois da remoção completa do reescoramento. Esses valores eram comparados com o nível de projeto para que se pudesse conhecer a flecha resultante naquele momento. Ademais, os resultados também eram enviados ao engenheiro responsável pela protensão para que fossem validados.

A Figura 134 exemplifica a coleta de dados referente à deformação no trecho C1. Em vermelho está representada a medição na semana após a concretagem enquanto em verde após a remoção completa do reescoramento. Todos os valores estão em metros.

Percebe-se que a maior flecha nesse exemplo foi de 4cm (ponto indicado pelo círculo amarelo).

Conforme imposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014), o limite de deslocamento visível em peças estruturais é de  $L/250$ , onde  $L$  representa o comprimento do menor vão a ser vencido. Nesse caso, como o vão é de 16,31m, são aceitáveis até 6,5cm de deformação na laje, tornando válida e admissível a flecha de 4cm encontrada *in loco*.

Figura 134 – Exemplificação da coleta de cotas pela equipe de topografia para análise da deformação da laje



Também é importante que seja destacado, no âmbito do controle da execução, o preenchimento de uma ficha de acompanhamento para os serviços da protensão que acontecem após a concretagem (Figura 135), a cada novo pavimento e a ser anexada junto aos demais documentos pertinentes, importante para trazer mais organização e clareza na leitura dos dados inerentes ao processo, facilitando tomadas de decisões.

Figura 135 – Ficha de acompanhamento dos serviços de protensão após a concretagem

PROTENSÃO	
1. SETOR	
2. ETAPA	
2.1 PAVIMENTO	_____
2.2 C1	<input type="checkbox"/> (Parte 1)      C2 <input type="checkbox"/> (Parte 2)
3. CONCRETAGEM	
3.1 DATA DE CONCRETAGEM	_____
4. CONTROLE TECNOLÓGICO (30MPa)	
4.1 ROMPIMENTO CP (EMPRESA 1)	7 dias <input type="checkbox"/> 21 dias <input type="checkbox"/> 28 dias <input type="checkbox"/>
4.2 ROMPIMENTO CP (EMPRESA 2)	7 dias <input type="checkbox"/> 21 dias <input type="checkbox"/> 28 dias <input type="checkbox"/>
5. BAUSER (Fazer Protensão entre 5 e 2 dias antes da concretagem do andar acima)	
5.1 DATA TENSIONAMENTO	_____
5.2 RELATÓRIO RECEBIDO	SIM <input type="checkbox"/> DATA _____
6. PROJETISTA	
6.1 RELATÓRIO TENSIONAMENTO	
ENVIADO	<input type="checkbox"/> DATA _____      APROVADO <input type="checkbox"/> DATA _____
6.2 DESFORMA	
SIM	<input type="checkbox"/>
6.3 ANÁLISE DEFORMAÇÃO / TOPOGRAFIA	
EXECUTADA	<input type="checkbox"/> ENVIADO PROJETISTA <input type="checkbox"/> APROVADO <input type="checkbox"/>
DATAS:	_____
6.4 CORTE E ACABAMENTO DOS CABOS	
ENVIADO	<input type="checkbox"/> APROVADO <input type="checkbox"/> CORTADO <input type="checkbox"/>
DATAS:	_____

(Fonte: Arquivo da Construtora)

Por fim, o último ponto a ser mencionado nesse trabalho versa acerca de possíveis problemas que podem ser enfrentados durante a execução. Tratando-se da protensão, destacam-se os seguintes:

- interferências no caminho dos cabos e na altura das ancoragens;
- altura incorreta dos cabos nos pontos máximos e mínimos;
- dimensionamento incorreto da largura das vigas de ancoragem, resultando na falta de espaço para alocação dos elementos;
- ancoragens desalinhadas e/ou fora de posição;

- bainhas próximas das ancoragens frouxas e cordoalhas expostas (ponto de contato entre o concreto e o aço de protensão);
- fixação incorreta das cadeirinhas na armadura positiva da laje, acarretando em desvios indesejados no trajeto dos cabos;
- fixação incorreta da armadura de fretagem;
- cap plástico da ancoragem passiva solto;
- cabos com a capa plástica danificada/esmagada;
- falhas de concretagem nos nichos da ancoragem ativa;
- espaço insuficiente para o macaco hidráulico devido às interferências com sistema de proteção vertical periférico;
- armazenamento incorreto dos cabos;
- demora no corte e acabamento das cordoalhas, estando suscetível a iniciar processos corrosivos na ancoragem ativa.

No que diz respeito ao aço passivo e ao concreto, pontua-se:

- falta de compatibilização entre projetos;
- alinhamento incorreto do aço das vigas;
- erros de montagem nas bitolas e nas quantidades de aço;
- cobrimento insuficiente das barras nas vigas devido às interferências com a protensão;
- aço pré cortado e dobrado em tamanhos diferentes dos solicitados em projetos;
- quebra dos espaçadores no fundo das vigas;
- falhas de concretagem nas nervuras e nas cubetas;
- falhas de concretagem na união do concreto novo com velho (quando aplicável);
- corte incorreto das juntas do piso;
- cura tardia em dias quentes, gerando fissuras por retração.

## 5. CONCLUSÃO

Em suma, conclui-se que foi possível atingir o objetivo principal desse trabalho, descrevendo e detalhando as etapas executivas do sistema de fôrmas e da protensão nas lajes nervuradas protendidas com cordoalhas engraxadas em uma edificação comercial de Porto Alegre.

No decorrer do estudo também foi notado que a utilização de cordoalhas engraxadas para execução das lajes nervuradas protendidas é viável e possível de cumprimento no tempo de prazo estipulado, mostrando que a tecnologia oferece facilidade no manuseio, no transporte e na protensão, contribuindo para a precisão das etapas construtivas e a para garantia da qualidade final das estruturas.

Ademais, destaca-se a importância de algumas etapas nesse processo, como o acompanhamento executivo diário para realização de uma coleta de dados *in loco* minuciosa e abrangente; o embasamento teórico com referenciais bibliográficos trazendo definições e características dos sistemas de protensão e das lajes nervuradas utilizados; a caracterização do empreendimento; as explicações acerca das concepções dos projetos e, por fim, o sequenciamento das atividades construtivas propriamente dito.

Além disso, foi evidenciado que as lajes nervuradas protendidas com cordoalhas engraxadas permitem a execução de grandes vãos com redução na quantidade de vigas e pilares, possibilitando a criação de espaços mais amplos e funcionais e reduzindo o consumo de concreto e de aço.

Para concluir, pontua-se que o estudo de caso demonstrou a viabilidade e as características da execução de lajes nervuradas protendidas com cordoalhas engraxadas. Através de boas práticas, da qualidade dos materiais empregados e de profissionais qualificados foi possível obter estruturas eficientes e duráveis, alinhadas com as demandas contemporâneas da engenharia civil. Dessa forma, a implementação desse tipo de laje contribui de maneira significativa para o avanço e a inovação na construção civil, promovendo soluções mais inovadoras e econômicas na concepção de edificações de alta qualidade técnica e estética.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15696**: Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto - Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto protendido**. 2021. 264p. Apostila da disciplina de Concreto Protendido – Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 2021.

BASTOS, P. S. S. **Lajes de Concreto Armado**. 2021. 113p. Notas de aula da disciplina 2117 - Estruturas de concreto I, departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 2021.

CAUDURO, E. L. **Manual para a Boa Execução de Estruturas Protendidas Usando Cordoalhas Engraxadas e Plastificadas**. 2ª Edição. 2011.

CAZZO, R. L. **Lajes Protendidas: Aplicações em geral**. 2008. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil) – Unidade Acadêmica de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade São Francisco, São Paulo, 2008.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. **Concreto Protendido: Teoria e Prática**. 2015. 345 p. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2015.

COSTA, H. O. **Manual de uso, operação e manutenção de lajes planas protendidas**. 2021. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. Sergipe, 2021.

EMERICK, A. **Concreto Protendido: Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. Rio de Janeiro, 2005.

FEIJÓ, L. A.; DUTRA, R. V. R. **Análise aplicativa de modelos de laje nervurada de concreto armado e laje maciça protendida**. 2014. Monografia (Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

HANAI, J. B. **Fundamentos do concreto protendido**. 2005. 116 p. Departamento de engenharia de estruturas - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2005.

PEREIRA, J. L. S.; CARVALHO, R. G.; LACERDA, I. G.; NETO, E. S. A.; CUNHA, M. **Concreto Protendido e lajes protendidas com cordoalhas engraxadas – Noções gerais, solução estrutural e correta execução**. Curitiba, 2005.

PEREIRA, R. C. S. M. **Fôrmas plásticas e escoramentos metálicos na construção civil – utilização do sistema Recub para fôrmas e escoramentos de lajes nervuradas**. 2014. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Minas Gerais, 2014.

POTT, A. A.; BELLEI, P.; BARBISAN, A. O. **Estudo comparativo entre lajes treliçadas de EPS, nervuradas com fôrma plástica tipo cubeta e lajes de formas colaborantes nervuradas (mistas nervuradas)**. Anais da Engenharia Civil / 2595-1823, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 57 - 74, março 2019. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/ENGCIVIL/article/view/256>>. Acesso em: 15/06/2023.

RIBEIRO, T. C. S. et al. **Análise comparativa entre sistemas estruturais de laje nervurada treliçada e laje nervurada com cubeta**. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais... Diamantina (MG) UFVJM, 2021. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/cobicet/381499-ANALISE-COMPARATIVA-ENTRE-SISTEMAS-ESTRUTURAI-DE-LAJE-NERVURADA-TRELICADA-E-LAJE-NERVURADA-COM-CUBETA>>. Acesso em: 16/06/2023.

RUDOLFF. **Catálogo de concreto protendido**. São Paulo, 5ª edição, 2012. Disponível em: <[https://www.academia.edu/29557343/Catalogo\\_concreto\\_protendido\\_Rudloff?source=swp\\_share](https://www.academia.edu/29557343/Catalogo_concreto_protendido_Rudloff?source=swp_share)>. Acesso em: 16 jun. 2023.

SCHMITT, T. K. H. **A produtividade na execução de estruturas de concreto armado em pavimentos repetitivos: um estudo de caso em uma obra localizada em Porto Alegre – RS**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Rio Grande do Sul, 2021.

SILVA, M. A. F. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Paulo, 2005.

SOARES, H. A.; PARENTE, N.M. **Laje Protendida e Nervurada – Estudo de caso Instituto Adventista de Manaus**. Artigo Científico (Trabalho de Conclusão de Curso - graduação em Engenharia Civil) - Estácio, Amazonas, 2021.

SOBRINHO, F. R. **Otimização de pavimento de lajes nervuradas protendidas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2018.

VERÍSSIMO, G.S.; CÉSAR JR, K.L.M. **Concreto Protendido – Fundamentos básicos**. 1998. 73 p. 4ª ed. Paraná: Universidade Federal de Viçosa, 1998.

VIZOTTO, I.; SARTORI, A. L. **Soluções de lajes maciças, nervuradas com cuba plástica e nervuradas com vigotas treliçadas pré-moldadas: análise comparativa**. *Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil*. n.15, p.19-28, abril, 2010. Limeira: Iltruk, São Paulo, 2010.