

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

Bruna Rodrigues Linck

**LAJES LISAS PROTENDIDAS POR CORDOALHAS
ENGRAXADAS: AVALIAÇÃO DO PROCESSO EXECUTIVO
EM COMPARAÇÃO AO DO CONCRETO ARMADO
CONVENCIONAL EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Porto Alegre
dezembro 2013

BRUNA RODRIGUES LINCK

**LAJES LISAS PROTENDIDAS POR CORDOALHAS
ENGRAXADAS: AVALIAÇÃO DO PROCESSO EXECUTIVO
EM COMPARAÇÃO AO DO CONCRETO ARMADO
CONVENCIONAL EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento 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

Orientador: Ruy Alberto Cremonini

Porto Alegre
outubro 2013

BRUNA RODRIGUES LINCK

**LAJES LISAS PROTENDIDAS POR CORDOALHAS
ENGRAXADAS: AVALIAÇÃO DO PROCESSO EXECUTIVO
EM COMPARAÇÃO AO DO CONCRETO ARMADO
CONVENCIONAL EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Ruy Alberto Cremonini e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, outubro de 2013

Prof. Ruy Alberto Cremonini
Dr. pela Universidade de São Paulo
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ana Luiza Raabe Abitante (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Cristiane Sardin Padilla de Oliveira (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho ao Theodoro, que esteve ao meu lado
em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avós, Amaury e Ziula, à minha mãe Inês e à minha irmã Maria Eduarda por todo suporte e carinho, que me possibilitaram chegar até esse momento.

Agradeço ao Professor Ruy Alberto Cremonini, orientador deste trabalho, pelos conhecimentos transmitidos, disponibilidade e atenção.

Agradeço à Professora Carin Schmitt, que sem sua paciência e dedicação esse trabalho não teria sido possível.

Agradeço ao Eng. Mateus Viana e ao Eng. Vinicius Castro por entenderem minha ausência em alguns momentos durante a execução desse trabalho.

Agradeço ao Eng. Fábio do Vale pelo auxílio no desenvolvimento da idéia inicial desse trabalho.

Agradeço às minhas amigas e colegas que me deram suporte e me apoiaram durante esse trabalho.

Agradeço a minha amiga e colega Natália Pires por ter cedido sua obra para visitação.

Agradeço ao Felipe, por tudo.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas e utilizadas na construção civil, visando reduzir tempo, custo e mão de obra. O sistema de laje lisa protendida é um exemplo que é utilizado mundialmente. Frente a essa tendência, este trabalho versa sobre a comparação do processo executivo de uma laje convencional de concreto armado e uma laje lisa protendida por cordoalhas engraxadas, atuando como armadura ativa em obras residenciais. O concreto protendido sem aderência é um tipo de protensão que apresenta características, como o fácil manuseio das cordoalhas e equipamentos leves que o torna um método viável em edificações. O método das cordoalhas engraxadas em lajes lisas, método abordado nesse trabalho, é de fácil aplicação em edificações de pequeno e médio porte. Para a obtenção dos resultados foi feito o acompanhamento da execução da laje de uma obra que utiliza laje lisa protendida, assim como uma com laje convencional, sendo descritos e comparados os dois processos. Para fim de comparação, foram estabelecidas variáveis a serem estudadas: processo executivo, tempo de ciclo, equipe. Essas variáveis foram mensuradas com o cálculo da produtividade. Notou-se que as duas obras apresentaram a execução da laje em um mesmo prazo, porém teve-se uma diminuição da equipe na obra com protensão. Também houve uma redução no índice de materiais utilizados para fôrmas e armadura. Com isso obteve-se, para a laje lisa protendida, uma melhor produtividade para fôrma e pior para armadura, visto a dificuldade de instalar as cordoalhas, mas compensada pela diminuição significativa de armadura positiva e negativa, assim resultando em menos horas de trabalho utilizada por área de laje protendida, em comparação com o mesmo índice da laje convencional.

Palavras-chave: Estruturas de Concreto Protendido. Protensão Sem Aderência. Cordoalhas Engraxadas. Laje Lisa. Laje Lisa Protendida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de etapas de trabalho.....	19
Figura 2 – Pistas de protensão	29
Figura 3 – Procedimento da produção de concreto protendido pré-moldado	30
Figura 4 – Laje protendida por cordoalhas engraxadas.....	32
Figura 5 – Cordoalha engraxada.....	33
Figura 6 – Planta baixa de uma laje protendida.....	33
Figura 7 – Cadeirinhas metálicas.....	34
Figura 8 – Bobinas de cordoalhas engraxadas	35
Figura 9 – Ancoragem ativa.....	37
Figura 10 – Macaco Hidráulico.....	38
Figura 11 – Estrutura utilizando laje lisa	40
Figura 12 – Visão geral do canteiro de obras.....	44
Figura 13 – Mesas Voadoras.....	45
Figura 14 – Posicionamento das Mesas Voadoras.....	45
Figura 15 – Posicionamento da Armadura Positiva.....	46
Figura 16 – Montagem da extremidade ativa.....	47
Figura 17– Proteção da placa de ancoragem.....	48
Figura 18 – Ancoragem Passiva.....	48
Figura 19 – Cadeirinha de apoio para cordoalha.....	49
Figura 20 – Interferência das cordoalhas com instalações.....	50
Figura 21 – Descidas elétricas.....	50
Figura 22 – Cunhas.....	51
Figura 23 – Marcação das cordoalhas.....	52
Figura 24 – Protensão das cordoalhas.....	53
Figura 25 – Retirada das mesas.....	54
Figura 26 – Apoio das mesas em roletes.....	55
Figura 27– Içamento das mesas.....	55
Figura 28 – Guarda-corpo baixo.....	56
Figura 29 – Retirada do cabo a 1,20 m e amarração das mesas.....	57
Figura 30 – Voo das Mesas.....	57
Figura 31 – Linha de vida.....	58
Figura 32 – Montagem do assoalho da laje.....	60
Figura 33 – Cadeirinhas de apoio para instalações.....	62

Figura 34 – Reescoramento do Sistema Convencional.....	64
Figura 35 – Reescoramento do Sistema de Protensão.....	64
Figura 36– Duração das atividades.....	70
Figura 37– Ciclo de Concretagem.....	71
Figura 38– Comparativo de Índices por Área de Laje.....	73
Figura 39– Comparativo de Índices por Volume de Concreto.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de Agressividade Ambiental	28
Tabela 2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental	28
Tabela 3 – Consumo de Materiais por Pavimento.....	72
Tabela 4 – Índices de Consumo por Pavimento.....	73
Tabela 5 – Produtividade da execução da Laje.....	74
Tabela 6 – Produtividade da Armação.....	75
Tabela 7 – Produtividade da Fôrma.....	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos Empreendimentos.....	59
Quadro 2 – Descrição do Ciclo de Concretagem.....	68
Quadro 3 – Vantagens e Desvantagens Observadas.....	77

LISTA DE SIGLAS

CAA – Classe de Agressividade Ambiental

ELU – Estado Limite Último

ELS-D – Estado limite de descompressão

ELS-F – Estado limite de formação de fissuras

ELS-W – Estado limite de abertura das fissuras

NBR – Norma Brasileira

RUP – Razão unitária de produção

STUP – *Société Technique pour l' Utilization de La Précontrainte*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto. (MPa)

f_{ptk} – resistência característica à ruptura por tração do aço (kgf/mm²)

w_k - abertura característica de fissuras na superfície do concreto (mm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	18
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	18
2.2.1 Objetivo Principal	18
2.2.2 Objetivos Secundários	19
2.3 PRESSUPOSTO.....	19
2.4 DELIMITAÇÕES	19
2.5 LIMITAÇÕES	19
2.6 DELINEAMENTO	19
3 CONCRETO PROTENDIDO	21
3.1 CONCEITUAÇÃO	21
3.2 HISTÓRIA.....	23
3.3 PERDAS NA PROTENSÃO	24
3.3.1 Perdas Imediatas.....	24
3.3.2 Perdas a Longo Prazo.....	25
3.4 CLASSIFICAÇÃO	26
3.4.1 Quanto ao Nível de Protensão.....	26
3.4.2 Quanto a Aderência	29
3.4.2.1 Protensão com Aderência.....	29
3.4.2.1.1 Aderência Inicial	29
3.4.2.1.2 Aderência Posterior	30
3.4.2.2 Protensão sem Aderência	31
3.5 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS EMPREGADOS NA PROTENSÃO SEM ADERÊNCIA.....	32
3.5.1 Cordoalhas Engraxadas.....	32
3.5.2 Ancoragem	36
3.5.3 Macaco Hidráulico	38
3.5.4 Concreto.....	39
3.6 APLICAÇÃO EM LAJE LISA	39
4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO EXECUTIVO DE UMA LAJE LISA PROTENDIDA.....	43
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA OBRA.....	43

4.2 PROCESSO EXECUTIVO.....	44
4.2.1 Fôrma da laje	44
4.2.2 Armadura.....	46
4.2.3 Instalações.....	49
4.2.4 Concretagem.....	51
4.2.5 Protensão.....	51
4.2.6 Desforma - Voo das mesas.....	53
4.2.7 Procedimentos de segurança.....	56
5 COMPARATIVOS DA LAJE LISA PROTENDIDA COM O SISTEMA TRADICIONAL.....	59
5.1 ETAPAS DO PROCESSO EXECUTIVO.....	59
5.1.1 Fôrma.....	60
5.1.2 Armadura.....	61
5.1.3 Instalações.....	62
5.1.4 Concretagem.....	63
5.1.5 Desforma	63
5.1.6 Procedimentos de segurança.....	65
5.2 COMPARATIVO DE EQUIPE.....	65
5.3 COMPARATIVO DE CICLO DA LAJE.....	67
5.3 ÍNDICES DE CONSUMO DE MATERIAIS E MÃO DE OBRA.....	72
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

Atualmente vive-se um momento no qual a construção civil está em crescimento no Brasil. Como consequência, surgem a cada dia novos empreendimentos, e a mão de obra está cada vez mais escassa. Com isso, novas tecnologias são exploradas, e modernos métodos de construção são empregados, fazendo concorrência para a estrutura convencional de concreto armado.

O sistema de laje protendida é um desses notórios avanços tecnológicos na construção civil. Porém, até os dias atuais, esse método construtivo é usado predominantemente em obras de construção pesada, deixando de ser aproveitado todo o seu potencial. Muitas vezes, ele não é utilizado pela falta de conhecimento do engenheiro ou pelo tradicionalismo do uso do concreto armado (SCHMID, M. T., 2009, p. 4).

O concreto protendido é um sistema no qual são usadas cordoalhas de aço na estrutura como armadura ativa, além de uma armadura passiva. Essas cordoalhas são tensionadas, aplicando uma tensão prévia e permanente no concreto, resultando em uma reação permanente às ações que o concreto sofre. Isso aumenta melhora seu comportamento, por exemplo, quanto ao fissuramento.

A protensão pode ser pré-tracionada, quando o estiramento é feito antes do lançamento do concreto ou pós-tracionada, esse processo é realizado somente depois do endurecimento do concreto. Esse segundo método é o mais utilizado para construções em que o concreto é moldado *in-loco* (PEREIRA et al., 2005).

O concreto protendido pós-tracionado subdivide-se em sistema aderente e não aderente. Protensão pós-tracionada aderente caracteriza-se pela injeção de nata de cimento em bainhas que envolvem os cabos, fazendo com que ele fique aderido à essa bainha em todo seu comprimento. No sistema não aderente, são utilizadas cordoalhas engraxadas, que são fixadas em cada extremidade por uma ancoragem e, após o lançamento e a cura do concreto, é feito o estiramento. A protensão não aderente é a principal concorrente do concreto armado, pois são utilizados equipamentos mais leves, além das cordoalhas engraxadas serem de fácil manuseio (SCHMID, M. R. L., 2007, p. 33-35).

A utilização do concreto protendido em lajes lisas, ou seja, lajes que dispensam o uso de vigas e capitéis, possui diferenciais muito competitivos em comparação com o concreto armado tradicional. Apesar de se encontrar pouco uso em edificações residenciais, a laje lisa protendida oferece diversas vantagens, como:

- a) aumento de vãos;
- b) flexibilidade no projeto;
- c) lajes mais finas e estruturas mais leves;
- d) redução de mão de obra.

Além disso, a laje lisa racionaliza o consumo de materiais, pois devido à ausência de vigas a estrutura utiliza menos fôrmas e armadura. A ausência de vigas ainda proporciona o uso de diferentes sistemas de fôrmas, como as mesas voadoras que consiste em uma estrutura que une escoramento e fôrma da laje e que é içada, sem a necessidade de ser desmontada, para o próximo pavimento.

São diversas as variáveis através das quais se pode comparar o concreto armado com o protendido. Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo analisar essas variáveis no processo executivo e quantitativo de materiais, a fim de caracterizar os dois processos, e avaliar quais as vantagens e desvantagens que a substituição pela laje lisa protendida traz no processo executivo em relação à laje convencional.

No capítulo 2, são apresentadas as diretrizes que regem esse trabalho, são elas questão de pesquisa, objetivos, delimitações, limitações e delineamento. No capítulo 3, é apresentado o embasamento teórico no qual se destaca conceitos sobre concreto protendido e suas aplicações. Também, abordou-se a história do concreto protendido no mundo e no Brasil e sua situação atual, assim como suas características e subdivisões. Foi dada ênfase na pesquisa sobre concreto protendido sem aderência e ao método das cordoalhas engraxadas em lajes lisas, método abordado nesse trabalho. A pesquisa também reuniu informações sobre a aplicação em lajes lisas e as vantagens e desvantagens já conhecidas. Para a obtenção dos resultados desejados foi feito o acompanhamento da execução de uma laje em uma obra que utilizada laje lisa protendida. Foram feitas a descrição e o detalhamento desse processo no capítulo 4. No capítulo seguinte, fez-se o comparativo entre os dois sistemas. Para isso também foi feita a coleta de dados *in loco* de uma laje convencional. Fez-se a comparação do processo executivo em cada etapa do ciclo da laje, assim como foi analisado o prazo total de

execução, a diferença entre as equipes e da ordem de execução das etapas. Para mensurar todos esses dados, foi feito o quantitativo de materiais de cada obra, considerando somente a laje e vigas de um pavimento – não considerando pilares e escada – e junto com a equipe levantada anteriormente, pode-se chegar à produtividade de cada etapa e total da execução de cada tipo de laje. Como todos esses dados, no capítulo 6, são expostas as considerações finais desse trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais as vantagens e desvantagens, no processo executivo, de substituir o sistema convencional de laje em concreto armado por laje lisa protendida, usando cordoalhas engraxadas, em edificações residenciais?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a descrição das vantagens e desvantagens, no processo executivo, de lajes lisas protendidas por cordoalhas engraxadas, em edificações residenciais, considerando como base de comparação a laje convencional de concreto armado.

2.2.2 Objetivos secundários

O objetivo secundário do trabalho é a análise comparativa, de cada variável estudada individualmente, entre a laje lisa em concreto protendido e o sistema padrão de concreto armado.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as lajes lisas de concreto protendido e convencional de concreto armado têm a mesma eficiência estrutural.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a análise de edificações residenciais com estrutura portante de concreto moldada *in loco*.

2.5 LIMITAÇÕES

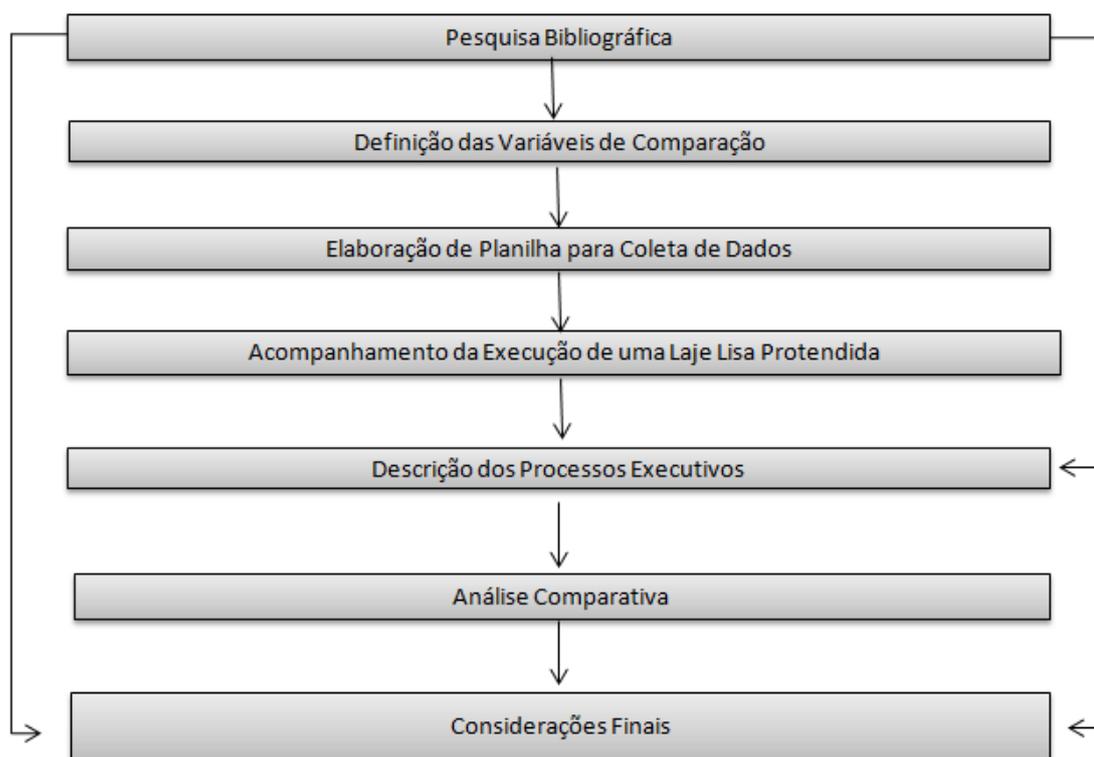
O trabalho limita-se a comparação dos processos executivos de lajes lisas protendidas e convencionais de concreto armado, sendo para isso, observadas somente duas obras, uma de cada sistema estrutural, mensurando produtividade e consumo de materiais.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição das variáveis de comparação;
- c) elaboração de planilha para coleta de dados;
- d) acompanhamento de execução e coleta de dados uma laje lisa protendida;
- e) acompanhamento de execução e coleta de dados de uma laje convencional de concreto armado;
- f) descrição dos processos construtivos;
- g) análise comparativa;
- h) considerações finais.

Figura 1 – Fluxograma de etapas de trabalho



(fonte: elaborado pela autora)

A **pesquisa bibliográfica** esteve presente desde o início do trabalho até as considerações finais, como mostra a figura 1, fornecendo fundamento para tais. Nessa etapa inicial, a finalidade foi caracterizar os tipos de laje, as subdivisões do concreto protendido e os tipos de protensão, assim como sua aplicação e história.

Com essas referências, se teve embasamento para a **definição das variáveis de comparação** entre o concreto armado e o protendido, com aplicação – respectivamente – em lajes convencional e lisa. Após essa definição, a **elaboração de uma planilha para coleta de dados *in loco*** foi fundamental para uma boa execução das etapas a seguir.

Como uma próxima etapa, foram coletados dados no **acompanhamento da execução de uma laje lisa protendida**. A **descrição dos processos executivos** foi feita considerando os dados coletados *in loco*.

Após essas etapas, foi feita uma **análise comparativa** das variáveis escolhidas, entre os dois sistemas, tendo como base as informações coletadas *in loco*, histórico de dados anteriores e a bibliografia. Dessa forma, foram estabelecidas as **considerações finais** do trabalho.

3 CONCRETO PROTENDIDO

O concreto protendido é um sistema reconhecido mundialmente, porém pouco utilizado no Brasil quando se trata de edificações residenciais com projetos convencionais e pequenos vãos. Desse modo, esse capítulo expõe as principais características do concreto protendido, desde a sua conceituação, histórico, classificação e partes constituintes, para um correto entendimento desses conceitos e do presente trabalho.

3.1 CONCEITUAÇÃO

A protensão, ou pré-tensão, é um conceito antigo que é definido como a situação em que ocorre um fornecimento de esforços iniciais a um elemento estrutural, que são contrários àqueles que irão surgir com aplicação de cargas nessa estrutura (PEREIRA et al., 2005). O mesmo autor exemplifica o conceito de protensão através de sistemas simples utilizados no cotidiano:

- a) nos tonéis de madeira, os anéis de aço são aquecidos e colocados sobre as peças de madeira, quando esfriam o diâmetro reduz, comprimindo essas peças;
- b) em uma roda de carroça, anéis de aço são aquecidos e colocado em volta do raio de madeira da roda, comprimindo ao esfriar;
- c) em uma roda de bicicleta os raios metálicos da roda são tracionados, comprimindo o aro da roda e mantendo a estabilidade do conjunto.

Pfeil (1984) define protensão como um sistema no qual são introduzidas tensões prévias na estrutura que têm como objetivo melhorar o comportamento do concreto sob a ação de cargas. Então, a protensão utilizada no concreto consiste no estiramento de cabos através de um macaco hidráulico provocando essas tensões. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 4) define elementos de concreto protendido como:

Aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado limite último (ELU).

Nas estruturas de concreto protendido existem dois tipos de armadura: a ativa e a passiva. A armadura passiva consiste na armadura que não é utilizada para produzir forças, ou seja, que não é alongada, como a existente no concreto armado. Já a armadura ativa, ou de protensão, é constituída por barras ou cordoalhas, as quais são pré-alongadas a fim de produzir forças de protensão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007). Essas forças podem ser definidas como uma reação permanente às ações que a estrutura sofre pelas cargas de utilização da estrutura.

Schmid (M. R. L., 2007, p. 33-35) define a protensão de uma estrutura de concreto como uma tecnologia inteligente, eficaz e duradoura. Inteligente, pois reduz a quantidade de materiais devido ao maior aproveitamento da resistência mecânica do aço e do concreto. Eficaz, pois possui uma tecnologia superior às estruturas convencionais de concreto armado, sendo seguras e confortáveis. Por esses motivos, pode ser citada como uma das principais vantagens do concreto protendido a relação custo-benefício da estrutura. Além disso, em muitos casos a protensão tem necessidade de pouca ou nenhuma manutenção ao longo de sua vida útil. O mesmo autor cita outras características vantajosas:

- a) maiores vãos entre pilares;
- b) redução da deformação;
- c) redução da fissuração;
- d) possibilidade da utilização em ambientes agressivos;
- e) projetos arquitetônicos diferenciados;
- f) possibilidade de utilização em peças pré-moldadas;
- g) utilização em reforço de estruturas;
- h) em caso de lajes, são mais esbeltas que as equivalentes em concreto armado, reduzindo,
 - a altura total de uma edificação;
 - o peso próprio da estrutura, logo diminui as cargas na fundação.

O concreto protendido é um sistema que proporciona vantagens na sua utilização, como já foi citado, tanto em obras de grande porte quanto em pequenas edificações. Apesar disso, esse método construtivo tem particularidades na sua execução, se não for fiscalizado corretamente, um pequeno erro na execução pode ser muito prejudicial à estrutura, devido à grande escala das forças de protensão. Visto isso, e considerando que muitos engenheiros ainda não têm o domínio desse método por falta de cultura de sua utilização no Brasil em obras que não

necessitam de um projeto diferenciado, essa se apresenta como a maior desvantagem do concreto protendido. Cauduro ([2002]) destaca que na obra que utiliza protensão a mão de obra envolvida no processo construtivo deve ser muito bem treinada e fiscalizada por um profissional qualificado, pois qualquer improvisação nesse método pode ser muito perigosa.

3.2 HISTÓRIA

O concreto surgiu junto com o desenvolvimento do cimento Portland, na Inglaterra, em 1824. Desde então, o concreto passou a se desenvolver e dessa forma surgiram novas técnicas e tecnologias. No início do século XIX, o concreto começa a ser reforçado com armadura de aço, surgindo o concreto armado. Em 1886, o americano P. J. Jackson faz a primeira tentativa de pré-tracionar a armadura do concreto. No final do século, já existiam diversos ensaios e pedidos de patente, porém esse método não obteve sucesso devido a perdas na protensão pela retração e fluência do concreto, que naquela época eram propriedades desconhecidas (PEREIRA et al., 2005). Além disso, propriedades do aço, como a relaxação, também eram desconhecidas.

Segundo Veríssimo e César Junior (1998a), os estudos de Mörsh, no começo do século XX, foram fundamentais para o desenvolvimento dos conceitos do concreto protendido. Esse estudo, que foi iniciado por Koenen, ganhou fundamento através de inúmeros ensaios realizados por Mörsh. Em 1912, Koenen e Mörsh verificaram que ocorriam perdas na protensão devido à retração e deformação lenta do concreto.

De acordo com os mesmos autores, Freyssinet em 1928 desenvolveu o primeiro trabalho sobre concreto protendido afirmando a importância da protensão na construção civil. Freyssinet alegou que, para evitar as perdas na protensão e assegurar a durabilidade da estrutura, se deve aplicar forças de protensão elevadas. Ele patenteou diversos métodos de protensão.

No final da Segunda Guerra Mundial, em 1945, foi criado o STUP (*Société Technique pour l'Utilization de La Précontrainte*). Com a criação dessa Sociedade, engenheiros qualificados puderam seguir os estudos de Freyssinet, dando destaque para Yves Guion e Pierre Labelle. A

partir disso, o concreto protendido passou a se desenvolver (BARBOSA¹, 2008 apud LAZZARI, 2011).

Em 1948 foi realizada a primeira obra no Brasil, a ponte do Galeão, na cidade do Rio de Janeiro. Para essa obra, o projeto e todo o material foram importados da França. Em 1952 a companhia siderúrgica Belgo começou a produzir o aço de protensão, dessa forma, a segunda obra no Brasil já foi realizada com aço brasileiro (VERÍSSIMO; CÉSAR JUNIOR, 1998a).

3.3 PERDAS NA PROTENSÃO

Um dos principais problemas das estruturas de concreto protendido são as perdas na protensão ocasionadas por propriedades do concreto e do aço e também durante o processo executivo. Perdas de protensão são definidas por Pfeil (1984, p. 46) como “[...] todas as perdas verificadas nos esforços aplicados aos cabos de protensão.”.

Ao se projetar uma estrutura protendida, deve-se considerar essas perdas, determinando a aplicação de uma sobre tensão. Esse procedimento tem como objetivo que, após as perdas, a força de protensão seja a força calculada e necessária para neutralizar os esforços de tração aplicados nessa estrutura pela utilização (VERÍSSIMO; CÉSAR JUNIOR, 1998b).

Elas são classificadas em perdas que ocorrem durante a protensão, as imediatas, ou durante a vida útil da estrutura, perdas a longo prazo. Esses tipos de perdas são caracterizados a seguir.

3.3.1 Perdas Imediatas

São as perdas durante o tensionamento e ancoragem dos cabos, as perdas imediatas são devido ao atrito e a ancoragem (PFEIL, 1984). As perdas por atrito são decisivas na variação dos esforços ao longo do cabo. Ao ocorrer o tensionamento da armadura ativa, o atrito entre os cabos e as peças faz com que o esforço aplicado sofra uma redução em cada ponto. Verificam-se perdas por atrito ao longo do cabo, nas ancoragens e nos macacos (PFEIL, 1984). Veríssimo e César Junior (1998b) afirmam que a utilização de cabos de grande

¹ BARBOSA, M. P. **Concreto Protendido**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2008. Notas de aula.

comprimento pode ocasionar valores altos de perdas, nesse caso devem ser tomadas medidas especiais para evitá-las.

Pfeil (1984) define perdas por ancoragem as perdas no tensionamento do cabo, quando a tensão é transferida do equipamento de protensão para a ancoragem. Veríssimo e César Junior (1998b, p. 15, grifo do autor) explicam a perda por ancoragem:

Dependendo do dispositivo de ancoragem utilizado, no momento da liberação dos cabos dos macacos e conseqüente transferência dos esforços de protensão para a peça de concreto ocorre uma acomodação das peças de ancoragem. Os deslocamentos que ocorrem originam as chamadas perdas nas ancoragens. Essas perdas são mais significativas nos sistemas que utilizam cunhas, sendo, inclusive, usual o termo **perda por encunhamento**. A cunha sempre penetra na ancoragem quando entra em carga. Em outros sistemas, a transferência do esforço se faz sem perda de alongamento do cabo.

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), os valores dessas perdas devem ser estabelecidos experimentalmente ou de acordo com a especificação do fabricante dos equipamentos de ancoragem.

3.3.2 Perdas a Longo Prazo

Pfeil (1984) afirma que perdas retardadas, ou a longo prazo, são perdas que surgem com o passar dos anos, as perdas retardadas ocorrem devido à retração e fluência do concreto e devido à relaxação do aço.

As perdas por encurtamento elástico do concreto consistem naquelas que ao receber a ação da força de protensão, surgem na peça de concreto que se deforma, encurtando-se. Ao mesmo tempo ocorre um encurtamento dos cabos, logo, esse fenômeno corresponde a um alívio de tensões nos cabos, ocorrendo assim uma perda de protensão (VERÍSSIMO; CÉSAR JUNIOR, 1998b). A retração provoca um encurtamento no concreto, logo provoca o mesmo encurtamento no cabo, como a força de protensão e o alongamento do cabo são diretamente relacionados, tem-se uma perda na protensão (PFEIL, 1984). Segundo Veríssimo e César Junior (1998b), essas perdas são pequenas e muitas vezes não são consideradas.

Pfeil (1984, p. 61) afirma que “O concreto, comprimido pelos cabos de protensão, sobre efeito de fluência, deforma-se lentamente.”. De acordo com Veríssimo e César Junior (1998b) os fenômenos de retração e fluência têm a tendência a se estabilizar ao longo do tempo.

O fenômeno de relaxação do aço pode ser definido com o alívio de tensões que a armadura de protensão sofre ao ser tensionada e mantida com um comprimento constante no decorrer do tempo (VERÍSSIMO; CÉSAR JUNIOR, 1998b). O encurtamento retardado do concreto faz com que o comprimento entre os pontos de ancoragem dos cabos sofram uma redução. Esse fenômeno resulta em uma diminuição do valor da perda por relaxação (PFEIL, 1984).

3.4 CLASSIFICAÇÃO

São expostas, a seguir, as principais subdivisões do concreto protendido, suas caracterizações e aplicações. O concreto protendido é classificado por níveis e quanto à aderência.

3.4.1 Quanto ao Nível de Protensão

O concreto pode ser protendido em três níveis, dependendo da classe de agressividade do ambiente, tipo de obra e estrutura. Segundo definição da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), a classificação quanto aos níveis de protensão se relaciona com a intensidade da força de protensão e com a proporção de armadura passiva e ativa presente na estrutura.

De acordo com Moraes² (1999 apud EMERICK, 2002), o principal objetivo da protensão é eliminar às tensões de tração, as quais dão origem às fissuras no concreto, Assim, é possível obter uma estrutura de maior qualidade, reduzindo o risco de corrosão utilizando a protensão completa.

Pereira et al. (2005, p. [7]) definem a protensão completa como o método que proporciona as melhores condições contra a corrosão. Então esse método se aplica apenas em casos de obra em meio muito agressivos ou situações extremas de fissuração exagerada como tirantes de concreto protendido ou reservatórios.

² MORAES, M. C. **Concreto Protendido**: introdução ao uso da cordoalha engraxada: Brasília: [s. n.], 1999. Caderno de Estrutura n. 14.

O método de protensão limitada (nível 2) é utilizado em ambientes poucos agressivos. Segundo Pereira et al. (2005), se admite tensões moderadas de tração em serviço. Para o controle de fissuração é necessário armadura passiva adicional à armadura ativa de protensão. Como o aço de protensão é mais caro que o aço convencional utilizado na armadura passiva, esse método é uma solução mais econômica que a protensão completa, devido à combinação das armaduras ativas e passivas. Veríssimo e César Junior (1998a, p. 40) afirmam que, devido a esse sistema apresentar valores menores de força de protensão que a total, apresenta as seguintes vantagens:

- a) menores tensões de tração e compressão na época da protensão;
- b) melhor comportamento no que diz respeito às deformações (flechas) sob o efeito da fluência do concreto;
- c) maior participação da armadura suplementar na ruptura [...].

A protensão parcial, ou de nível 1, é utilizada em ambientes não agressivos e admite a formação de fissuras no concreto. Pereira et al. (2005) afirmam que esse método admite tensões superiores à protensão limitada por admitir formação de fissuras, porém não maiores que 0,2 mm. Nesse nível de protensão também é necessário a colocação de armadura passiva suplementar, porém consome menos aço de protensão.

Cauduro ([2002], p. 28) descreve algumas vantagens da protensão parcial:

Para protensão parcial, moderada quantidade de barras de aço comum pode ser requerida para o controle de fissuras sob tração. Por razões econômicas, a protensão parcial é a forma mais comum de protensão usada nas estruturas. Deste modo, aço de protensão é usado para compensar a maior parte do peso próprio e sustentar outras cargas mortas. Ocasionalmente, uma pequena porção de carga viva é também incluída. A tração produzida pelo resto da carga viva é resistida pela combinação de aço tracionado e não-tracionado, resultando em estruturas econômicas.

O nível de protensão, como visto anteriormente, está relacionado com a fissuração e, logo com a proteção contra corrosão. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) associa esses parâmetros através das tabelas 1 e 2 definindo o nível de protensão para cada classe de agressividade ambiental.

Tabela 1 – Classe de Agressividade Ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Industrial	Grande
IV	Muito Forte	Respingos de maré	Elevado

(fonte: adaptação da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 16)

Tabela 2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de Concreto Estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências Relativas a Fissuração
Concreto Simples	CAA I e IV	Não há
Concreto Armado	CAA I	ELS-W ³ $w_k^4 \leq 0,4$ mm
	CAA II e III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	Pré-tração com CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm
	Pós-tração com CAA I e II	
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	Pré-tração com CAA II	Verificar as condições de: ELS-D ⁵ e ELS-F ⁶
	Pós-tração com CAA III e IV	
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Total)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as condições de: ELS-D e ELS-F

(fonte: adaptação da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 72)

³ Estado limite de abertura das fissuras

⁴ Abertura característica de fissuras na superfície do concreto (mm)

⁵ Estado limite de descompressão

⁶ Estado limite de formação de fissuras

3.4.2 Quanto à Aderência

A protensão pode ser classificada como aderente e não aderente pela NBR 6118/2007, levando em conta a aderência dos cabos com a estrutura. A seguir são caracterizados esses dois tipos de protensão

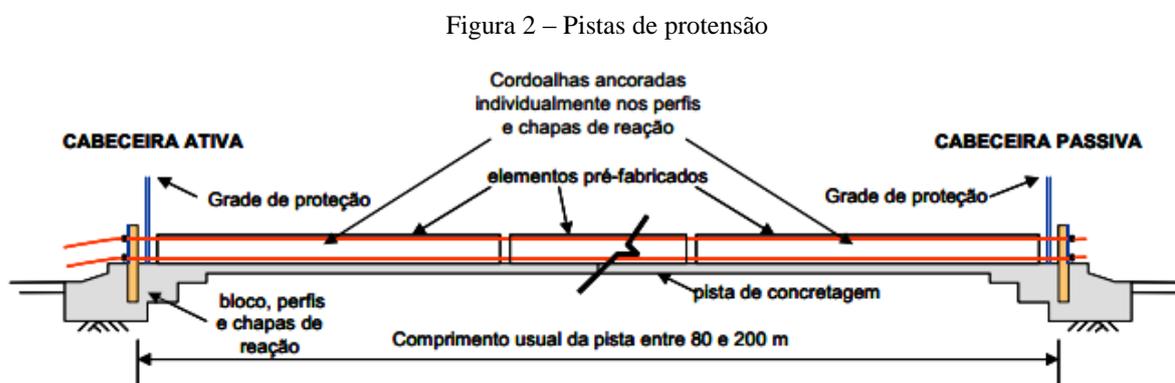
3.4.2.1 Protensão com Aderência

Esse tipo de protensão se caracteriza por ter como ancoragem a aderência da armadura ativa no concreto, podendo ter o tracionamento dos cabos antes ou depois da concretagem caracterizando a aderência inicial e posterior.

3.4.2.1.1 Aderência Inicial

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), nesse sistema é feito o pré-alongamento da armadura ativa antes do lançamento do concreto e utilizando como apoio elementos independentes da estrutura. Não havendo ligação da armadura com esses apoios após o endurecimento do concreto, então a ancoragem na estrutura se dá apenas pela aderência do elemento de protensão ao concreto.

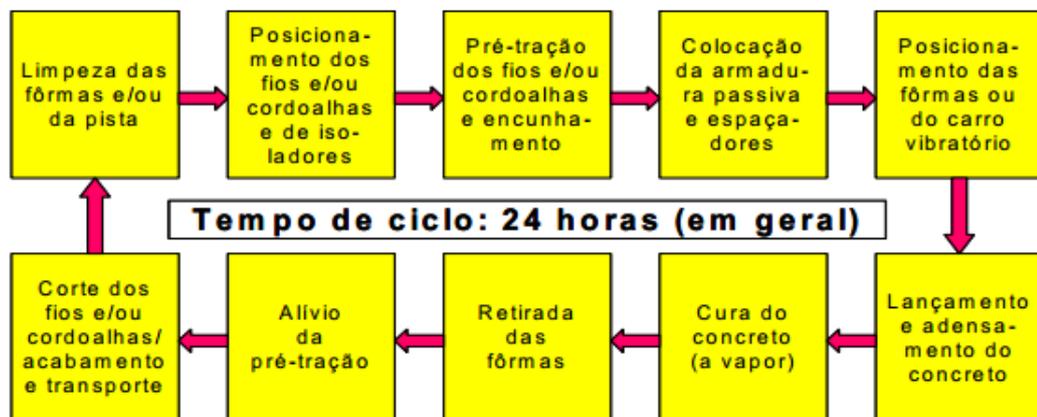
Esse método é usualmente aplicado em peças pré-moldadas de concreto. Segundo Pfeil (1984), recomenda-se o uso em fábricas, onde há instalações fixas, denominados leitos, ou pistas, de protensão, como mostra a figura 2, o formato alongado desses leitos permite uma produção maior e simultânea dessas peças.



(fonte: HANAI, 2005, p. 8)

Pereira et al. (2005) descrevem o procedimento das pistas de protensão nas fábricas de elementos pré moldados de concreto. Na cabeceira da pista faz-se o posicionamento da armadura ativa, sendo após, ancorada e tracionada em blocos. Depois desse processo, é montada a armadura passiva e a fôrma, após o lançamento e cura do concreto as armaduras ativas são liberadas das cabeceiras. O aço tem a tendência a voltar a sua posição inicial, porém com a aderência ao concreto endurecido, essa tensão se transfere comprimindo o concreto, caracterizando protensão, ou seja, a pré-tração da armadura ativa. O ciclo de produção de uma empresa de pré-moldados, utilizando esse sistema, é ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Procedimento da produção de concreto protendido pré-moldado



(fonte: HANAI, 2005, p. 8)

3.4.2.1.2 Aderência Posterior

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) define como protensão com aderência posterior, o concreto protendido em que a armadura é tracionada após o endurecimento do concreto, no qual a injeção de cimento em bainhas metálicas que envolvem o cabo garante a aderência permanente com o concreto, o apoio se dá na própria estrutura Pereira et al. (2005) caracterizam esse sistema por essa injeção de calda de cimento sob pressão nas bainhas que envolvem o aço, além de garantir a aderência do aço com a bainha, como foi visto anteriormente, protege a armadura contra corrosão. Visto que esse processo executivo tem características particulares, esses sistemas de protensão são patenteados, no Brasil pode-se citar a Mac Protensão e a Rudloff.

Emerick (2002) explica que a protensão com aderência posterior apresenta um melhor comportamento quanto às rupturas localizadas, como por exemplo, uma explosão, incêndio ou demolição parcial. Também apresenta um comportamento satisfatório quanto à distribuição de fissuras.

3.4.2.2 Protensão sem Aderência

O elemento de concreto protendido sem aderência tem a armadura ativa pós-tracionada, ou seja, o alongamento da armadura é feito depois que o concreto é lançado e do seu endurecimento. Nesse caso os apoios são partes da própria estrutura, sendo esses os únicos pontos que ligam a armadura ao concreto, não havendo nenhuma aderência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Na protensão sem aderência são utilizadas cordoalhas engraxadas como armadura ativa. Elas dispensam a injeção de nata de cimento, como na protensão aderente. Elas são protegidas com uma graxa contra corrosão e se movem dentro da bainha.

A protensão não aderente é a principal concorrente do concreto armado, pois utiliza equipamentos leves e de fácil utilização, tornando viável a aplicação desse tipo de protensão em obras com pequenos vãos, de 3 a 5 metros. Então a protensão não aderente, diferente da aderente, torna-se viável para obras de pequeno porte. Outro diferencial desse método são as cordoalhas engraxadas, que são leves e flexíveis, ou seja, de fácil manuseio e armazenamento. A protensão com aderência, devido ao método mais complexo, que utiliza injeção de nata de cimento, e dos equipamentos mais pesados é utilizada predominantemente em obras de grande porte. (SCHMID, M. R. L., 2007, p. 33-35).

De acordo com Pereira et al. (2005), a protensão não aderente é utilizada em obras com carregamentos leves a moderados, nível de protensão parcial e afastamento entre pilares de no máximo 10 m. Aplica-se em construções de pequeno porte e moldadas *in loco* (figura 4), como por exemplo:

- a) edificações residenciais ou comerciais;
- b) pisos industriais;
- c) fundações de edificações de pequeno porte.

Figura 4 – Laje protendida por cordoalhas engraxadas



(fonte: CAUDURO, [2002], p. 24)

Pelo fato da protensão não aderente apresentar diversas vantagens e características competitivas em relação ao concreto armado em obras residenciais, esse é o método de protensão abordado no presente trabalho.

3.5 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS EMPREGADOS NA PROTENSÃO SEM ADERÊNCIA

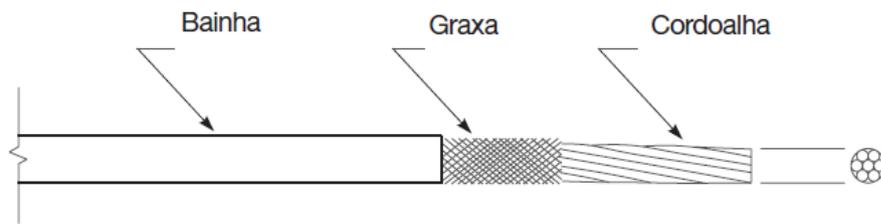
Os materiais e equipamentos necessários para realizar a protensão do concreto pelo método sem aderência são detalhados a seguir.

3.5.1 Cordoalhas Engraxadas

As cordoalhas engraxadas são idênticas as cordoalhas utilizadas na protensão aderente, entretanto, nesse caso a cordoalha tem uma cobertura de proteção contra corrosão e é revestida por uma bainha de polietileno de alta densidade (PEAD), como mostra a figura 5 (SCHIMT, M. R. L., 2007). As cordoalhas mais utilizadas são as de sete fios, diâmetro nominal de 1/2" ou 5/8", posicionando as cordoalhas no interior das bainhas formam-se os cabos (PFEIL, 1984).

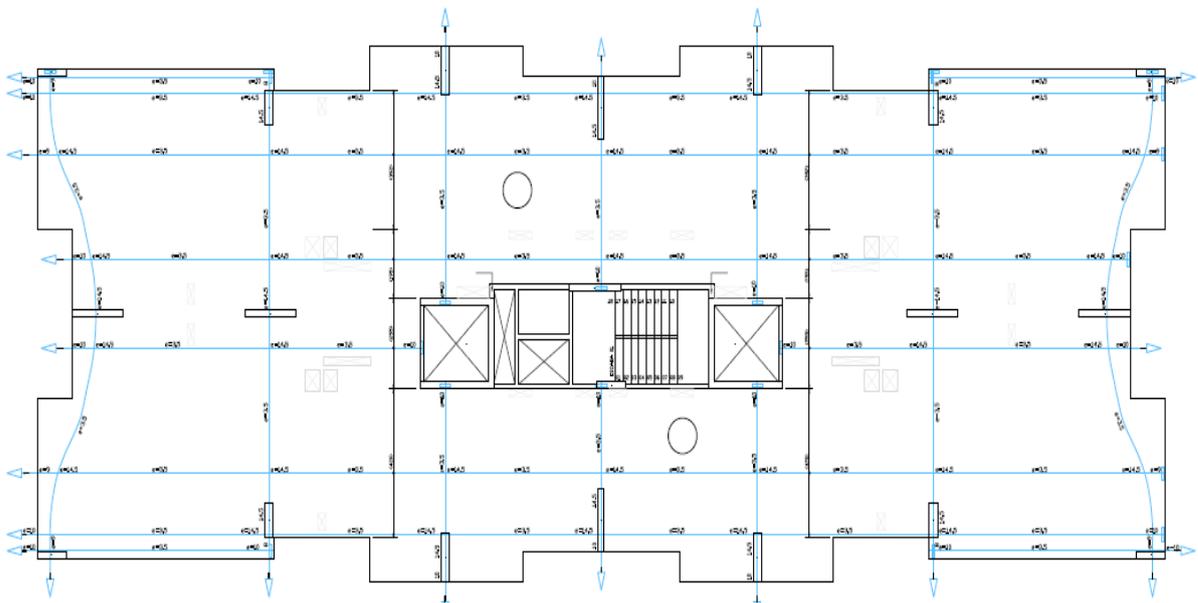
Segundo Voelcker⁷ (2004 apud LAZZARI, 2011), a sua utilização, em comparação à protensão aderente, é mais eficaz em elementos esbeltos, como lajes lisas, pois as cordoalhas permitem grandes curvaturas no plano horizontal, podendo ser desviadas para a passagem de instalações elétricas e hidráulicas ou devido ao formato da própria estrutura, como mostra a figura 6.

Figura 5 – Cordoalha engraxada



(fonte: CAUDURO, [2002], p. 29)

Figura 6 – Planta baixa de uma laje protendida



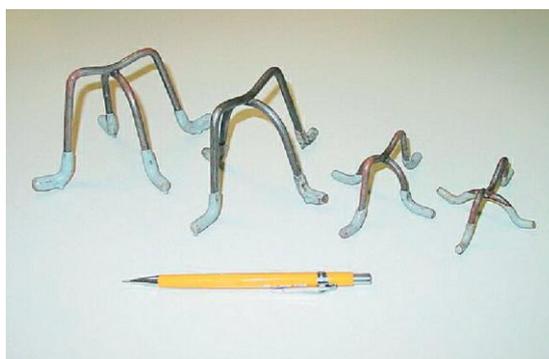
(fonte: obra não publicada⁸)

⁷ VOELCKER, M. **Análise dos fatores influentes na tensão última de protensão em cabos não aderentes.** 2004. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

⁸ Projeto de uma empresa construtora situada na cidade de Porto Alegre, RS.

Para assegurar o posicionamento das cordoalhas, antes e durante o lançamento do concreto, são utilizados dispositivos denominados “cadeirinhas”. Cadeirinhas são apoios plásticos ou metálicos (figura 7) que tem a finalidade de apoiar e segurar os cabos na posição correta de projeto (PEREIRA et al., 2005). Em lajes lisas protendidas são utilizadas cadeirinhas de diversas alturas, geralmente considerando cotas altas perto dos pilares, para evitar esforços de puncionamento, e cotas baixas nos vãos, para evitar a deformação.

Figura 7 – Cadeirinhas metálicas



(fonte: CAUDURO, [2002], p. 13)

As cordoalhas são fabricadas com uma resistência à tração de 190 e 210 kgf/mm² e relaxação baixa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). Cauduro ([2002]) afirma que os cabos devem ser fabricados com comprimento maior que a fôrma de borda para permitir a tração dos cabos. Essa folga no comprimento é necessária em cada ponto de protensão.

Cauduro ([2002], p. 30) explica a fabricação das cordoalhas:

A cordoalha nua é coberta com graxa inibidora de corrosão e então revestida com a bainha plástica [...]. O processo começa passando a cordoalha por um aplicador de graxa que recobre a cordoalha uniformemente com a quantidade exata de graxa inibidora de corrosão.

A cordoalha coberta de graxa segue pela máquina extrusora, que aplica e regula a espessura adequada de plástico derretido. Posteriormente a cordoalha passa por uma canaleta de água para que seja resfriada antes de ser novamente enrolada.

Pfeil (1984) explica que as armaduras de protensão são designadas pelas letras CP, logo após é indicada a resistência característica à ruptura por tração, f_{ptk} , em kgf/mm². A NBR 7483

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) exemplifica a designação da seguinte maneira:

- a) cordoalha de 7 fios: CP 190 RB 12,7 significa cordoalha para concreto protendido, categoria 190, relaxação baixa e diâmetro nominal de 12,7 mm;
- b) cordoalha de 3 fios: CP 190 RB 3 x 3,0 significa cordoalha para concreto protendido, categoria 190, relaxação baixa, 3 fios e diâmetro nominal de cada fio 3 mm.

No processo entre a saída da fábrica e a chegada à obra, as cordoalhas são enroladas como mostra a figura 8. Após os cabos serem enrolados e identificados com o nome da obra, número do pavimento e outros dados necessários, os rolos são carregados e enviados para o canteiro de obras. Após a entrega, a conservação das cordoalhas é responsabilidade da empresa construtora (CAUDURO, [2002]).

Figura 8 – Bobinas de cordoalhas engraxadas



(fonte: CAUDURO, [2002], p. 30)

As cordoalhas engraxadas são leves, flexíveis e de fácil manuseio. Elas são entregues geralmente em bobinas, logo isso torna seu armazenamento simples e de fácil acesso. O armazenamento deve ser feito em local seco, coberto e afastado do solo, por um estrado. Em caso de armazenamento em longos períodos de tempo deve ser evitada exposição à luz do sol. Contato com água, sal ou algum outro tipo de elemento corrosivo, também não é recomendado (CAUDURO, [2002]). Em alguns casos as cordoalhas já chegam na obra com

os cabos cortados de acordo com comprimento especificado em projeto, facilitando o processo.

Emerick (2002) destaca a importância da conservação das cordoalhas, que devem estar limpas e livres de corrosão. Falhas ou rasgos na bainha de PEAD não podem ser admitidos, deve-se reparar qualquer falha com fita plástica para que cordoalha não tenha contato com o concreto. Esse procedimento deve ser feito antes do lançamento do concreto.

Após a concretagem e ao tensionamento das cordoalhas, as pontas junto às ancoragens ativas devem ser cortadas por maçarico, tendo cuidado para que a chama não tenha contato com as cunhas, peça que prende a cordoalha na estrutura. Ela deve se cortada deixando uma pequena ponta para fora da cunha de modo que seja possível um cobrimento de 25 mm em relação à face do concreto (EMERICK, 2002).

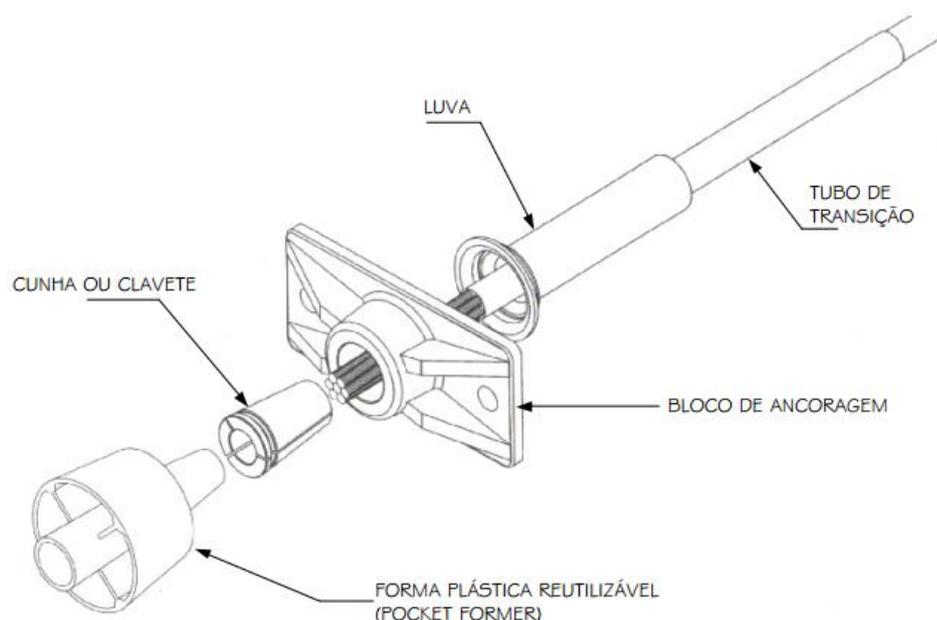
3.5.2 Ancoragem

Toda a armadura ativa da estrutura deve ser ancorada de modo que todo esforço aplicado a ela seja transmitido ao concreto. Essa ancoragem pode ser feita por aderência ou por equipamentos mecânicos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Cauduro ([2002], p. 11) define ancoragem como “Conjunto de peças mecânicas incluindo todos os componentes requeridos para ancorar (fixar) o aço para protensão e transmitir permanentemente a força de protensão ao concreto.”. As ancoragens são constituídas de placas de ancoragem e cunhas. As placas de ancoragem são peças de ferro, como mostra figura 9, que alojam as cunhas e tem como finalidade transferir a força de protensão para o concreto. O furo em que a cunha é alojada tem a superfície rugosa. A cunha consiste em uma peça de metal, dotada de dentes que são posicionados na cordoalha durante a transferência da força do equipamento de protensão para a ancoragem (PEREIRA et al., 2005). As ancoragens são classificadas de acordo com sua aplicação em:

- a) ativa;
- b) passiva;
- c) intermediária;
- d) morta.

Figura 9 – Ancoragem ativa



(fonte: PEREIRA et al., 2005, p. [22])

A ancoragem ativa está localizada na extremidade dos cabos e tem a finalidade de tensionar e fixar a armadura ativa. O macaco hidráulico – que é caracterizado a seguir – é posto nessa extremidade. A ancoragem passiva é equivalente à ativa na outra extremidade do cabo, porém ela não é utilizada para fazer a tração da armadura, somente para fixar (CAUDURO, [2002]).

São utilizados, como equipamento auxiliar, na extremidade ativa, uma forma plástica (figura 09) para moldar uma abertura no concreto que permita com que o macaco hidráulico possa acessar a cavidade e a placa de ancoragem. Essa peça é usada temporariamente durante o lançamento do concreto (PEREIRA et al., 2005).

Cauduro ([2002], p. 11) define ancoragem intermediária como:

Uma ancoragem localizada em qualquer ponto ao longo do comprimento do cabo, que pode ser usada para tensionar um dado comprimento do cabo sem a necessidade de cortá-lo. Normalmente usada em intervalos de concretagem para possibilitar a antecipação da protensão e remoção da fôrma.

3.5.3 Macaco hidráulico

Segundo Veríssimo e César Junior (1998a), o macaco hidráulico é o equipamento que aplica a força de protensão no concreto. Esse equipamento foi desenvolvido para o acionamento de trilhos de aterrissagem de aviões no final da Segunda Guerra Mundial, por esse motivo eles são produzidos com uma tecnologia sofisticada.

Os mesmos autores explicam que, como as forças de protensão são de valores elevados, o macaco hidráulico é a maneira mais simples de se obter essas forças. Cauduro ([2002], p. 3) caracteriza o macaco hidráulico utilizado na protensão sem aderência como “[...] engenhoso e leve (19 kg), que pode ser posicionado e protender em qualquer parte do comprimento do cabo, tensionando uma cordoalha de cada vez a cada 30 segundos.”.

O conjunto de equipamentos de protensão é constituído por macaco e bomba. Deve ser disponibilizado para a equipe de protensão, junto com os equipamentos, uma tabela de calibração, para que seja conhecida a pressão necessária para aplicar a força na armadura ativa. O manômetro deve vir regulado (CAUDURO, [2002]).

Figura 10 – Macaco Hidráulico



(fonte: CAUDURO, [2002], p. 16)

3.5.4 Concreto

O concreto protendido utiliza técnicas mais aprimoradas que o concreto armado, logo o concreto utilizado deve ser de melhor qualidade e o controle de qualidade mais rigoroso. Em obras de estrutura convencional, geralmente, se utiliza concretos com f_{ck} , resistência característica à compressão do concreto, menores que no concreto protendido (HANAI, 2005).

Hanai (2005) afirma que o concreto deve ter boa compacidade e baixa permeabilidade, isso faz com que ele tenha uma proteção contra a corrosão da armadura, que, quando solicitado por maiores tensões, como no caso do concreto protendido, é mais suscetível à corrosão. Esse fenômeno denomina-se corrosão sob tensão.

Segundo Cauduro ([2002]), devem-se tomar cuidados específicos no lançamento do concreto:

- a) no lançamento direto da calha do caminhão, deve ser verificado se os cabos não foram deslocados e se o concreto foi adensado corretamente;
- b) por grua ou guindaste, deve-se adotar uma altura mínima a fim de evitar que o concreto desloque os cabos na queda;
- c) com a utilização de bomba, não se deve apoiar o duto da bomba nos cabos, e ela deve ficar em posição que evite o deslocamento deles;
- d) os vibradores não devem ser colocados sobre os cabos durante o adensamento do concreto.

Procedimentos de controle de qualidade do concreto, como mapeamento, rastreabilidade e moldagem de corpos de prova também devem ser tomados. A protensão dos cabos só é feita depois dos ensaios de resistência a compressão para confirmar que o concreto já atingiu o um f_{ck} mínimo especificado em projeto para que a estrutura resista à tensão aplicada nas cordoalhas.

3.6 APLICAÇÃO EM LAJE LISA

Lajes lisas podem ser descritas como placas apoiadas sobre vigas ou diretamente sobre pilares. No caso do apoio em vigas, elas devem ter altura igual à espessura da laje (figura 11) (HENNRICHS, 2003). A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) define uma espessura mínima de 16 cm para laje lisa.

Lajes lisas protendidas por cordoalhas engraxadas: avaliação do processo executivo em comparação ao do concreto armado convencional em edificações residenciais

A laje lisa, pelo fato de não ter engrossamento na laje, ou seja, não ter capitéis e vigas (maiores que a espessura da laje), proporciona vantagens como:

- a) flexibilidade no projeto pela ausência de vigas;
- b) economia na quantidade de fôrma;
- c) economia de carpinteiros e armadores;
- d) estruturas mais leves.

Figura 11 – Estrutura utilizando laje lisa



(fonte: PEREIRA et al., 2005, p. [17])

Apesar dos diversos benefícios da laje sem vigas, nem sempre esse método é recomendado. Hennrichs (2003) destaca algumas desvantagens desse tipo de estrutura, como:

- a) punção das lajes (ruptura localizada): pode ser solucionado adotando uma espessura suficiente ou uma armadura de punção;
- b) deslocamentos transversais da laje: para uma mesma rigidez e mesmo vão, esse deslocamento é maior em lajes sem vigas;
- c) estabilidade global de edifícios altos: ela diminui devido às ações horizontais, devendo ser adotadas paredes estruturais ou núcleos rígidos.

De acordo com Cauduro ([1999]), a laje lisa sem vigas de concreto armado foi muito utilizada em construções no Brasil. Entretanto, apresentaram diversas manifestações patológicas como deformação excessiva e fissuração.

A protensão, inicialmente utilizada com aderência, foi a solução para os problemas causados pelo concreto armado, eliminando as deformações, pois o concreto protendido melhora o comportamento da estrutura. Além disso, a laje protendida possibilita um aumento de vão entre os pilares (CAUDURO, [1999]).

O mesmo autor afirma que o vão entre pilares, quando em concreto protendido, pode ser de 6 a 8 metros sem prejudicar a estrutura e os pilares não necessitam estar alinhados, devido a ausência das vigas. Essas características proporcionam projetos ainda mais flexíveis.

O concreto protendido vem sendo bem aplicado em lajes lisas nos últimos anos, visto que a laje representa uma parte significativa do custo da estrutura no orçamento da obra. (SCHMID, M. T., 2009). Pela ausência de vigas tem-se economia em fôrma, armadura e concreto.

Como foi visto anteriormente, o método de protensão não aderente por cordoalhas engraxadas é de fácil aplicação, sendo viável em obras de pequeno porte. Utilizando esse método em lajes lisas, tem-se um método construtivo muito competitivo em relação às estruturas convencionais, em edificações residenciais.

Cauduro ([1999], p. 2) afirma que:

A protensão não aderente através da cordoalha engraxada e plastificada (técnica utilizada há mais de 40 anos nos Estados Unidos, porém só disponível no Brasil a partir de março de 1997) apresenta-se como nova solução tecnológica para as lajes planas, agora também dos edifícios residenciais. Essa nova tecnologia, além de minimizar as deformações das lajes, trouxe uma série de vantagens executivas que fazem com que possam ser utilizadas até em edifícios de vãos muito pequenos e de baixo custo, por exemplo apartamentos populares de um dormitório:

- a) lajes mais delgadas, pois devido à pequena dimensão da bainha plástica (15 mm) aumenta-se o braço de alavanca da protensão;
- b) como as cordoalhas têm bainhas plásticas individuais, elas podem espalhar-se na laje também em movimentos horizontais, possibilitando que as cordoalhas passem através de diversos pilares mesmo que sejam desalinhados entre si, além de facilitar a passagem das instalações na laje;
- c) fácil transporte e manuseio das cordoalhas, pois sua capa plástica é muito resistente não exigindo cuidado durante a montagem e concretagem;

- d) as ancoragens são pequenas e práticas, reunindo em uma só peça o bloco e a placa de distribuição de tensões, e já vêm acompanhadas de uma forma plástica para nicho.

A ausência de vigas na laje lisa permite a utilização de técnicas que não são possíveis em outro tipo de laje, fazendo com que essa estrutura apresente ainda mais vantagens em relação à convencional. A técnica de mesas voadoras, painéis desmontáveis que podem ser montados rapidamente no andar superior é uma solução muito atrativa pelo fato de reduzir ainda mais a mão de obra de carpinteiros pela facilidade da execução dessa fôrma (MOURA, 2002). Outro fator importante em relação à mão de obra são as regiões em que, pelo excesso de número de obras nos dias atuais, faltam profissionais. Por esse motivo, o custo para trazê-los de outras regiões do País é ainda maior. Sendo assim, procura-se racionalizar a mão de obra implantando novas tecnologias na construção.

4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO EXECUTIVO DE UMA LAJE LISA PROTENDIDA

Neste capítulo, é descrito o processo executivo de uma laje lisa protendida em uma obra que foi acompanhada durante a realização deste estudo, sendo observadas as características particulares desse sistema.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA OBRA

A obra está localizada no bairro Humaitá, na cidade de Porto Alegre - RS, situada em um terreno de grandes dimensões que possibilita a instalação de guias, além da circulação livre de caminhões e outras máquinas. A obra no total contempla sete torres, divididas em três obras. Nesse trabalho foi estudada uma delas, que comporta duas dessas torres, as primeiras a serem executadas na obra.

As torres são idênticas e têm 17 pavimentos, sendo 16 pavimentos tipo. A laje tem 537 m² e possui 8 apartamentos por pavimento. Além desses, existem apartamentos no térreo com jardim. No térreo têm-se espaços de uso comum, como salão gourmet, salão de festas, *fitness* e brinquedoteca. Os apartamentos têm uma área privativa de 50 a 65 m² e possuem de dois e três dormitórios. Cada apartamento tem a opção de sala ampliada e cozinha integrada. Dessa forma, caracterizando uma planta comum que não necessita de recursos especiais ou projeto diferenciado.

A empresa terceirizou a mão de obra da estrutura e das instalações elétricas e hidráulicas, porém, ainda assim, possui mão de obra própria para serviços auxiliares, como segurança do trabalho. Foram instaladas duas guias, uma para cada torre, item essencial devido ao sistema de fôrmas e escoramento utilizado, que é descrito a seguir, além da utilização de caminhão *munck* e guindaste em alguns momentos. A obra também possui central de concreto própria, fato que não influenciou os resultados avaliados nesse trabalho.

Figura 12 – Visão geral do canteiro de obras



(fonte: foto da autora)

4.2 PROCESSO EXECUTIVO

O processo executivo foi analisado nas duas torres, em diversos pavimentos, sendo descrito o procedimento utilizado a seguir.

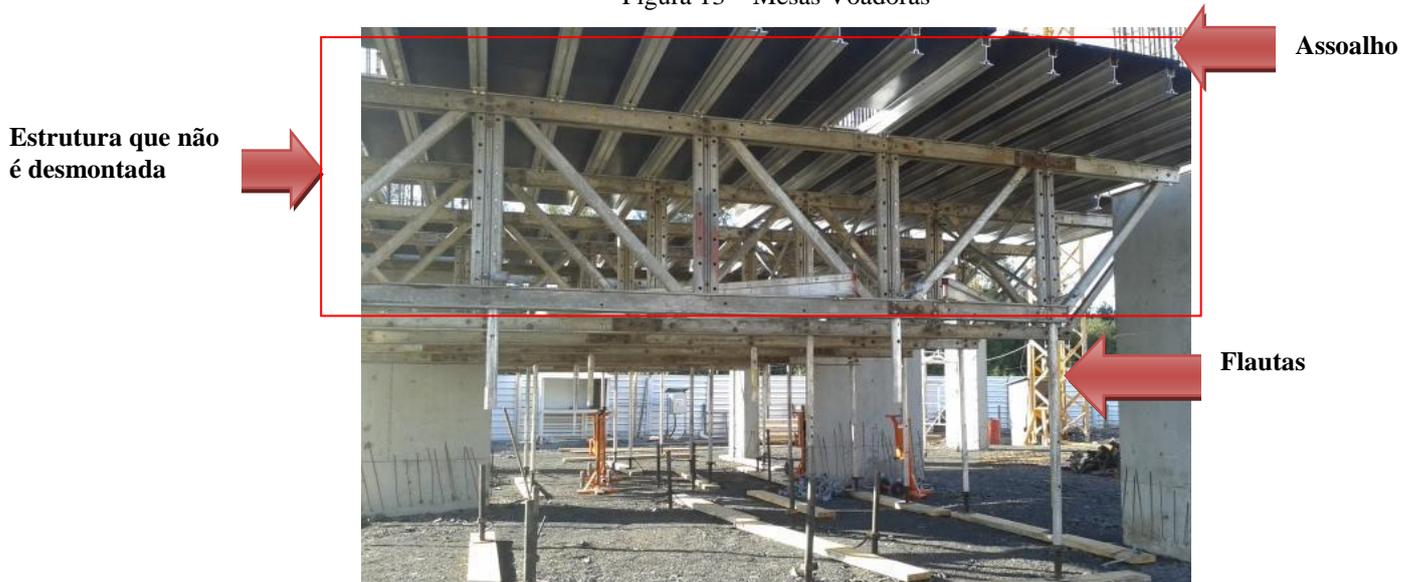
4.2.1 Fôrma da laje

Como sistema de fôrmas foi utilizado o sistema conhecido como mesas voadoras, que são estruturas metálicas com a função de escoramento e fôrma da laje, como mostra a figura 13. As mesas voadoras tiveram um tempo de execução inicial de 40 dias, para que pudesse ser montada toda estrutura metálica da mesa que é utilizada até o final da obra. As mesas eram fornecidas com um projeto de montagem que foi realizada no canteiro. Em cada pavimento, as mesas são içadas até a laje superior e se inicia um novo processo, como é descrito a seguir

Como etapa inicial é feita uma pré-montagem, sendo montada a parte superior à mesa. São colocadas chapas compensadas resinadas de 20 mm como assoalho, apoiados nessa estrutura, fazendo com que a montagem dessa parte esteja completa e não é necessário repetir esse processo ao longo da obra. Após isso as mesas são colocadas na posição de projeto, pela grua

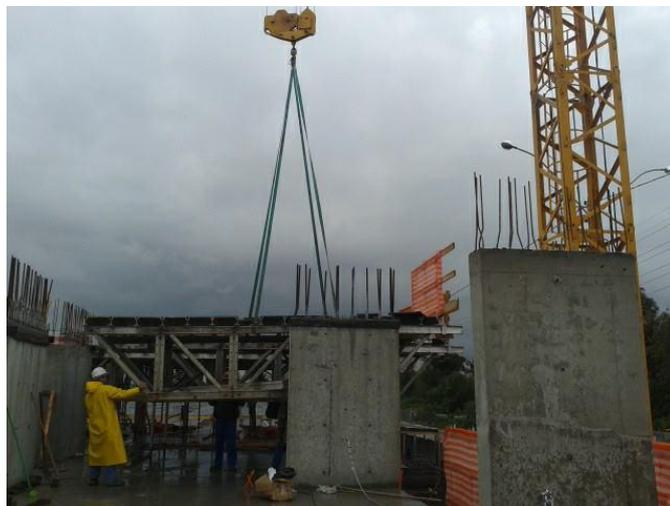
ou por um caminhão *munck* no primeiro pavimento, sendo esse processo repetido em todos os pavimentos, utilizando a grua, como mostra a figura 14. Depois de posicionadas, um macaco hidráulico as ergue, para que em baixo delas sejam encaixadas as flautas, que são apoios que funcionam como os “pés” da mesa, eles vão dar apoio e regular a altura necessária de acordo com o pé direito da obra. Para auxiliar esse processo é utilizado um nível a *laser* e usadas como referência medidas dadas pela topografia.

Figura 13 – Mesas Voadoras



(fonte: foto da autora)

Figura 14 – Posicionamento das Mesas Voadoras



(fonte: foto da autora)

Entre as mesas, na região dos pilares, foram utilizados arremates com chapa compesada resinada de 20 mm, o mesmo usado sobre a mesa, e colocado escoramento convencional. Além disso, são abertas “janelas” no assoalho, apoiado nas mesas para que seja possível a passagem da corda para amarração quando for feito o içamento pela grua no processo de voo das mesas que é descrito em itens seguintes, essa janelas são fechadas antes da concretagem.

4.2.2 Armadura

A primeira etapa, depois da fôrma montada, é a colocação da armadura positiva (figura 15). Ela é montada no térreo, onde existe uma central de armação, e é içada pela grua para então ser posicionada no local correto.

Figura 15 – Posicionamento da armadura positiva



(fonte: foto da autora)

Logo após, se inicia o posicionamento de montagem das cordoalhas, armadura ativa da estrutura. Elas são classificadas, de acordo com a posição, em cordoalhas horizontais e verticais. Foi feita a colocação das cordoalhas horizontais e depois de concluído, as verticais.

Depois do posicionamento dos cabos na posição de projeto, foi passada uma das pontas por um orifício deixado no espelho para a ancoragem ativa. Para isso acontecer, é retirada a capa

plástica na ponta da cordoalha, para que ela passe sem a capa para o outro lado. Como pode ser observado na figura 16, foi posto um nicho plástico em cada cordoalha pelo lado de fora e a placa de ancoragem ativa pelo lado de dentro. A cordoalha é arrematada com uma fita plástica, como é visto na figura 17, para evitar a entrada de nata de concreto no sistema de ancoragem ativa. Essa mesma fita foi utilizada para proteger a cordoalha quando foram encontradas falhas na capa de PEAD que a envolve. A ancoragem passiva já vem instalada na cordoalha desde a fábrica (figura 18), então, só é necessário fixá-la, para isso e, por questões estruturais, são utilizadas barras de aço transversais a ancoragem, chamada de fretagem.

Figura 16 – Montagem da extremidade ativa



(fonte: foto da autora)

Como próximo passo, as cordoalhas são apoiadas nas cadeirinhas com as cotas especificadas. Existe uma cadeirinha diferente para cada cota, elas variam de 3,5 cm, quando é utilizado somente um espaçador comum de armadura passiva, como mostra a figura 18, até 14,5 cm sendo essa a cadeirinha mais alta, ilustrado na figura 19.

Foram utilizadas cordoalhas engraxadas de sete fios, com uma resistência de 190 kgf/mm². Já são fornecidas cortadas de acordo com o projeto e com a sobra, trecho de cordoalha que fica para fora da laje, necessária para a protensão.

Figura 17 – Proteção da placa de ancoragem



(fonte: foto da autora)

Figura 18 – Ancoragem Passiva Antes da Montagem



(fonte: foto da autora)

Figura 19 – Cadeira de apoio para cordoalha



(fonte: foto da autora)

4.2.3 Instalações

As instalações hidráulicas iniciam paralelamente com a armadura positiva. São utilizados eixos de referência marcados nos espelhos. Algumas tubulações tiveram que ser deslocadas na primeira laje e modificadas no projeto, devido à incompatibilidade com as cordoalhas.

Para as instalações elétricas foram utilizados eletrodutos flexíveis corrugados de 25 mm e 32 mm e caixas elétricas de passagem de PEAD. A etapa de montagem de cordoalhas afeta diretamente a passagem de eletrodutos, então, para não colocar em risco o rompimento de uma tubulação, visto o entrelaçamento que ocorre entre as cordoalhas e as tubulações como mostra a figura 20, atrasou-se o início dessa etapa. Tomou-se essa decisão porque problemas que podem ocorrer em edificações durante a concretagem (quebra, rompimento, entupimento ou desvio de um eletroduto) não podem ser admitidos de maneira nenhuma na laje pretendida, devido à impossibilidade de quebrar a laje. Caso isso seja feito, pode ocasionar o rompimento de uma cordoalha durante esse processo, o que pode ser perigoso tanto para a segurança dos funcionários quanto para a estrutura.

Figura 20 – Interferência das cordoalhas com instalações



(fonte: foto da autora)

Devido à diminuição de armadura passiva na laje, teve-se dificuldade em fixar as tubulações elétricas. Em função foram utilizadas as mesmas cadeirinhas usadas nas cordoalhas para dar apoio e fixar os eletrodutos e a marcação de gás.

Além disso, devido às mesas voadoras, a tubulação que desce para o andar inferior não poderia passar para baixo do nível da laje, devido ao sistema de retirada de mesas. Para isso optou-se pela utilização de caixas, então, foi utilizado um material específico para essa função, como mostra a figura 21.

Figura 21 – Descidas elétricas



(fonte: foto da autora)

4.2.4 Concretagem

A empresa optou pelo sistema de laje zero, visto que a laje protendida apresenta muito pouca deformação, viabilizando esse sistema. Como a equipe de engenharia não conhecia, na prática, o comportamento da laje protendida, o contrapiso foi considerado em cronograma e orçamento, porém, só foi executado nas áreas molhadas e uso comum, devido ao assentamento de cerâmica no piso.

A concretagem foi feita por bomba lança até o sétimo pavimento e após isso por bomba estacionária, o concreto era fornecido por usina que ficava na própria obra. Usou-se um concreto com f_{ck} de 35 MPa que atingia 20 MPa em 48 horas e *slump*, abatimento de tronco de cone, de 180 ± 20 mm. Como método de controle, foi feito o mapeamento e a rastreabilidade do concreto, moldagem de corpos de prova para ruptura à compressão aos 3 dias ,para verificação dos 20MP que deve ser atingido no segundo dia, aos 7, 14 e 28 dias.

4.2.5 Protensão

Após a concretagem, foram retirados os nichos plásticos e colocadas as cunhas, peça que possui dentes que prendem o cabo, como mostra a figura 22, que vão garantir que as cordoalhas não voltem para a posição original depois da protensão. Nesse orifício deixado foi encaixado o macaco hidráulico. Foram feitas marcas nas cordoalhas com uma mestra de 10 cm (figura 23) para ser usada com referência depois da protensão. A partir dessa marca que se pode medir o alongamento do cabo.

Figura 22 – Cunhas



(fonte: foto da autora)

Figura 23– Marcação das cordoalhas



(fonte: foto da autora)

Três dias após a concretagem da laje era feito o rompimento de corpos de prova do concreto. Somente após a entrega do relatório da empresa de controle tecnológico do concreto para o engenheiro da obra era realizada a protensão.

O macaco hidráulico e a bomba compõem o equipamento necessário para protender a laje: o macaco foi encaixado no cabo e, de acordo com uma sequência de protensão especificada em projeto (figura 24). Foi considerada a mesma pressão na bomba para todas as cordoalhas, sendo o alongamento diferenciado pelo comprimento do cabo, quanto maior o cabo maior o alongamento observado.

Depois desse processo, foram medidos os alongamentos e passados para a aprovação do projetista, só depois a laje foi liberada para desforma. Em alguns casos foi necessário tensionar novamente alguns cabos.

Figura 24 – Protensão das cordoalhas



(fonte: foto da autora)

4.2.6 Desforma - Voo das Mesas

A retirada das fôrmas do assoalho só pode ser feita depois da protensão, geralmente, antes disso as fôrmas de borda da laje já foram retirados. Para acontecer o voo das mesas, o cabo de aço para linha de vida, e que posteriormente vai compor o guarda-corpo permanente desse pavimento, já teve que ser instalado. Essa instalação se faz necessária devido ao fato de que o guarda-corpo da laje concretada fica preso às mesas voadoras, e saem com elas, assim que as mesas são baixadas.

O primeiro passo da desforma consistiu na colocação dos macacos hidráulicos novamente nas mesas, para que as mesas fossem baixadas (figura 25). Após esse passo e antes que ocorra o voo, as fôrmas dos *shafts* foram retiradas e foram feitas proteções nas aberturas da laje, para que não ocorram acidentes com os funcionários que estão em cima da laje posicionando a mesa que sobe.

Figura 25– Retirada das mesas



(fonte: foto da autora)

As mesas foram apoiadas em roletes, como mostra a figura 26, que ficam em cima de cavaletes móveis de aço. Eles são colocados em pontos específicos e então o macaco que sustenta as mesas é baixado, fazendo com que elas ficassem apoiadas sobre os roletes. Com auxílio dessas peças, elas foram empurradas para frente até que ficassem com uma parte projetada para fora do pavimento. Nesse momento, foi feita a amarração à grua através de duas aberturas deixadas em painéis no assoalho, essas aberturas eram fechadas antes da concretagem. A mesa foi projetada ainda mais para frente quando foi presa a mais dois pontos com a grua.

A mesa é deslocada até estar totalmente fora da laje, então, a estrutura é içada até o pavimento superior (figura 27), sendo diretamente apoiada sobre as flautas que estão posicionadas em pontos determinados. O procedimento de fôrma é repetido a partir desse momento.

Figura 26 – Apoio das mesas em roletes



(fonte: foto da autora)

Figura 27 – Içamento das mesas



(fonte: foto da autora)

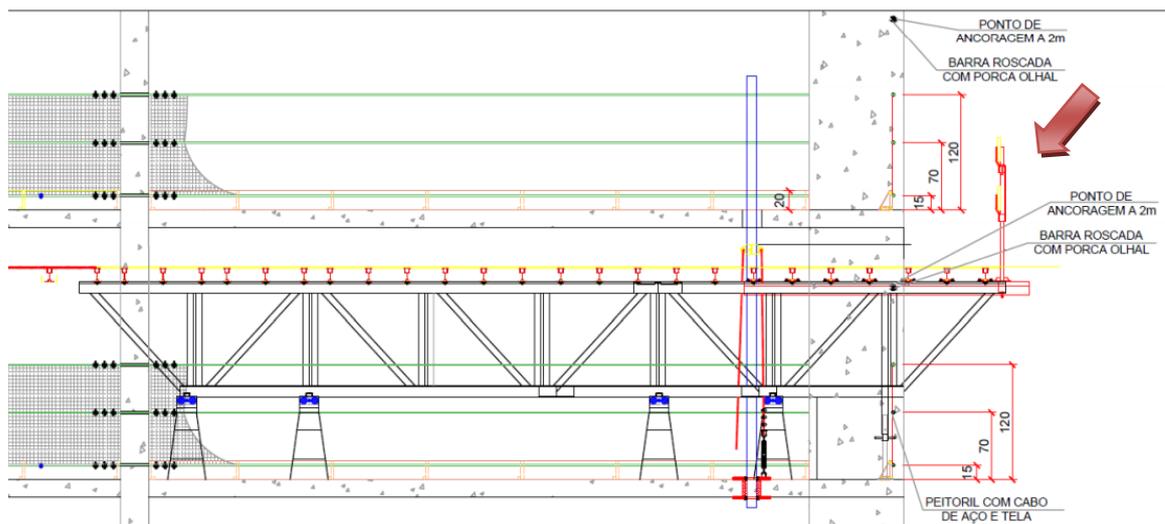
4.2.7 Procedimentos de segurança

Foram adotados os seguintes sistemas de segurança:

- a) proteção de periferia da laje composto de cabo de aço, tela e rodapé de madeira;
- b) linha de vida de captura de queda com cabo de aço fixado na estrutura de concreto (pilares), antes da retirada das mesas;
- c) linha de vida com cabo de aço e tubo metálico para a conexão dos funcionários para trabalho em cima das mesas;
- d) bandeja primária e bandejas secundárias de proteção.

O procedimento de segurança das mesas voadoras apresentou várias etapas. Antes de descer a mesa, os cabos de aço para montagem do guarda-corpo permanente da laje (nesse momento os cabos deverão servir somente como linha de vida) já foram colocados, pois, ao baixar a mesa, desmonta-se o guarda-corpo da laje já concretada, como já foi citado anteriormente (figura 28). Retirou-se o cabo superior, a 1,20 m de altura, do guarda-corpo da laje abaixo que até então eram três cabos de aço. Fez-se esse processo para que as mesas pudessem ser projetadas para frente, como mostra a figura 29 e 30.

Figura 28 – Guarda-corpo baixo

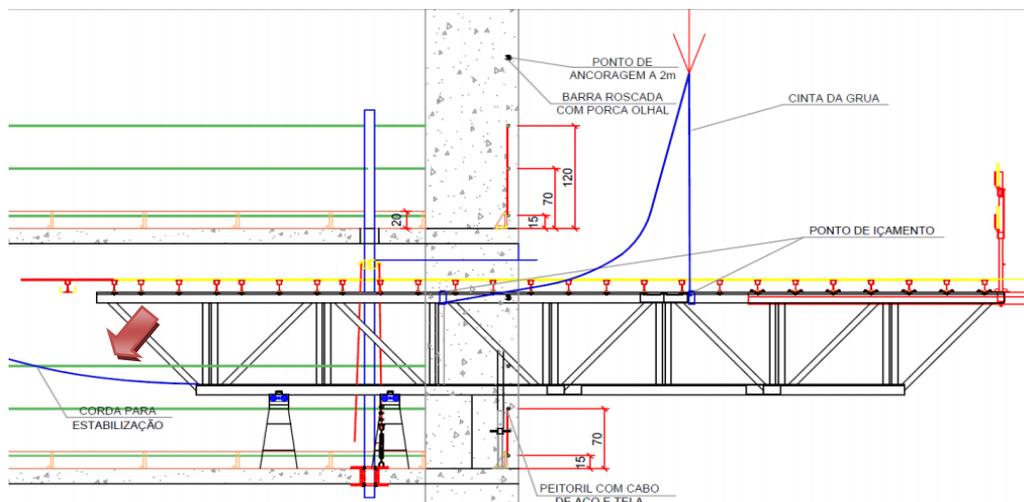


(fonte: obra não publicada⁹)

⁹ Projeto de uma empresa construtora situada na cidade de Porto Alegre, RS

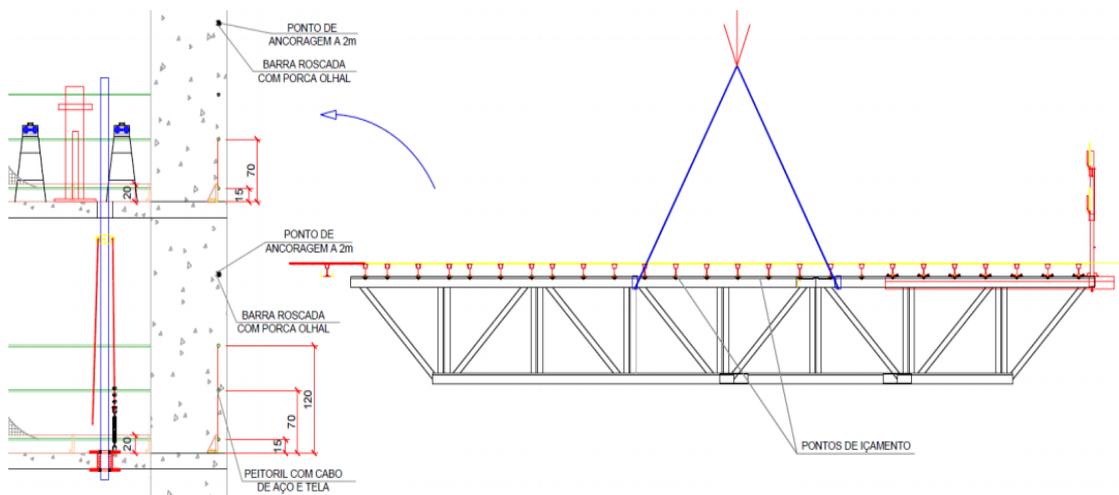
Depois de a mesa ter sido colocada no pavimento de cima, é recolocado o cabo retirado e então é instalado tela e rodapé para compor o guarda-corpo permanente da laje. Foram deixadas esperas para postes na laje concretada, para que esses atravessem o assoalho das mesas e atuem como uma estrutura para linha de vida. Foram passados cabos de aço para que possa ser feito a manutenção do guarda-corpo que voa junto com a mesa, assim como outros trabalhos antes que esse não tenha sido terminado (figura 31).

Figura 29 – Retirada do cabo a 1,20m e amarração das mesas



(fonte: obra não publicada ¹⁰)

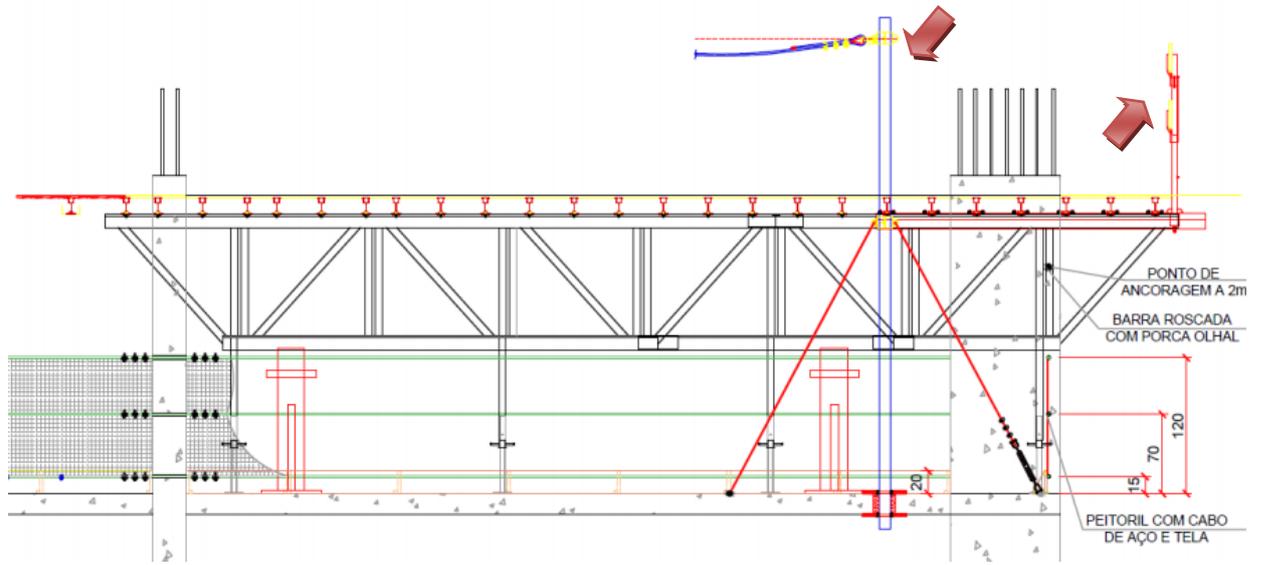
Figura 30 – Voo das Mesas



(fonte: obra não publicada ¹⁰)

¹⁰Projeto de uma empresa construtora situada na cidade de Porto Alegre, RS .

Figura 31 – Linha de vida e guarda-corpo da laje



(fonte: obra não publicada¹¹)

¹¹ Projeto de uma empresa construtora situada na cidade de Porto Alegre, RS

5 COMPARATIVOS DA LAJE LISA PROTENDIDA COM O SISTEMA TRADICIONAL

Para obter-se uma base de comparação para a laje lisa protendida para avaliar suas vantagens e desvantagens, acompanhou-se a execução de um pavimento de uma obra que apresentava uma laje de concreto armado com vigas, ou seja, o sistema convencional. Foi escolhida uma obra que possuísse características em comum, 17 pavimentos, 2 torres e área da laje semelhante. Também se teve a preocupação de escolher uma obra de uma empresa conceituada que possuísse uma filosofia e forma de trabalho semelhante. Ambas as empresas prezaram pela rapidez no ciclo, qualidade e economia nos custos. A obra de sistema convencional é classificada pelo mercado imobiliário de Porto Alegre, como sendo de alto padrão. São expostas as características das obras no quadro 1.

Quadro 1– Características dos Empreendimentos

	LAJE LISA PROTENDIDA	LAJE CONVENCIONAL
TORRES	2	2
PAVIMENTOS	17	17
ÁREA LAJE (m²)	537	523
ÁREA APARTAMENTO (m²)	50 a 65	255

(fonte: elaborado pela autora)

Considerou-se como sistema convencional uma estrutura com laje maciça, vigas e pilares, e um sistema de fôrmas que utilizasse chapa compensada e escoras metálicas. Realizou-se a análise comparativa no processo executivo, observando-se cada etapa do ciclo de concretagem, o prazo final, a equipe e a produtividade, assim como o consumo de materiais, esse sendo analisado através de índices.

5.1 COMPARATIVO DAS ETAPAS DO PROCESSO EXECUTIVO

Notou-se diferenças significativas entre cada etapa do processo executivo da laje protendida, e da laje convencional. Essas diferenças são descritas nos itens a seguir.

5.1.1 Fôrma

A obra que utilizou um sistema de fôrma convencional teve a execução distribuída em três etapas. Como primeiros passos, foram feitas as fôrmas dos pilares, depois que elas foram colocadas no prumo e travadas com escoras específicas se iniciou a montagem das vigas. Nessa etapa teve início o escoramento da laje com o uso de escoras que foram retiradas da quarta laje abaixo, como é explicado adiante. A montagem dos painéis da laje só pode iniciar depois das vigas estarem posicionadas, como mostra a figura 32. Os pilares da obra com sistema de protensão também foram a primeira etapa, a armadura era executada no térreo e já era encaixada na fôrma, que era a mesma usada para todos os pavimentos. Então esse conjunto foi içado e colocado no lugar já pronto.

Figura 32 – Montagem do assoalho da laje



(fonte: obra não publicada¹²)

¹² Procedimento Operacional de uma empresa construtora situada na cidade de Porto Alegre,RS.

A ausência de vigas na laje lisa pode ser considerada como uma vantagem também pelo fato de que diminui a quantidade de fôrmas e mão de obra para montá-las. Entretanto, essa atividade no sistema convencional (montagem de vigas) foi realizada em menos de um dia e em paralelo com outras atividades, necessitando, apenas de mais mão de obra para que isso pudesse acontecer simultaneamente.

Para montagem da fôrma da laje com vigas foram posicionadas as longarinas apoiadas nas escoras metálicas, de acordo com o projeto de escoramento. Para o assoalho da laje, foi utilizado uma chapa de madeira compensada resinada de 12 mm, posicionada sobre as longarinas metálicas, também conforme projeto. Em algumas posições, em uma das chapas, foi deixado um vazio para o início da desforma, antes da concretagem eles foram cobertos para que não ocorresse o vazamento de concreto para o andar inferior. A conclusão do assoalho da laje ocorreu no terceiro dia, assim como o término do escoramento.

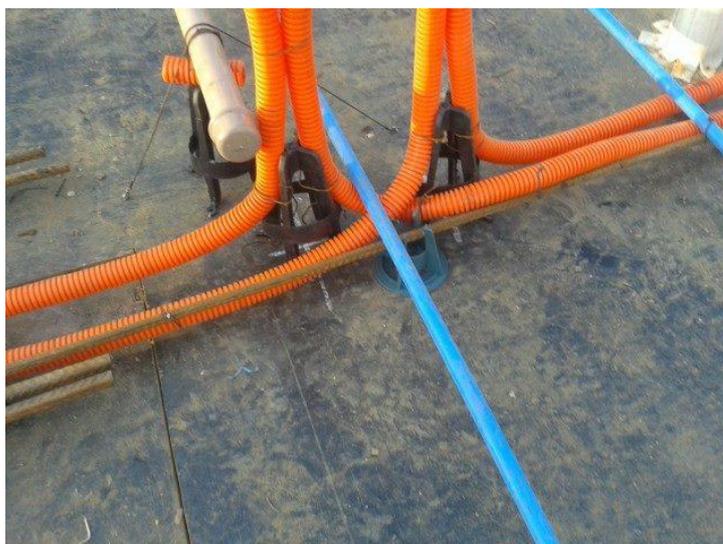
Já a laje lisa, possibilitou o uso das mesas voadoras, que é uma tecnologia que não poderia ser utilizada em obras com laje convencional, em virtude da quantidade de vigas. Cabe destacar que as fôrmas voadoras exigem grua ou equipamentos de guindar, que não é necessário no caso de uma fôrma convencional.

5.1.2 Armadura

Na laje convencional, as armaduras das vigas foram feitas no quarto dia, assim como o início da armadura positiva, sendo necessário mais um dia para a sua conclusão. No sétimo dia concluiu-se a armadura negativa, totalizando quatro dias para conclusão dessa etapa.

Devido à armadura ativa na laje protendida, tem-se uma menor quantidade de armadura passiva – positiva e negativa – na laje. Isso faz com que esses dois processos se tornem muito rápidos, porém adicionando mais um: a colocação das cordoalhas. Como já foi explicado anteriormente, essa redução de armadura resultou em desafios para a equipe de engenharia para a fixação de outros elementos, que foi resolvido com a colocação de espaçadores tipo cadeirinhas para eletrodutos e para a tubulação de gás, como já foi citado (figura 33). Na laje convencional, não apresentou esse empecilho, sendo as instalações fixadas na própria armadura.

Figura 33 – Cadeiras de apoio para instalações



(fonte: foto da autora)

5.1.3 Instalações

As instalações hidráulicas e elétricas iniciaram junto com a armadura positiva, não havendo nenhum impedimento e interferência entre essas etapas. Ela terminou em tempo hábil, não afetando o prazo do ciclo, diferente do que foi observado na laje lisa protendida, como foi citado no capítulo anterior. Para as instalações elétricas foram utilizados eletrodutos flexíveis de PEAD e caixas de passagem elétrica metálicas.

As instalações elétricas na laje protendida iniciam somente após o término da colocação de cordoalhas, como foi citado no capítulo anterior. Esse tipo de procedimento ocasionou atraso nessa etapa. Como a impossibilidade de a equipe começar antes ocorre devido à quebra dos eletrodutos que ficam entre as cordoalhas, isso poderia ter sido revertido caso fosse utilizado um material de melhor qualidade. Sabe-se que, em uma laje comum, os mesmos procedimentos de qualidade e a mesma preocupação devem ser considerados, porém, caso esses problemas venham a aparecer, teria uma solução mais fácil e de menos risco do que na laje que foi protendida.

5.1.4 Concretagem

Na laje convencional, a concretagem foi feita por bomba estacionária pois estava fora do alcance da bomba lança. Não ocorreu nenhum acréscimo de equipe nessa etapa em relação à equipe de execução da laje, ao contrario da laje lisa. A laje recebeu contrapiso em uma etapa posterior, então, não houve a execução de polimento para o acabamento. Utilizou-se concreto com f_{ck} de 30 MPa e *slump* de 100 ± 20 mm. As únicas diferenças entre as obras observadas foi o tipo de concreto, já que a laje protendida tinha exigência de um f_{ck} de 20 MPa em 48 horas, como já foi citado, e o acabamento da laje.

A opção de se utilizar laje zero na laje lisa pode acarretar em uma série de desvantagens, como de diminuição do isolamento acústico, por exemplo. Porém, esse fato não foi analisado visto que foi uma decisão da empresa construtora que optou por esse sistema, mas poderia, facilmente, optar por contrapiso caso quisesse uma qualidade melhor para a construção.

Em ambos os sistemas foram feitos procedimentos de qualidade como rastreabilidade e mapeamento do concreto, assim como na laje lisa protendida. O rompimento dos corpos de prova para verificação de resistência à compressão foram feitos para 7, 14 e 28 dias, não sendo necessário o rompimento aos três dias como na laje a ser protendida.

5.1.5 Desforma

Na laje comum, a desforma foi realizada de maneira parcial, sendo mantidos os fundos de vigas e faixas na laje que receberam o reescoramento. Essas tiras de fôrma foram fabricadas em quantidade adicional, cinco jogos, devido à permanência dessas chapas na mesma laje até a execução da quinta laje acima. Foi previsto três níveis de laje com esse reescoramento, sendo previsto a movimentação das escoras sempre para a quinta laje, ou a quarta laje acima, esse processo pode ser visto na figura 34. Esse processo configurou uma escoramento de 100%, 100%, 50% e 50%. Sendo o primeiro escoramento de 100% o da laje que foi concretada (figura 34). Quando as escoras da última laje reescorada são retiradas, o concreto já tem 28 dias de idade e já atingiu sua resistência final, 35 MPa.

Figura 34 – Reescoramento do Sistema Convencional



(fonte: adaptado de obra não publicada)

Nas lajes lisas, após o processo da retirada das mesas voadoras, não resta nenhuma fôrma, ao contrário da laje convencional. Utilizou-se reescoramento na laje protendida duas lajes abaixo, sendo após a terceira laje retirado a reescoramento da primeira, como mostra a figura 35. As escoras metálicas foram posicionadas diretamente em contato concreto, não havendo resto nenhum de fôrma nas lajes. Esse sistema mais otimizado ocorre devido ao tensionamento da armadura de protensão.

Figura 35 – Reescoramento do Sistema de Protensão



(fonte: elaborado pela autora)

5.1.6 Procedimentos de segurança

Procedimentos como proteção de periferia, colocação de postes para linha de vida e bandeja primária e secundária foram observados tanto na obra de laje lisa, quanto no processo convencional. Devido à retirada das mesas e, junto à retirada do guarda-corpo que era aderido a elas, alguns itens a mais de segurança tiveram que ser adotados, acrescentado etapas ao sistema de laje lisa, como foi explicado no item 4.2.7. O guarda-corpo da laje convencional também era desmontado com a desforma e refeito um permanente para o pavimento, porém a laje superior não dependia desse processo, como na laje lisa.

Nenhum procedimento de segurança adicional devido à protensão foi adotado. Apesar disso, os procedimentos de segurança da laje lisa protendida foram mais complexos que os da laje convencional, devido ao voo das mesas, como já foi citado no capítulo anterior, demandando mais tempo e ocasionando atrasos no ciclo da laje. O guarda-corpo e linhas de vida tiveram que ser adaptados para esse sistema de fôrma, optou-se pelos cabos de aço pela versatilidade da desmontagem dos cabos para o voo das mesas.

5.2 COMPARATIVO DE EQUIPE

Um dos itens observados nos acompanhamentos nas duas obras foi o número de funcionários necessários para a execução da laje no tempo determinado. Notou-se uma diferença significativa entre os dois sistemas. Na obra estudada, a laje protendida teve uma equipe 19 funcionários de composta de:

- a) 13 carpinteiros;
- b) 3 armadores;
- e) 2 encarregados;
- f) 1 técnico de protensão.

Apesar de os funcionários estarem classificados em alguma especialidade, todos, com exceção do técnico e dos armadores, podem ser considerados como profissionais polivalentes, ou seja, exercem mais de uma função na execução da laje. Além desses citados, existe o operador da grua e o sinalizador. O técnico verifica a altura das cotas das cordoalhas, faz procedimentos simples de marcação de mestra e colocação de cunha, como foi descrito anteriormente, além

de fazer a protensão da laje com a utilização do macaco hidráulico. Para o acabamento da laje zero, existem mais 3 funcionários de uma empresa terceirizada que compareceram à obra somente nas datas de concretagem para fazer esse serviço que não foram contabilizados. Os carpinteiros que atuam na segurança do trabalho não estão contabilizados nas equipes.

A empresa que executou a laje protendida, considerou, para a mesma estrutura, caso fosse uma laje convencional, uma equipe que continha:

- a) 9 carpinteiros;
- b) 5 armadores;
- c) 2 pedreiros;
- d) 8 serventes;
- e) 2 encarregados.

Totalizando 26 funcionários, dados obtidos da empresa mostram que para uma laje convencional usualmente são utilizadas equipes compostas de profissionais e serventes, sendo utilizada uma equipe para cada função: fôrma, armadura e concretagem.

A obra de laje convencional utilizou uma equipe de uma empreiteira terceirizada que apresentou os seguintes membros:

- a) 19 carpinteiros;
- b) 8 armadores;
- c) 2 encarregados.

Totalizando 29 funcionários especializados, número coerente com a estimativa da empresa que executa a laje protendida que foi citada. Nessa obra, a mesma equipe executava a concretagem devido à falta de necessidade de um acabamento de piso, já que a obra não optou pelo sistema de laje zero, como já foi comentado anteriormente.

Uma vantagem significativa da laje lisa protendida foi à redução da equipe para um mesmo prazo, considerando o comparativo entre as duas obras.

5.3 COMPARATIVO DE CICLO DA LAJE

Foi comparado o planejamento e prazo considerando o ciclo programado das duas obras, como essa é uma variável que muda a cada pavimento. Considerou-se o ciclo ideal, ou seja, o planejado e a meta de cada obra. Também foi analisado o cumprimento real desse prazo através de dados fornecidos pelas obras.

Foi considerado um prazo de 8 dias para laje protendida, considerando o ciclo todo o tempo de execução, a partir do término de um pavimento até a concretagem do próximo. As atividades realizadas em cada dia em ambas as obras são descritas a seguir no quadro 2.

Deve-se esperar 48 horas para o rompimento dos corpos de prova para verificar se o concreto atingiu 20 MPa. Como já foi explicado, resistência necessária para poder fazer a protensão da laje. A protensão pode ser entre o primeiro, caso esse intervalo caia em um final de semana, e o terceiro dia do ciclo da próxima laje.

Os atrasos nos ciclos observados *in loco* na laje protendida ocorreram entre o primeiro e o quarto dia, sendo serviços como a protensão, devido a manutenção de equipamentos, os voos das mesas devido a condições climáticas – visto que as mesas não podem ser içadas com vento ou chuva – causas do atraso. Visto isso, depois da fôrma executada o ciclo se cumpre como programado.

Para laje convencional também foram consideradas atividades realizadas em 8 dias. Apesar das duas lajes apresentarem tamanho parecido e prazo equivalente, as atividades não foram as mesmas, visto as diferenças no processo executivo de cada, essa são descritas a seguir em cada dia do ciclo no quadro 2.

Quadro 2 – Descrição do Ciclo de Concretagem

	LAJE LISA PROTENDIDA	LAJE CONVENCIONAL
Dia 01	<ul style="list-style-type: none"> a) locação de pilares; b) instalação de colarinhos; c) desforma espelhos, colocação das cunhas e marcação dos cabos de protensão; d) montagem da armadura, já pré-montada, e fôrma dos pilares simples. 	<ul style="list-style-type: none"> a) instalação de colarinhos b) desforma dos pilares; c) montagem de armadura e fôrma dos pilares d) desforma de fundo de vigas e tiras de reescoramento, do último andar escorado.
Dia 02	<ul style="list-style-type: none"> a) concretagem dos pilares simples; b) armação e fôrma dos pilares do núcleo; c) passagem do cabo de aço para guarda-corpo da laje em questão, colocação dos postes para linha de vida da laje acima. 	<ul style="list-style-type: none"> a) desforma vigas da laje abaixo; b) fôrma das vigas da laje em questão; c) execução de 50% barroteamento.
Dia 03	<ul style="list-style-type: none"> a) protensão da laje anterior; b) concretagem dos pilares do núcleo. 	<ul style="list-style-type: none"> a) desforma do assoalho da laje abaixo; b) finalização do barroteamento; c) execução de 100% do assoalho da laje em questão; d) montagem de fôrma da escada.
Dia 04	<ul style="list-style-type: none"> a) voo das mesas, desforma da laje anterior e fôrma da laje em questão; b) colocação da fôrma de arremate entre as mesas. 	<ul style="list-style-type: none"> a) concretagem pilares e escada; b) início da execução de armadura positiva; c) marcação de pontos de instalações elétricas; d) início da execução de instalações hidráulicas; e) armação das vigas.

continuação

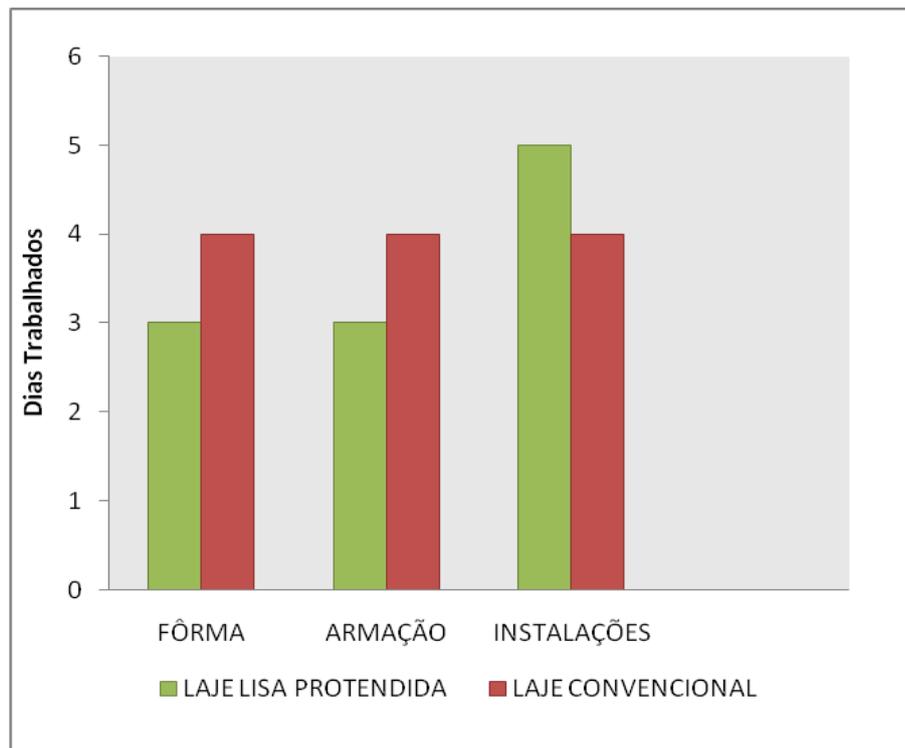
	LAJE LISA PROTENDIDA	LAJE CONVENCIONAL
Dia 05	<ul style="list-style-type: none"> a) instalação de espelhos e marcação de eixos de referência; b) armação positiva e armação de fretagem; c) instalações hidráulicas; d) marcação dos pontos das instalações elétricas. 	<ul style="list-style-type: none"> a) execução de armadura positiva; b) finalização das instalações hidráulicas; c) início da passagem de tubulação elétrica.
Dia 06	<ul style="list-style-type: none"> a) cordoalhas horizontais; b) instalações hidráulicas e passagem do gás; c) passagem da tubulação elétrica. 	<ul style="list-style-type: none"> a) finalização da passagem de tubulação elétrica; b) início da execução de armadura negativa; c) colocação da passagem do gás; d) execução de guarda-corpo para proteção de periferia.
Dia 07	<ul style="list-style-type: none"> a) cordoalhas verticais; b) armadura negativa; c) finalização da passagem de eletrodutos; d) limpeza da laje. 	<ul style="list-style-type: none"> a) alinhamento de vigas; b) nivelamento de fôrma; c) conclusão da armação negativa; d) limpeza da laje.
Dia 08	Concretagem.	Concretagem.

(fonte: elaborado pela autora)

Pode ser notado uma diferença significativa entre as tarefas e a ordem que elas foram executadas, como pode ser visto na figura 36, que ilustra a duração das principais atividade e na figura 37, que mostra o ciclo da laje mostrando as atividades de cada dia. Observou-se que a laje protendida não apresentou vantagens quanto ao prazo, o processo entre a protensão e o voo das mesas foi aquele no qual mais ocorreram atrasos. Sem a protensão ter sido feita, não foi possível fazer a desforma, e para isso acontecer, perde-se no mínimo três dias, que pode se prolongar caso tenha um atraso no rompimento dos corpos de prova, feitos por uma empresa terceirizada, ou problemas com equipamentos, como se observou na obra estudada. Como

pode-se observar na figura 36, as atividades de fôrma e armação foram executadas mais rapidamente na laje lisa, e as instalações demoraram um dia a mais devido a interferência com as cordoalhas, como já foi explicado anteriormente.

Figura 36 – Duração das atividades (dias)



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 37 – Ciclo de Concretagem

	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8
LAJE CONVENCIONAL	FÔRMA PILARES	FÔRMA VIGA	FÔRMA LAJE	CONCRETAGEM PILARES ARMAÇÃO VIGAS	ARMAÇÃO LAJE INSTALAÇÕES	ARMAÇÃO LAJE INSTALAÇÕES	ARMAÇÃO LAJE INSTALAÇÕES	CONCRETAGEM LAJE
	FÔRMA PILARES	FÔRMA VIGA	FÔRMA LAJE					
LAJE LISA PROTENDIDA	FÔRMA PILARES	CONCRETAGEM PILARES	PROTENSÃO DA LAJE ANTERIOR	FÔRMA LAJE E VIGA	ARMAÇÃO LAJE INSTALAÇÕES	ARMAÇÃO LAJE INSTALAÇÕES	ARMAÇÃO LAJE INSTALAÇÕES	CONCRETAGEM LAJE
	FÔRMA PILARES	CONCRETAGEM PILARES	PROTENSÃO DA LAJE ANTERIOR					

(fonte: elaborado pela autora)

5.4 ÍNDICES DE CONSUMO DE MATERIAIS E MÃO DE OBRA

O consumo de materiais e a produtividade observada em uma obra são fundamentais para o bom cumprimento do prazo e do orçamento. Foram analisados quantitativos, tempo de execução do ciclo de concretagem e número de funcionários das equipes, formando índices que mostram o desempenho das duas obras em relação ao consumo de materiais e mão de obra.

Para essa análise fez-se o levantamento de fôrma, armadura e concreto de uma laje, não considerando escadas e pilares. Também se considerou equipe que foi citada no capítulo anterior. Admitiu-se um turno trabalhado de 8,8 horas por dia e um total de 8 dias trabalhados para o ciclo de concretagem de uma laje para as duas obras.

Nas tabelas 3 e 4 pode-se observar as diferenças de consumo de matérias dos dois sistemas construtivos, sendo ilustrado pelas figuras 38 e 39. A laje lisa, como já era esperado, consumiu menos fôrma, devido a ausência de vigas, porém também consumiu menos aço, mesmo considerando um tipo de armadura a mais: as cordoalhas. Mesmo sem as vigas, não se notou diferença significativa entre a taxa de consumo de concreto, sendo equilibrado pela diferença de espessura das lajes. Sabe-se que a quantidade de materiais é uma característica de cada obra, porém esses dados são necessários para o cálculo dos índices de consumo, os quais podem ser aplicados em outras obras.

Tabela 3 –Consumo de Materiais por Pavimento

item	LAJE LISA PROTENDIDA	LAJE CONVENCIONAL
CONCRETO (m3)	93	101,68
AÇO (kg)	3355	7728
CORDOALHAS (kg)	2063	-
FÔRMA (m²)	580	906
ÁREA LAJE (m²)	537	523

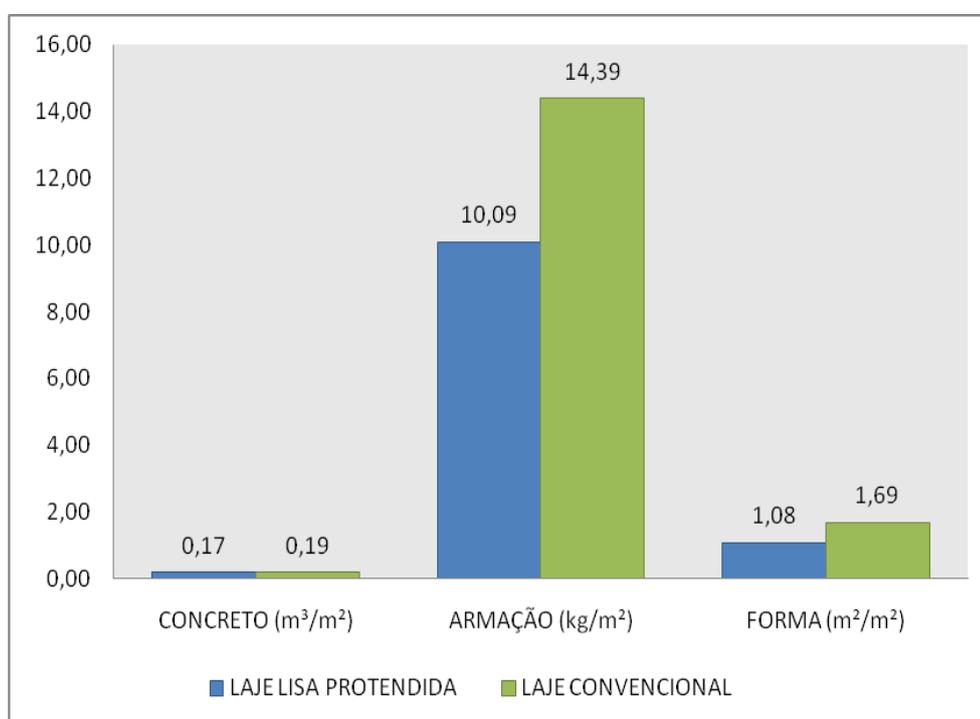
(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 4 – Índices de Consumo por Pavimento

item	LAJE LISA PROTENDIDA		LAJE CONVENCIONAL	
	consumo/m2	consumo/m3	consumo/m2	consumo/m3
CONCRETO (m3)	0,17	-	0,19	-
AÇO (kg)	6,25	35,84	14,39	76,00
CORDOALHAS (kg)	3,84	17,34	-	-
FÔRMA (m ²)	1,08	6,20	1,69	8,91

(fonte: elaborado pela autora)

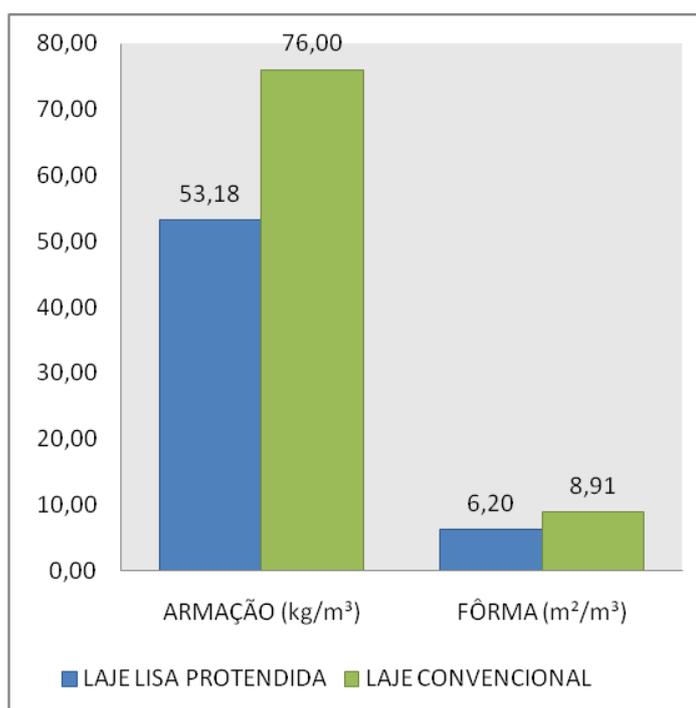
Figura 38 – Comparativo de Índices por Área de Laje



(fonte: elaborado pela autora)

Para obter-se o índice de produtividade, calculou-se o número de horas-homem total em 8 dias, considerando todo o ciclo de concretagem da laje, e 8,8 horas trabalhadas por dia, como foi citado anteriormente, e quantificou-se o tamanho da laje. Para a medição de produtividade, Souza (2000) define um índice denominado RUP, razão unitária de produção, que consiste na razão das entradas pelas saídas. Ou seja, nesse caso, são horas-homem por quantidade de serviço executado. A produtividade é inversamente proporcional ao RUP e nesse estudo mediu-se em quantidade de serviço por homens por dia.

Figura 39 – Comparativo de Índices por Volume de Concreto



(fonte: elaborado pela autora)

A tabela 5 mostra que a obra com protensão apresentou maior produtividade que o método convencional, notando-se que são necessárias menos horas trabalhadas para a conclusão do pavimento. Apesar de o prazo ter sido o mesmo, se houvesse um equivalência de equipes, a laje protendida seria executada mais rapidamente, ainda com algumas restrições, como os 3 dias necessários para a protensão e o tempo necessário para a equipe de instalações.

Tabela 5 – Produtividade da execução da Laje

	LAJE (m²)	EQUIPE (H)	HORAS DIA (H.h/dia)	CICLO (dia)	HORAS CICLO (H.h/ciclo)	RUP (H.h/m²)	PRODUTIVIDADE (m²/H/dia)
LAJE LISA PROTENDIDA	537	19	167,2	8	1337,6	2,49	3,53
LAJE CONVENCIONAL	523	29	255,2	8	2041,6	3,90	2,25

(fonte: elaborado pela autora)

Para verificar se o ganho na produtividade estava na etapa de fôrma ou de armação, calculou-se a produtividade para cada uma dessas, como mostra a tabela 6 e 7. Na laje protendida usou-se 3 armadores para armação passiva e 6 funcionários da equipe de carpintaria para colocação de cordoalhas. Além disso, toda a equipe, exceto os 3 armadores e o técnico, atua na montagem das mesas.

Nota-se que o grande diferencial no índice de horas gastas para executar a laje foi a quantidade de armadura por metro quadrado da laje e o sistema de fôrmas, visto que a tabela 6 e 7 mostram índices de produtividade de armação piores, mas equilibrando pelo consumo de material. É notório que a laje protendida apresentou esse índice maior devido à montagem das cordoalhas não ser uma tarefa simples e, além disso, adicionou 6 carpinteiros a essa tarefa. O índice positivo de produtividade de fôrma se deve a ausência de vigas e o sistema de mesas voadoras, como já era esperado.

Tabela 6 – Produtividade da Armação

	ARMAÇÃO (kg)	EQUIPE (H)	HORAS DIA (H.h/dia)	CICLO (dia)	HORAS CICLO (H.h/ciclo)	RUP (H.h/kg)	PRODUTIVIDADE (kg/H/dia)
LAJE LISA PROTENDIDA	5418	9	79,2	3	237,6	0,044	201
LAJE CONVENCIONAL	7728	8	70,4	4	281,6	0,036	242

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 7 – Produtividade da Fôrma

	FÔRMA (m ²)	EQUIPE (H)	HORAS DIA (H.h/dia)	CICLO (dia)	HORAS CICLO (H.h/ciclo)	RUP (H.h/m ²)	PRODUTIVIDADE (m ² /H/dia)
LAJE LISA PROTENDIDA	580	13	114,4	2	228,8	0,39	22,31
LAJE CONVENCIONAL	906	19	167,2	3	501,6	0,55	15,89

(fonte: elaborado pela autora)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do presente trabalho foi avaliar as vantagens e desvantagens de substituir o sistema convencional pelo de laje lisa protendida. Visto isso, foi feita uma revisão bibliográfica sobre concreto protendido e laje lisa para um embasamento teórico para o estudo. Também foi feito o acompanhamento de duas obras, uma de cada sistema, analisando individualmente, como um objetivo secundário, as etapas do processo executivo de um ciclo da laje. Para isso observou-se os funcionários e o prazo necessário para a conclusão desse ciclo.

Foi observado que, no processo executivo, a laje lisa protendida se destaca quanto ao consumo de materiais. A protensão minimiza a armadura passiva na laje, e devido à ausência de vigas tem-se ainda menos armadura e também menos fôrma. Notou-se também que foram gastas menos horas-homem para executar essa laje no mesmo prazo da laje convencional, 8 dias. Com esse levantamento, chegou-se a um índice de produtividade, que foi melhor na laje lisa. Foi visto que o fator determinante foi, de fato, a redução de materiais e também o sistema de fôrma de mesas voadoras que ao se analisar separadamente a execução de fôrma e armadura, a produtividade de execução de fôrma foi mais satisfatória. Apesar disso, nessa análise notou-se uma desvantagem: a armação apresentou uma menor produtividade devido ao sistema de cordoalhas.

Outro fato relevante foi que, ao reescorar um menor número de lajes e a ausência de faixas e vigas reescoradas, a laje lisa protendida utilizou menos escoras, nenhum jogo extra de vigas, além de uma desforma de 100% da laje, e uma obra mais limpa, resultando em menos resíduo. Os resíduos da construção civil são grande parte dos resíduos gerados em ambientes urbanos, e uma gestão de resíduos deve ser adotada para minimizar o impacto ambiental em todas as obras, logo essa redução na quantidade de fôrma de madeira auxilia nesse aspecto.

Ao se comparar os sistemas de segurança do trabalho, as mesas voadoras contemplaram itens a mais, que não foram observados na laje convencional, sendo uma desvantagem na laje protendida. Quanto ao prazo, esse ainda pode ser reduzido caso a mão de obra ficasse equivalente com a laje convencional, porém a necessidade de 3 dias para a protensão da laje não permitem que esse ciclo seja reduzido significativamente em relação a uma execução convencional.

Um dos principais desafios da construção civil está sendo a falta de mão de obra e o encarecimento dela, vê-se como tendência mundial, construções optarem por sistemas que a racionalizem, utilizando tecnologia e menos profissionais. Foi seguindo essa tendência que a obra estudada optou pelo sistema de laje lisa protendida que contemplou – devido à ausência de vigas – as mesas voadoras como sistema de fôrma. Por isso, a maior vantagem observada foi a redução de equipe.

Como pode ser observado no quadro 3, o sistema de laje lisa protendida apresenta tanto vantagens como desvantagens em relação ao sistema convencional, visto isso caso a obra não necessite de grandes vãos entre os pilares ou projetos diferenciados — fator diferencial da laje lisa— e a região disponha mão de obra suficiente, nem sempre o emprego desse sistema é aconselhado. Além disso, o sistema de mesas voadoras faz necessário o uso de grua, então, caso a obra seja executada em um terreno que não suporta a colocação de uma, não é viável esse tipo de sistema. Porém a laje lisa poderia ter sido executada com uma fôrma convencional ou com outro sistema de fôrmas, foi opção da empresa o uso da protensão aliado com as mesas para tentar obter o maior ganho possível.

Quadro 3 – Vantagens e Desvantagens Observadas

		LAJE CONVENCIONAL	LAJE LISA PROTENDIDA
ECONOMIA	MATERIAL	PIOR	MELHOR
	MÃO DE OBRA	PIOR	MELHOR
	PRAZO	IGUAL	IGUAL
PRODUTIVIDADE	FÔRMA	PIOR	MELHOR
	ARMAÇÃO	MELHOR	PIOR
	TOTAL	PIOR	MELHOR
PROCESSO EXECUTIVO	EQUIPAMENTOS	NÃO NECESSITA	MACACOS HIDRÁULICOS GRUA
	REESCORAMENTO E DESFORMA	4 PAVIMENTO VIGAS E FAIXAS REESCORADAS	3 PAVIMENTOS DESFORMA 100%
	FACILIDADE OU DIFICULDADE DE EXECUÇÃO	ETAPA DE FÔRMA E ARMAÇÃO DE VIGAS	EXECUÇÃO DAS CORDOALHAS EXECUÇÃO DA PROTENSÃO FACILIDADE DAS MESAS VOADORAS
	INSTALAÇÕES	SEM INTERFERÊNCIAS	INTERFERÊNCIA COM AS CORDOALHAS

(fonte: elaborado pela autora)

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7483**: cordoalhas de aço para concreto protendido – requisitos. Rio de Janeiro, 2008.

CAUDURO, E. L. **A protensão em edifícios sem vigas**: novas técnicas aumentam a qualidade e reduzem o custo total do edifício. [S. l.]: Belgo – Acelor Brasil, [1999]. Disponível em: <https://www.belgo.com.br/solucoes/artigos/pdf/protensao_edificios.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2013.

_____. **Manual para a Boa Execução de Estruturas Protendidas Usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas**. 2. ed. [S. l.]: Belgo – Acelor Brasil, [2002].

EMERICK, A. A. **Projeto e execução de lajes protendidas**. Brasília: [s. n.], 2002. Disponível em: <http://www.deecc.ufc.br/Download/TB812_Estruturas%20de%20Concreto%20Protendido/LP.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2013.

HANAI, J. B. de. **Fundamentos de Concreto Protendido**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/protendido/arquivos/cp_ebook_2005.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2013.

HENNRICHS, C. A. **Estudos sobre a modelagem de lajes planas em concreto armado**. 2003. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

LAZZARI, P. M. **Implementação de rotinas computacionais para o projeto automático de peças em concreto com protensão aderente e não aderente**. 2011. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MOURA, J. R. B. Recomendações para sistemas estruturais em edificações com a utilização de protensão com cordoalhas engraxadas. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002. p. 1-20. Disponível em: <http://www.impactoprotensao.com.br/downloads/area-do-estudante/item/download/56_421502528046c12083fb9c807bf72220>. Acesso em: 17 jun. 2013.

PEREIRA, J. L. S.; CARVALHO, R. G. de; LACERDA, I. G. de; ALVES NETO, E. S.; CUNHA, M. **Concreto protendido e lajes protendidas com monocordoalhas engraxadas**: noções gerais, solução estrutural e correta execução. [São Paulo]: Comunidade da Construção, 2005. Disponível em: <http://xa.yimg.com/kq/groups/2354326/788122937/name/Apostila_Curso_Concreto_Protendido.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2013.

PFEIL, W. **Concreto Protendido**: Introdução. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984. v. 1.van

SCHMID, M. T. **Lajes planas protendidas**. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Rudloff Sistema de Protensão Ltda., 2009. Publicação técnica n. 1.

SCHMID, M. R. L. Concreto protendido: por que protender uma estrutura de concreto? **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, v. 34, n. 45, p. 33-36, jan./fev./mar. 2007. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/130571024/Revista-Concreto-45>>. Acesso em: 4 maio 2013.

SOUZA, U. E. L. de. Como medir a produtividade da mão-de-obra na construção civil. VIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8. , 2000, Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2000. Disponível em: <<http://www.gerenciamento.ufba.br/Disciplinas/Produtividade/como%20medir%20produtividade%20-%20Entac.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2013

VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR JUNIOR, K. L. M. **Concreto Protendido**: fundamentos básicos. 4. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1998a. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/amacinrm/protendido/arquivos/CP1.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2013.

_____. **Concreto Protendido**: perdas na protensão. 4. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1998b. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/amacinrm/protendido/arquivos/CP2.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2013.