



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ANÁLISE DO SISTEMA CONSTRUTIVO DE EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS
PAVIMENTOS NO BRASIL EM LAJES LISAS COM CORDOALHAS
ENGRAXADAS**

HARLEN NUNES

SÃO CARLOS

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

ANÁLISE DO SISTEMA CONSTRUTIVO DE EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS NO BRASIL EM LAJES LISAS COM CORDOALHAS ENGRAXADAS

HARLEN NUNES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho.

SÃO CARLOS

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado do candidato Harlen Nunes, realizada em 10/04/2019:

Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho
UFSCar

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Prof. Dr. Márcio Minto Fabricio
USP

Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera
UFU

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo
UFG

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Rodrigo Gustavo Delalibera, Daniel de Lima Araújo e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho

" Em tudo o que você fizer, seja humilde. A humildade nos atrai à DEUS."

São Pio de Pietrelcina (1887-1968).

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me carrega em seu colo, em todos os meus dias, proporcionando momentos de alegria e dando forças nos momentos de provações.

Aos meus pais, Geraldo Nunes, meu exemplo, minha inspiração, meu herói e Maria José Silva Nunes, que me ensinaram todos os princípios para me tornar um homem de bem.

Ao meu sogro, Ivan Marquez e minha sogra Maria Iracema Rondon Marquez, sempre ao meu lado, em todos os momentos.

A minha esposa, Andrea Rondon Marquez Nunes, meus filhos, Lucas Rondon Nunes e Manuela Rondon Marquez Nunes, que me deram todo apoio, sendo os maiores incentivadores desse doutorado, com quem pude dividir os problemas e as alegrias. Sempre ao meu lado com irrestrito apoio.

Ao meu orientador, Professor Dr. Roberto Chust Carvalho, que apesar das minhas grandes dificuldades e limitações, sempre apoiou e incentivou nosso estudo. Nunca omitindo as dificuldades que estariam por vir ao longo do caminho. Além de um grande professor e profissional, é um grande homem, com humildade tão característica como seu intelecto. Agradeço não só pela paciência, mas também pelos ensinamentos e amizade.

Aos professores, André Luis Christoforo, Jasson, Márcio Minto, Paliari, Fernando Menezes, Fernando Portelina, Francisco Márcio, Guilherme Parsekian, Salvador Noboa, Ygor Dias, Daniel Forni, Winston Zumaeta, Luiz Cholfe, Luciana Bonilha, Evandro Porto Duarte. Serei eternamente grato pela contribuição.

Aos profissionais, Arq. Cláudio Roberto Além Almeida, Eng. Civil Roberto Poggetti Fernandes Gil, Eng^a. Civil Eliana Guadalupe e o Eng. Civil José Luiz Camarero Neto, pela importante contribuição para finalização desta tese.

Ao Ilmo Sr. Nelson Covas e meu eterno agradecimento à Cida Covas (*In memoriam*).

Agradeço as empresas Arcelor Mittal, Impacto Protensão, Evehx Protensão e à TQS Informática pelas informações cedidas.

A querida profissional desta respeitada instituição, Solange, que sempre nos apoiou e incentivou diante todas as adversidades inerentes a este trabalho.

À UFSCar, órgão que me deu a oportunidade para o aprofundamento nos conhecimentos de engenharia.

RESUMO

NUNES, H. **Análise do sistema construtivo de edifícios de múltiplos pavimentos no Brasil em lajes lisas com cordoalhas engraxadas.** 2019. 157 fl. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2019.

Este trabalho é um levantamento inédito sobre a análise do uso de sistema construtivo de concreto protendido com cordoalhas engraxadas em lajes lisas em edifícios de múltiplos pavimentos no Brasil, já de acordo com a nova norma NBR 6118:2014. É um estudo crítico com o foco de isenção do mercado sobre os processos de execução estrutural e o impacto que causam no custo da estrutura. Os estudos desenvolvidos até aqui, no aspecto estrutural, foram feitos com normas anteriores a esta, que considera a qualidade da estrutura e a durabilidade além das condições de segurança que são seguidas por todos os escritórios de projetos do país. Em relação ao estudo dos processos construtivos só há até então, estudos feitos por empresas envolvidas nos procedimentos e, portanto, possivelmente sem a isenção necessária para um julgamento crítico. Também os estudos feitos até então são extremamente estanques sem levantar detalhadamente e de forma simultânea o projeto (cálculo estrutural) e o custo da execução (processos e insumos). Há estudos em que apenas se estabelece índices de consumos de materiais, (concreto, aço e forma), outros que abordam o comportamento estrutural de laje maciça, nervurada treliçadas e nervuradas com cubas plásticas e o com o sistema estrutural convencional (constituído por lajes maciças e vigas) com o de lajes lisas, maciças ou nervuradas, e por fim um trabalho que estuda comparativamente os custos entre os sistemas estruturais convencionais e os sistemas estruturais de lajes nervuradas em concreto armado. Neste trabalho procura-se inicialmente entender as diferenças que existem quando se opta pela adoção do sistema de lajes lisas para edificações de múltiplos andares em detrimento do convencional. Assim, é analisada desde da fase do projeto estrutural (o que influencia na execução e quais os conhecimentos principais que devem ser agregados ao processo de detalhamento), a de execução, principalmente focando na questão de quantidade de serviço e por último quantificando o custo de um mesmo prédio executado na região de Ribeirão Preto considerando os sistemas convencional e o mesmo com laje protendida. Como parâmetro de análise para fazer estas simulações, foram feitos levantamentos de obras no país e na região de Ribeirão Preto, entrevistas entre atores participantes do processo e pesquisa bibliográfica. Pode-se concluir em que situações, mesmo de edificações usuais (vão médios, edificações com arquitetura em planta usual) este tipo de aplicação pode de forma econômica e sem muitas dificuldades técnicas ser aplicado em diversas regiões do país principalmente na de Ribeirão Preto.

Palavras-chave: Lajes lisas, cordoalha engraxada, prédios de múltiplos andares, processo construtivo, concreto protendido.

ABSTRACT

NUNES, H. **Analysis of the constructive system of multi - storey buildings in Brazil in flat slabs with greased corbels.** 2019. 157 pages. Thesis (PhD in Structures and Civil Construction) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2019.

This work is an unpublished survey on the analysis of the use of a prestressed concrete constructional system with greased corbels in smooth slabs in multi - storey buildings in Brazil, according to the new norm NBR 6118: 2014. It is a critical study with the focus of market exemption on the processes of structural execution and the impact they cause on the cost of the structure. The studies developed so far, in the structural aspect, were made with norms prior to this one, which considers the quality of the structure and the durability beyond the safety conditions that are followed by all the offices of projects of the country. In relation to the study of the constructive processes there are only until then, studies done by companies involved in the procedures and, therefore, possibly without the necessary exemption for a critical judgment. Also, the studies done so far are extremely watertight without raising the project (structural calculation) and the cost of execution (processes and inputs) in detail. There are studies in which only indices of materials (concrete, steel and shape) are established, others that deal with the structural behavior of massive slab, ribbed lattice and ribbed with plastic vats and the conventional structural system (consisting of massive slabs and beams) with that of plain, massive or ribbed slabs, and finally a study that studies comparatively the costs between conventional structural systems and the structural systems of ribbed slabs in reinforced concrete. In this paper we try to understand the differences that exist when one opts for the adoption of the system of flat slabs for multi-storey buildings in detriment to the conventional one. Thus, it is analyzed from the phase of the structural project (what influences the execution and what the main knowledge that must be added to the detailing process), the one of execution, mainly focusing on the question of quantity of service and finally quantifying the cost of a same building executed in the region of Ribeirão Preto considering the conventional systems and the same with prestress slab. As a parameter of analysis to make these simulations, surveys of works in the country and in the region of Ribeirão Preto, interviews between actors involved in the process and bibliographic research were done. It can be concluded that, even in the case of usual buildings (medium size, buildings with usual plant architecture), this type of application can economically and without many technical difficulties be applied in several regions of the country, especially in Ribeirão Preto.

Keywords: Smooth slabs, greased rope, multi-story buildings, construction process, prestressed concrete.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1-1- Execução do edifício estudado na tese.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 1-2 – Edifício estudado na tese.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2-1 - Exemplo de edifício com lajes com vigas em concreto armado.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2-2 - Exemplo de edifício com lajes e vigas em concreto armado.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2-3 – Seção transversal de laje pré-moldada tipo π.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2-4 – Seção transversal de laje pré-moldada tipo alveolar.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2-5 – Aplicação de laje pré-moldada tipo alveolar.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2-6 – Edifício alto na Bélgica em lajes alveolares com uso de grua de grande porte.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2-7 – Seção transversal de laje parcialmente pré moldadas tipo trilho.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2-8 – Seção transversal de laje parcialmente pré moldadas tipo treliça.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 2-9 – Amadura da nervura da laje tipo treliça.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 2-10 – Laje com vigotas protendidas.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2-11 – Esquema de pré-laje maciça de concreto.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2-12 – Lçamento de pré-laje maciça de concreto com uso de grua.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2-13 – Planta do prédio com laje com viga a ser calculado no capítulo 5.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2-14 – Laje maciça com corte, perspectiva esquemática e armação.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2-15 – Planta do prédio com laje sem viga a ser calculado no capítulo 5.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2-16 – Detalhes esquemáticos de pilares com e sem capitéis em laje maciça.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2-17 – Forma de pavimento em laje nervurada.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2-18 – Esquema de laje nervurada tipo cubeta.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2-19 – Laje lisa mista (lisa e nervurada) com elementos de laje treliçada.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2-20 – Pavimento de lajes nervuradas sem vigas.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2-21 – Pavimento de lajes nervuradas com vigas faixas.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2-22 - Construção de um pavimento em concreto protendido.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 2-23 - Núcleos rígidos e pórtico.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 2-24 - Núcleo rígido em planta com pilares-parede.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 2-25 - Núcleos rígidos em planta.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 2-26 - Sistema de contraventamento por núcleo rígido.</i>	<i>55</i>

<i>Figura 2-27 - Restrição ao empenamento do núcleo rígido.</i>	56
<i>Figura 3-1 - Viga de concreto protendido.</i>	61
<i>Figura 3-2 – Esquema simples de uma viga de concreto protendido.</i>	62
<i>Figura 3-3 - Cordoalhas engraxadas, seus detalhes.</i>	63
<i>Figura 3-4 - Cordoalhas engraxadas, seus detalhes.</i>	64
<i>Figura 3-5 - Cordoalhas engraxadas, seus detalhes</i>	64
<i>Figura 3-6 - Cordoalhas engraxadas, seus detalhes em laje e espaçadores sob cabos.</i>	65
<i>Figura 3-7 – Cadeirinhas modelo agarra cabos com alturas específicas já definidas.</i>	66
<i>Figura 3-8 - Cabos formam uma parábola.</i>	66
<i>Figura 3-9 - Exemplificação de protensão.</i>	67
<i>Figura 3-10 - Cordoalhas engraxadas CP-190 e CP-210.</i>	69
<i>Figura 3-11 - Especificações das cordoalhas engraxadas CP-190 e CP-210.</i>	70
<i>Figura 3-12 - Suporte regulável para posicionamento adequado de cabos engraxados.</i>	74
<i>Figura 4-1 - Projeto de formas (Vigas e Lajes maciças).</i>	94
<i>Figura 4-2 – Laje maciça protendida.</i>	95
<i>Figura 4-3 - Laje maciça protendida.</i>	95
<i>Figura 4-4 - Cabo curvo em trecho central de uma laje.</i>	100
<i>Figura 4-5 - Forças equivalentes do cabo da figura 4-4.</i>	100
<i>Figura 4-6 - Diagramas de momentos fletores.</i>	101
<i>Figura 4-7 - Modelo básico de uma RTE e uma RPU no programa TQS.</i>	103
<i>Figura 4-8- Modelo 3D, deformações apresentadas pelo programa (deslocamentos das lajes), laje do edifício estudado no capítulo 5.</i>	104
<i>Figura 5-1 - Arquitetura de um apartamento dos modelos estudad</i>	108
<i>Figura 5-2 – Execução da estrutura do edifício estudado.</i>	109
<i>Figura 5-3 - Execução do edifício estudado, formas lajes e vigas.</i>	110
<i>Figura 5-4 - Execução da estrutura da fachada.</i>	110
<i>Figura 5-5 - Valores do coeficiente de vento utilizado.</i>	111
<i>Figura 5-6 - Planta de formas situação 1, concreto armado, lajes, vigas na configuração original.</i>	112
<i>Figura 5-7 - Imagem 3D da estrutura com as geometrias conforme o projeto original.</i>	113

<i>Figura 5-8 - Planta de forma situação 2, concreto protendido, lajes lisas, geometria e número de pilares conforme projeto original.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 5-9 - Imagem 3D da estrutura com as geometrias conforme o projeto original com lajes lisas protendidas.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 5-10 - Planta de formas situação 3, concreto protendido, lajes lisas, geometria e número de pilares reduzidos.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 5-11 - Imagem 3D da estrutura com as geometrias em concreto protendido, lajes lisas, geometria e número de pilares diferentes do projeto original.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 5-12 - Grelha com os deslocamentos no ELU, situação 1.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 5-13 - Parâmetros de estabilidade global ELU de pilares situação 1.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 5-14 - Grelha com os deslocamentos no ELU, situação 2.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 5-15 - Parâmetros de estabilidade global ELU de pilares situação 2.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 5-16 - Grelha com os deslocamentos no ELU, situação 3.</i>	<i>125</i>
<i>Figura 5-17 - Parâmetros de estabilidade global ELU de pilares situação 3.</i>	<i>126</i>
<i>Figura 5-18 - Disposição das cordoalhas no pavimento tipo situação 3 em 3D.</i>	<i>127</i>
<i>Figura 5-19 - Disposição das cordoalhas no pavimento tipo situação 3 em planta.</i>	<i>128</i>
<i>Figura 5-20 - Disposição dos momentos fletores e cabos na RPU 34.</i>	<i>129</i>
<i>Figura 5-21 - Disposição das tensões e cabos na RPU 34.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 5-22 - Disposição do controle total das fissurações na RPU 34.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 5-23 - Comparação dos parâmetros de estabilidade global para as situações 1,2 e 3.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 5-24 - Dados das geometrias dos pilares e sua área para a situação 1 e 2.</i>	<i>133</i>
<i>Figura 5-25- Dados das geometrias dos pilares e sua área para a situação 3.</i>	<i>134</i>
<i>Figura 5-26 - Comparação de área de forma de pilares nas situações 1,2, e 3.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 5-27 – Foto do edifício em perspectiva.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 5-28 - Traçado típico de um cabo de protensão vista de perfil.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 5-29 - Traçado típico de um cabo de protensão vista longitudinal.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 5-30 - Feixe de três cordoalhas.</i>	<i>139</i>
<i>Figura 5-31 - Distribuição cordoalhas modelo hipotético.</i>	<i>141</i>

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 4-1 - Planilha de custos CA.</i>	96
<i>Quadro 4-2 - Planilha de custos CP.</i>	96
<i>Quadro 4-3 - Planilha de custos.</i>	97
<i>Quadro 5-1 - Limite para deslocamento pela NBR 6118:2014.</i>	106
<i>Quadro 5-2 - Deslocamentos máximos pela NBR 9062.</i>	107
<i>Quadro 5-3 - Parâmetros de estabilidade situação 01.</i>	120
<i>Quadro 5-4 - Parâmetros de estabilidade situação 02.</i>	123
<i>Quadro 5-5 - Parâmetros de estabilidade situação 03.</i>	126
<i>Quadro 5-6 - Tabela orçamentária do edifício estudado.</i>	136
<i>Quadro 5-7 - Quadro de custos Concreto Armado (CA).</i>	145
<i>Quadro 5-9 - Quadro de custos Concreto Protendido (CP).</i>	146
<i>Quadro 5-10 - Quadro de custos CP x CA.</i>	147

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA	17
1.2	JUSTIFICATIVAS.....	18
1.2.1	A importância da construção civil no PIB brasileiro	19
1.2.2	A construção civil de prédios residenciais	23
1.2.3	A construção de edifícios residenciais na região de Ribeirão Preto x regiões em construção de edifícios em concreto protendido	28
1.3	METODOLOGIA	29
1.3.1	Pesquisa Bibliográfica	29
1.3.2	Prescrições Normativas	29
1.3.3	Análise de dados obtidos no canteiro de obras	30
1.3.4	Entrevistas	30
1.3.5	Projeto	30
1.3.6	Análises e conclusões	31
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PAVIMENTOS EM LAJES DE CONCRETO	32
2.1	SISTEMA CONSTRUTIVO DE PAVIMENTO COM LAJE MACIÇA E VIGAS EM CONCRETO ARMADO OU SISTEMA CONVECCIONAL.....	33
2.2	TIPOS DA LAJES DE CONCRETO	34
2.2.1	Lajes pré-moldadas (em concreto armado e protendido), sendo laje duplo π e alveolar	35
2.2.2	Lajes parcialmente pré-moldadas, lajes tipo trilho (armado ou protendida) treliçadas e pré-laje	38
2.2.3	Lajes moldada no local, sendo maciças com vigas	41
2.2.4	Lajes moldada no local, sendo maciças sem vigas	45
2.2.5	Lajes moldada no local, sendo maciças sem vigas nervuradas (uni e bidirecionais) e mistas (lisas com capiteis e vigas faixa)	47
2.3	DESVANTAGENS ESTRUTURUAIS DE LAJES LISAS PROTENDIDAS	52
2.4	ESTABILIDADE LATERAL DE PRÉDIOS COM LAJES LISAS	53
2.4.1	Uso de modelos tridimensionais que consideram o efeito de laje o contraventamento da estrutura	54

3	PAVIMENTOS DE LAJES LISAS COM CORDOALHAS ENGRAXADAS E PERCEPÇÃO DOS ENGENHEIROS DE CÁLCULO ESTRUTURAL, CONSTRUTORAS E ACADÊMICOS DIANTE DESTE SISTEMA.....	57
3.1	CONCEITOS ESPECÍFICOS DA PROTENSÃO	57
3.2	O CONCRETO ESTRUTURAL	60
3.3	CORDOALHAS ENGRAXADAS.....	63
3.4	ABORDAGEM BÁSICA DE CÁLCULO	66
3.4.1	Perdas de tensões.....	67
3.5	TIPOS DE CORDOALHAS ENGRAXADAS	68
3.6	PERCEPÇÃO DOS ENGENHEIROS DE CÁLCULO ESTRUTURAL, CONSTRUTORAS E ACADÊMICOS DIANTE O SISTEMA DE CONCRETO PROTENDIDO COM CORDOALHAS ENGRAXADAS.....	70
3.6.1	Análise dos dados obtidos com as entrevistas com os engenheiros de cálculo estrutural	81
3.6.2	Análise dos dados obtidos com as construtoras	89
4	AVALIAÇÃO DO CUSTO DE UM MESMO PAVIMENTO CONVENCIONAL EM CONCRETO ARMADO E COM CORDOALHAS ENGRAXADAS. CRITÉRIOS INICIAIS PARA O USO DO PROGRAMA CAD/TQS	93
4.1	INTRODUÇÃO	93
4.2	AVALIAÇÃO DO CUSTO DE UM PAVIMENTO NO SISTEMA CONVENCIONAL E COM PROTENSÃO EM CORDOALHA ENGRAXADA.....	93
4.2.1	Planta de formas.....	94
4.2.2	Custos	96
4.3	CONCEITOS INICIAIS DO CAD/TQS DE LAJES PROTENDIDAS	98
4.3.1	Cálculo estrutural da edificação com o cad/tqs	98
4.3.2	Módulo de laje protendida.....	99
4.3.3	Aplicação da protensão na laje protendida	100
4.3.3.1	Perdas e traçado do cabo	102
4.3.3.2	Definição de regiões de protensão uniforme (RPU) e regiões de transferência de esforços (RTE)	102
4.3.3.3	Número de cabos nas diversas regiões da laje	103
4.3.3.4	Verificações.....	103
5	EDIFÍCIO EM LAJE LISA TRADICIONAL E PROTENDIDA	105
5.1	COEFICIENTE GAMA Z.....	105
5.2	COEFICIENTE FAVT	107
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO MODELO EM ESTUDO.....	107
5.4	PROCEDIMENTO GERAL.....	110

5.4.1	Resultados obtidos com o cálculo estrutural parametrizado pelos deslocamentos	118
5.5	VALOR DA EDIFICAÇÃO EM CONCRETO ARMADO TRADICIONAL	135
5.6	TRAÇADO DOS CABOS.....	137
5.7	PROTENSÃO DE LAJES.....	138
5.8	MODIFICAÇÕES DAS SEÇÕES DO EDIFÍCIO EM CP	139
5.9	DISTRIBUIÇÃO DAS CORDOALHAS.....	140
5.10	COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE OS SISTEMAS PROPOSTOS	142
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

1 INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento do mercado e conseqüentemente a competição acirrada faz com que uma empresa vá buscar novas ferramentas que lhe garanta uma evolução técnica e qualitativa, pois não pode perder seu lugar diante o mercado. Na indústria da construção civil não é diferente, tanto para construtora, quanto para seus respectivos fornecedores (projetos, materiais e mão de obra). Mas, não obstante diante esta competição, existe muita resistência no que tange a qualquer tecnologia nova. Na construção civil, aparentemente, diferente de outros segmentos de transformação, dá-se a preferência a sistemas já empregados. Como exemplo na indústria automobilística ocorrem mudanças de processos, modelos de carros em pouco tempo, sendo que a boa qualidade é sempre perseguida e alcançada. É preciso notar neste caso que tanto na parte de projeto, como na execução há um aprimoramento de treinamento permitindo que os processos sejam implantados mais rapidamente, diferentemente da construção civil em que o treinamento é quase que obtido pela repetição.

A técnica e o uso maciço da protensão com cordoalhas engraxadas são relativamente recentes (quando se pensa em construção civil), originada nos Estados Unidos a partir da de 1950.

Ultimamente percebe-se uma grande divisão de soluções estruturais em partes diferentes do país. No nordeste brasileiro há um uso muito grande de sistemas de pavimentos em lajes lisas protendidos em uso nas edificações de múltiplos andares com protensão de cordoalhas engraxadas, enquanto na região sudeste nem tanto.

Prova disto é que a empresa líder do segmento de mão de obra para a protensão destas lajes, está localizada na cidade de Fortaleza. É importante salientar que esta empresa, já em 2018 atuando em todo nordeste havia empregado mais de 13.000 toneladas de cordoalhas em obras espalhadas em diversas cidades, principalmente em edificações de múltiplos andares. Para chegar neste ponto capacitou seus engenheiros nos Estados Unidos, onde os mesmos especializaram-se no sistema de protensão não aderente usando cordoalhas engraxadas, através de parceria com empresa da área situada em São Francisco ADAPT - Structural Engineering Consultants – CA. O treinamento e suporte foi dado, entre outros, através

de seu representante, o engenheiro Bijan Aalami, professor de engenharia estrutural da São Francisco State University, considerado a maior autoridade do mundo no conhecimento da tecnologia de cordoalha engraxada. Esta empresa também desenvolve programas de computador que auxiliam o cálculo e detalhamento de lajes protendidas como o ADAPT-PT/RC (2018) e o mais recentemente ADAPT-FLOOR PRO (2018). Estes programas são essenciais para o detalhamento de pavimentos com lajes lisas protendidas pois além de obter o cálculo dos esforços de protensão, podem, de maneira automática fazer o detalhamento da armadura de protensão tanto como a da armadura passiva. Há programas de análise que calculam o efeito da protensão, mas não fazem o detalhamento da armadura inviabilizando a utilização econômica dos mesmos em desenvolvimento de projetos.

Com o intuito de expandir no Brasil esta técnica a empresa Brasileira em parceria com a indústria fabricante de aços de protensão no Brasil, divulga para todo país esta técnica, por meio de cursos oferecidos ao meio técnico.

Ainda no Brasil a empresa TQS Informática (2018), comandada pelo Engenheiro Nelson Covas, vem desenvolvendo programas para detalhamento e dimensionamento de estruturas para construção civil, também possui papel muito importante no desenvolvimento da técnica de concreto protendido, pois em seus programas através de uma plataforma amigável e tecnicamente respeitada em todo mundo, também possui o módulo de cálculo em concreto protendido, o que facilita a interação dos profissionais da área, haja vista que a maioria dos engenheiros de cálculo estrutural do Brasil utilizam os programas TQS (2018). A grande vantagem deste programa Brasileiro é que ele é integrado totalmente a outros módulos e permite ao engenheiro de cálculo estrutural projetar em um só ambiente a edificação como um todo, desde a fundação até a laje protendida.

Este trabalho procura fazer uma análise crítica para tentar entender o porquê da não utilização deste sistema nas regiões do país onde os índices de construções verticais são uns dos maiores do país, bem como estão concentrados os maiores índices do produto interno bruto do país (PIB). Ao mesmo tempo apontar as possíveis falhas ou ausências de considerações que proporcionariam uma economia de tempo, material e mão de obra, ou simplesmente prescrições que assegurariam a qualidade final da estrutura utilizando-se do sistema de pavimentos sem vigas protendidos em de edificações de múltiplos andares.

A maneira de fazer esta análise é a de usar os conhecimentos teóricos acumulados sobre os materiais e comportamento estrutural referindo-se sempre que possível às Normas Brasileiras respectivas como a norma NBR 6118:2014, NBR 7483:1990, NBR 7484:1989 etc.

Aborda-se no trabalho a questão da execução do sistema, na tentativa de verificar as possíveis vantagens ao usá-lo nas edificações de múltiplos andares.

Utiliza-se neste trabalho modelos de projetos já executados, analisados e amplamente demonstrados em diversas literaturas, bem como um modelo de um edifício que já fora executado na cidade de Ribeirão Preto no estado de São Paulo.

Para este edifício, cujo projeto original estrutural realizado em concreto armado com uso de lajes e vigas foi feito todo um projeto estrutural e detalhamento alternativo utilizando o programa CAD TQS V.20 (2018), considerando a estrutura com pavimentos de concreto protendido em cordoalhas engraxadas e lajes lisas. A comparação destas duas soluções é uma das facetas que garante a originalidade deste trabalho.

Os dados obtidos entre os dois modelos de projetos, em concreto armado e concreto protendido, são analisados e criticados para que se possa ter uma ideia de suas diferenças, alcançando de forma mais palpável, pois a obra em concreto armado foi construída com autor deste trabalho, sendo o gerente e responsável técnico pela execução. Acredita-se assim que isto torna mais fácil apresentar as conclusões aos profissionais que atuam fora do âmbito somente acadêmico.

Pretende-se ao final, colaborar para tomada de decisões de construtoras em optar na escolha do sistema estrutural de suas edificações, desde que sejam de múltiplos pavimentos.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho visa contribuir se o sistema de lajes lisas com cordoalhas engraxadas pode ser usado em pavimentos de edificações de múltiplos andares apresenta com vantagens de custo e manter o mesmo ou desempenho ou melhor que o sistema convencional com lajes maciças e vigas em concreto armado. Como objetivos secundários busca-se

- Analisar a eficiência do sistema de laje lisa com cordoalha engraxada;
- Analisar a velocidade de execução dos pavimentos;

- Estudar se há diminuição do trabalho a ser realizado na execução;
- Criar um texto que reúna informações atuais sobre o sistema e possa possibilitar que um empreendedor se decida com mais segurança sobre o sistema considerado.
- Confrontar as informações acadêmicas com dados do mercado;
- Perscrutar quais são as razões da pouca utilização de edificações de múltiplos andares com laje lisa e cordoalha engraxada na região de Ribeirão-Preto.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Pode-se demonstrar conforme AVILLA JUNIOR e FIGUEREDO FILHO (2010) que existem vantagens nesse sistema, porém, não significa afirmar que todas as estruturas feitas em concreto armado não apresentam boas características e muitas vantagens também. Se isto não fosse fato as obras em concreto não seriam a maioria das obras realizadas no Brasil. Deseja-se assim, mostrar que as estruturas em concreto protendido com cordoalhas engraxadas, que em algumas situações possuem sabidamente vantagens, como por exemplo em vãos de aproximadamente de dez a vinte metros, e em situações que a flecha limite seja ultrapassada (vão/250) podem ser ainda vantajosas em outras situações como a do prédio usado como modelo neste trabalho.

As possíveis vantagens citadas por FIGUEIREDO FILHO (1989), podem variar de projeto para projeto das quais podemos elencar algumas:

- a) Adaptabilidade a diversas formas ambientais;
- b) Simplificação das fôrmas, armaduras e concretagem;
- c) Diminuição de Revestimentos;
- d) Redução do consumo de materiais e de mão-de-obra;
- e) Redução da altura total do edifício;
- f) Simplificação das instalações;
- g) Melhoria das condições de habitabilidade;
- h) Redução do tempo de execução da obra.

Ainda pode-se citar a vantagem do ponto de vista arquitetônico, tendo em vista a facilidade de se obter tetos planos, desta forma traz para os arquitetos e clientes à

terem uma grande liberdade de disposições de cômodos para poderem explorar, que com certeza é um diferencial muito importante na venda de imóveis, haja vista, que em um mesmo empreendimento pode atender as diversas necessidades de cada morador/investidor.

O estudo trata então dos possíveis pontos positivos do sistema e dos porquês da não utilização deste sistema na região de Ribeirão Preto.

1.2.1 A importância da construção civil no PIB brasileiro

É de grande valia este trabalho, no que tange na determinação do custo total da edificação, além do contexto técnico, pois tudo depende da venda de um imóvel, e a grande competição de mercado obriga uma empresa evoluir para não perder espaço no mercado imobiliário. Este tema se torna muito relevante em uma economia que caminha para um sentido nunca visto antes neste país, onde a produtividade e economia são levadas como principal quesito como ponto de partida para viabilidade de um empreendimento, ou seja, construir com base na tríade: produtividade, economia e qualidade, ainda mais com tanta tecnologia disponível pronta para ser inserida neste mercado.

A indústria da construção civil é muito representativa em uma economia que cresce muito em relação ao PIB.

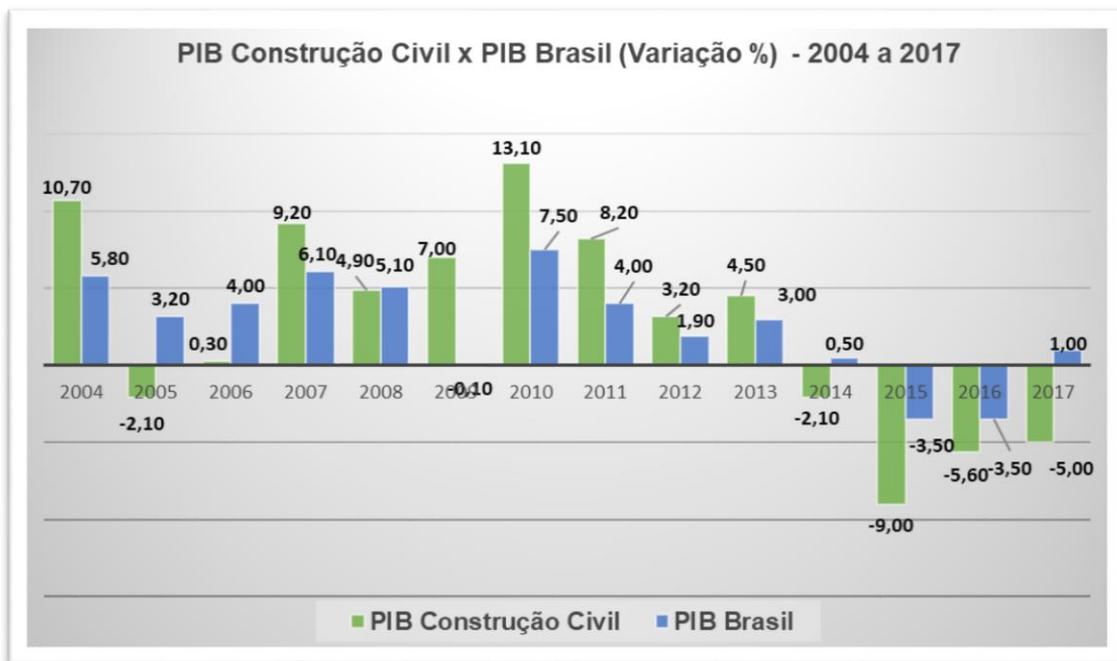
Em 2017, o PIB cresceu 1,0% em relação a 2016, de acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção CBIC (2018). Essa alta é resultado da expansão de 0,9% do valor adicionado a preços básicos e de 1,3% nos Impostos sobre produtos líquidos de subsídios. Entre as atividades que compõem os serviços, o comércio cresceu 1,8%, seguido por atividades imobiliárias (1,1%)

O PIB per capita teve avanço de 0,2% em termos reais. O PIB per capita é definido como a divisão do valor corrente do PIB pela população residente no meio do ano. – PIB (gráfico 1-1), dados obtidos em 2018.

Para se ter uma base histórica, no ano de 1999, a indústria da construção civil respondeu por 10,26% do PIB, enquanto a agropecuária teve participação de 8,42%, a indústria extrativa e de transformação respondeu por 23,69% e todos os serviços, inclusive financeiros, corresponderam a 62,80% do PIB. Pode-se observar então, que a construção civil ainda possui grande potencial na economia nacional, daí a importância de estudos detalhadas serem feitos na área.

De acordo com as informações obtidas por meio da Câmara Brasileira da Indústria da Construção CBIC (2018) descritas a seguir, os dados desagregados sobre a participação dos subsetores da construção civil na economia nacional sejam precários, indicam que neste estado a indústria de transformação participou com 93,1% do valor adicionado pela indústria, enquanto a indústria da construção respondeu por 6,9% divididos da seguinte forma, 3,1% pelas atividades de construção pesada, 2,6% pela construção de edificações e, 1,2% pelas empresas de instalações e acabamentos, que em geral participam como subempreiteiras das empresas de construção de edifícios. No gráfico 1-1 podemos observar a evolução da participação relativa da construção civil no PIB brasileiro.

Gráfico 1-1 - Evolução da participação relativa da construção civil no PIB brasileiro.



Fonte: CBICDADOS (2018).

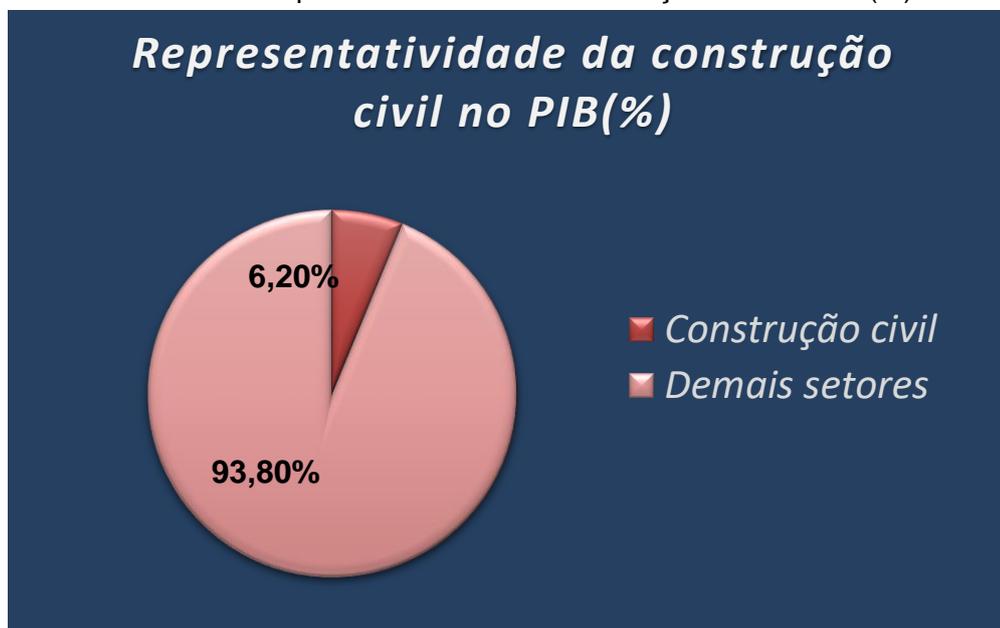
O setor se destaca como atividade intensiva em mão-de-obra, demandando muitos empregos de baixa qualificação, que atendem às camadas menos instruídas e mais carentes da sociedade.

A construção civil ocupa uma posição estratégica na geração de empregos, uma vez que a criação de um posto de trabalho na construção demanda reduzidos investimentos, quando comparada à criação de emprego nas indústrias mais intensivas em capital.

Outra característica importante do setor da construção é que a grande maioria das matérias-primas e dos insumos demandados são disponíveis e produzidos no país, o que faz com que a atividade econômica gerada no setor tenha pouco impacto nas importações brasileiras.

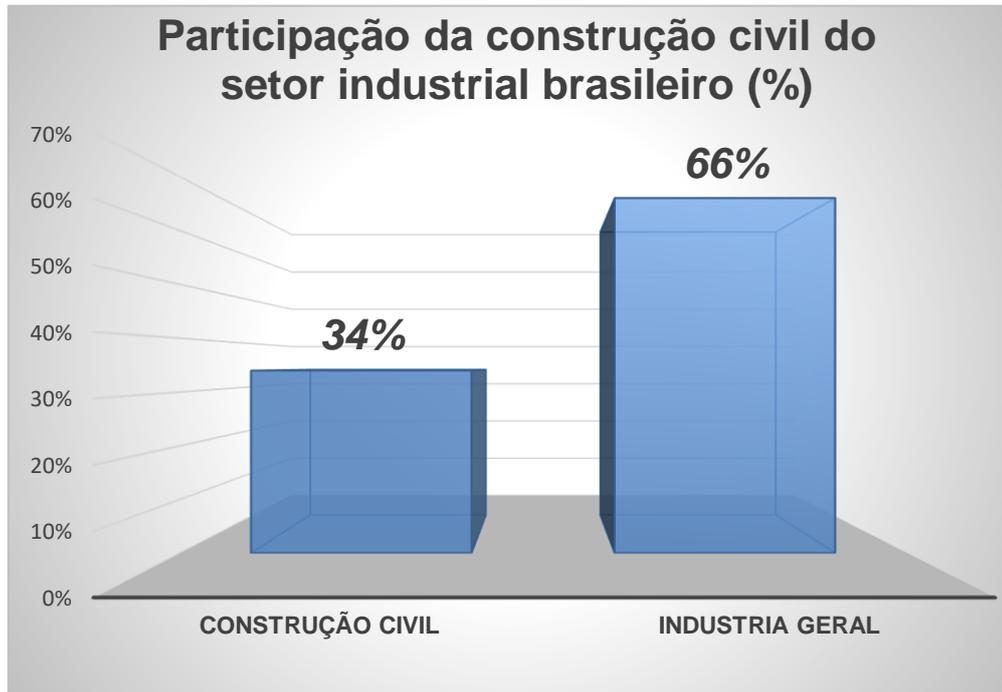
Em estudos realizados pelo IBGE, descritos por ACMA Construções Cíveis Ltda (2018), mostra-se que a construção civil é responsável por 6,2% do PIB do país, o mercado de construção civil representa 34% do total da indústria brasileira, conforme mostrado em gráfico 1-2 e 1-3 a seguir.

Gráfico 1-2 - Representatividade da construção civil no PIB (%).



Fonte: Adaptado, ACMA Construções Cíveis Ltda (2018).

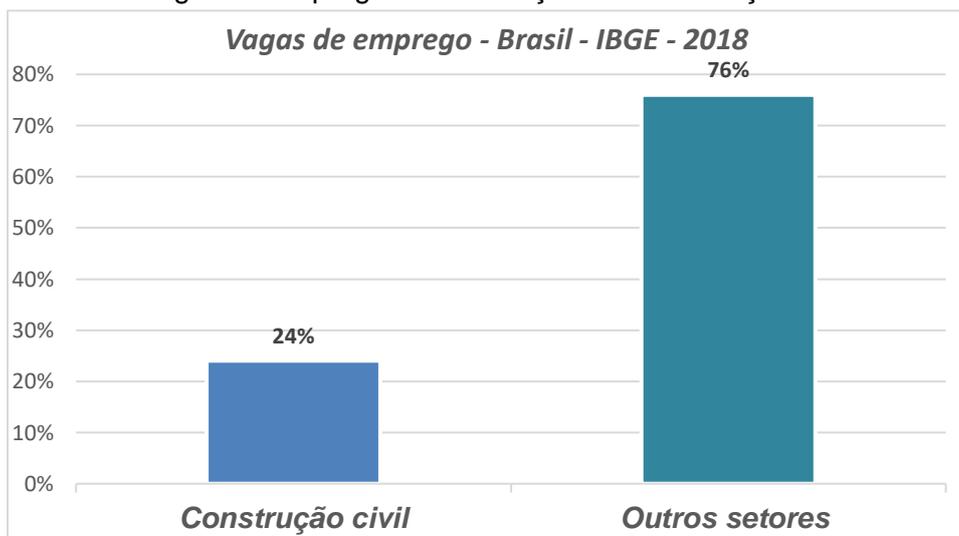
Gráfico 1-3 - Participação da construção civil do setor industrial brasileiro (%).



Fonte: Adaptado, ACMA Construções Civas Ltda (2018).

Em números absolutos, incluindo empresas e filiais, a construção civil no Brasil conta com 176 mil estabelecimentos, e gera 24% do total de vagas no país, como mostrado no gráfico 1-4 que segue.

Gráfico 1-4 - Vagas de emprego na construção civil em relação aos outros setores (%).

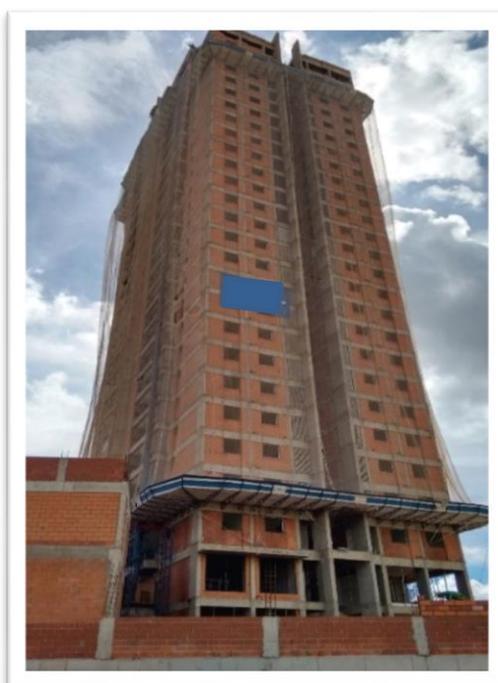


Fonte: Adaptado, ACMA Construções Civas Ltda (2018).

1.2.2 A construção civil de prédios residenciais

A construção de edifícios é a área com maior potencial na geração de riqueza no segmento da construção civil, possuindo um valor agregado muito relevante (R\$ 74 bilhões), seguido por obras de infraestrutura (R\$ 65 bilhões), e serviços especializados (39,4 bilhões). Estes dados nos dão a percepção do grande mercado e necessidade que a região de Ribeirão Preto bem como o interior do estado de São Paulo, necessita de um trabalho que mostre que o concreto protendido pode e deve ser utilizado como ferramenta para impulsionar o setor, com geração de menores custos e em uma visão mais complexa acadêmica e técnica um grande passo para qualidade, haja vista que tal região possui uma grande vocação para verticalização das edificações, como os grandes centros urbanos de maior relevância nacional, tais como as cidades de Campinas, São Paulo, Fortaleza, Vitória, Rio de Janeiro, Curitiba etc. Pode-se considerar a construção civil como um termômetro da economia. Seguem figuras 1-1 e 1-2 que demonstram um empreendimento típico das maiores construtoras da região de Ribeirão Preto, executado em concreto armado. As figuras dão uma ideia do vulto dos edifícios, bem como anteriormente citado sobre a vocação da região para verticalização das edificações.

Figura 1-1- Execução do edifício estudado na tese.



Fonte: próprio autor.

Figura 1-2 – Edifício estudado na tese.



Fonte: próprio autor.

Na figura 1-3 pode-se ver um trecho da cidade de Ribeirão Preto em que há um grande número de prédios residenciais nas características dos anteriores e todos muito próximos, mostrando ser essa uma tendência do desenvolvimento urbano da cidade.

Figura 1-3 - Foto Avenida João Fiusa – Ribeirão Preto – SP.



Fonte: <http://www.hugoengenharia.com.br/empreendimento/fiusa-one>

O valor agregado de riquezas geradas pelo setor de edifícios dentro da construção civil pode ser melhor entendido no gráfico 1-5 na sequência.

Gráfico 1-5 - Valor agregado para economia na construção civil em relação à setores.



Fonte: Adaptado, ACMA Construções Civis Ltda (2018).

Observa-se que quando a construção civil está bem, o Brasil está bem. Aproximadamente 13 milhões de brasileiros trabalham no setor, direta ou indiretamente, estes dados são muito relevantes nos dias de hoje (2019) em que o desemprego geral do Brasil gera em torno de aproximadamente este valor, ou seja, o desemprego atualmente em nosso país é de 13,689 milhões aproximadamente, conforme o IBGE (2018), como pode ser visto na Gráfico 1-6.

Gráfico 1-6 - Número de desempregados no Brasil, em números absolutos, 2015 a 2018.



Fonte: IBGE (2018).

E após quase três anos de quedas, em julho de 2017 as contratações em carteira assinada superaram o número de demissões, de acordo com o Ministério do Trabalho (MTB). Essa retomada representa o início de um novo ciclo virtuoso. Os

investimentos na construção civil impulsionam o desenvolvimento urbano, diminuem o déficit habitacional, ampliam o saneamento básico e melhoram as condições de saúde.

À medida que as pessoas voltam ao trabalho, as famílias recuperam a capacidade de consumo, aumentam as vendas no comércio e a demanda na indústria. E para o governo o retorno também é grande: A cada R\$ 100,00 investidos na construção civil, R\$ 25,00 voltam em impostos para os cofres públicos.

Desta maneira não podemos deixar que avanços e novas tecnologias parem diante uma indústria que gera tanta riqueza e desenvolvimento para o país e para o cidadão, então, diante estes argumentos precisamos evoluir, pois, rapidez, versatilidade nas aplicações ou que ainda proporcionem um aumento na relação custo-benefício contribuem para tecnologias como a de concreto protendido tenha um enorme mercado para atingir.

Ressalta-se que nessa busca, ao contrário do que ocorreu em tempos passados, a preocupação com a qualidade e durabilidade das construções tem sido maior pelo menos em teoria, conforme mesmo a NBR 15575:2013, pois, esta norma define parâmetros técnicos para quesitos como acústica, durabilidade, manutenção e transmitância térmica, conceitos que antes da norma não eram definidos e nem passíveis de serem medidos ou comparados à um padrão.

O concreto pré-moldado, concreto protendido ou concreto armado, cada sistema estrutural tem suas vantagens e suas desvantagens quando atuam de forma independente. A forma de fabricação, montagem, manutenção e reparos envolvidos são determinantes em muitas etapas ao longo da vida útil da edificação. O custo destas etapas, porém, são muito variáveis conforme sistema escolhido. A escolha mais adequada depende de muitos fatores, tal como local a ser fabricado (influencia principalmente na escolha dos materiais e equipamentos disponíveis).

Hoje em dia a preocupação das empresas construtoras em orientar os engenheiros de como deve ser feito uma análise crítica, científica e normativa na forma de executar as estruturas é quase inexistente, exigindo muito mais de um engenheiro uma administração bem-feita do que aplicação de novos conceitos técnicos na execução de estrutura, mais um fato então que justifica este trabalho como uma maneira de tentar contribuir como orientação confiável para as construtoras.

Desta forma busca-se então conseguir mais flexibilidade e dinamismo da arquitetura e do momento de produção dos projetos deste sistema. Segundo afirmado por LOUREIRO (2006), as lajes lisas protendidas permitem o uso de pés direito menores, resultando numa menor altura total do edifício, ou num maior número de pavimentos, também afirma que, permite grande flexibilização na utilização dos espaços e o menor número de pilares, podendo assim aumentar o número de vagas de garagens. Vale lembrar que esta situação é para lajes maciças, que também podem ser observadas ao longo do trabalho.

Mais uma vantagem deste sistema é defendida por VALENTI (2005), em que no seu trabalho informa que o custo de forma é reduzido em 25%, também defendida pelas empresas de protensão pesquisadas neste trabalho.

No modelo real estudado elencar-se-á o valor verdadeiro, dados estes obtidos de uma construtora de Ribeirão Preto, com os números atualizados com o INCC de 03/06/2016. Desta forma se fez o cálculo de economia se neste edifício fosse utilizado a tecnologia de lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas, ou invés de concreto armado como foi feito, teremos, portanto, uma economia real, sem contar com a liquidez do negócio (que não é o foco de nosso trabalho), por sua versatilidade e pontos positivos já citados anteriormente.

Pode-se observar em ALMEIDA FILHO (2006), em que no seu estudo pôde-se concluir satisfatoriamente que a protensão não aderente é uma solução muito vantajosa, do ponto de vista executivo e de consumo de materiais, pois, para pavimentos com maiores dimensões, o concreto armado perderia a versatilidade econômica que possui com a presença de muitos recortes nas fôrmas e da grande quantidade de vigas e pilares, e do ponto de vista executivo, esses recortes e a presença de muitos elementos estruturais atrasariam o andamento da obra. A protensão aderente, embora talvez fosse mais econômica, pois uniria a versatilidade com o consumo de materiais, perderia em produtividade na obra, onde, um dos principais gastos na construção civil é justamente a mão-de-obra empregada. Com essa conclusão, mostra-se então, que a união entre a versatilidade, o consumo de materiais e tempo de execução converge para a protensão não aderente como opção viável e adequada, que se adaptam exatamente as tipologias dos edifícios que fazem parte de nosso escopo de estudo.

1.2.3 A construção de edifícios residenciais na região de Ribeirão Preto x regiões em construção de edifícios em concreto protendido

Como é demonstrado no item anterior (1.2.2), as cidades da região de Ribeirão Preto, poderiam se utilizar de algumas tecnologias na construção que não são usadas atualmente, um exemplo é o da construção de edifícios com estruturas de concreto protendido com lajes lisas e cordoalhas engraxadas, nas quais não identificamos nenhum edifício de múltiplos pavimentos utilizando-se desta técnica.

Vele lembrar que toda região supracitada possui excelentes centros de ensino e pesquisa de engenharia civil e arquitetura, principalmente a cidade de São Carlos, onde estão localizadas duas das principais instituições de estudo da construção civil no Brasil, a UFSCAR e a EESCC-USP e a cidade de BAURU representada pela UNESP, sem contar com as Instituições privadas que muitas delas contribuem de forma efetiva para pesquisas.

Portanto, ao fazer uma análise tanto de vocação para a construção de edifícios, potencial de investimentos e conhecimentos técnicos difundidos pelas instituições de ensino citadas anteriormente, podemos fazer um paralelo e chegar a uma incógnita, comparando esta região com outras em que o sistema de concreto protendido é muito usado em edificações de múltiplos pavimentos.

No nordeste brasileiro como já citado, mais especificamente no Ceará, principalmente em sua capital, Fortaleza, a maioria dos projetos desta tipologia de edificações são de concreto protendido. Talvez isto se dê ao fato, de que o maior expoente brasileiro na difusão do uso e de fornecimento e mão-de-obra e inovações tecnológicas relacionados a esta técnica o diretor Joaquim Caracas da Impacto Protensão estão nesta cidade.

Desta maneira a difusão e uso de concreto protendido com cordoalhas engraxadas obteve uma grande aceitação e compreensão naquele estado. Hoje a Impacto Protensão é a maior empresa brasileira neste segmento de protensão, que já atua em São Paulo, mas, de forma localizada e ainda muito pequena em relação ao concreto armado, hoje ela já possui filiais em Recife, Brasília, Salvador, São Paulo e Manaus, porém, os maiores mercados são na região norte e nordeste.

Com todas as informações e técnicas desenvolvidas para o concreto protendido, inclusive o desenvolvimento de um programa nacional, reconhecido internacionalmente por sua qualidade e confiabilidade no cálculo de estruturas de

concreto, inclusive estruturas protendidas com cordoalhas engraxadas que se trata da TQS, representada pelo CEO Engenheiro Civil Nelson Covas, que contribui de forma expressiva para acesso deste programa para os profissionais e acadêmicos de estruturas.

Fica aqui, portanto, nossa incógnita citada anteriormente, porque uma das regiões mais ricas do país, onde em 2018 foi a região que mais gerou empregos, perdendo apenas para a capital paulista, São Paulo, ainda não assimilou esta técnica? Se trata de uma técnica ruim, ou desconhecimento por parte dos empreendedores e profissionais? Pretende-se ao longo deste trabalho discutir e refletir sobre esta dúvida.

1.3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do estudo deve ser feito por meio de algumas etapas. Entre elas é a execução de um projeto estrutural de um edifício de vinte e cinco pavimentos tipo, construído e já entregue aos clientes, localizado na cidade de Ribeirão Preto, considerando-o em concreto protendido com laje lisa com cordoalhas não aderentes e concreto armado convencional (vigas e lajes), comparando-o com o projeto pelo qual o edifício foi construído, que usou a técnica de concreto armado convencional.

Serão feitas pesquisas bibliográficas em livros, revistas, artigos e manuais técnicos, além de visitas em campo com coleta de imagens para ilustrar os processos construtivos a serem estudados. As etapas previstas da construção do doutorado podem ser divididas em:

1.3.1 Pesquisa Bibliográfica

Apesar de muito carente no Brasil, a partir da pesquisa bibliográfica, se pretende definir teoricamente os sistemas estruturais envolvidos para melhor apresentação e caracterização do sistema em que queremos ampliar o conhecimento de suas características.

1.3.2 Prescrições Normativas

Verificação do que prescreve as normas vigentes do sistema estrutural estudado. A ideia é realçar as diferenças decorrentes do uso da laje lisa, protendidas

com cordoalhas engraxadas, das estruturas usuais da região de Ribeirão Preto feitos em concreto armado e que usam sistema de pórticos (pilar-viga) e lajes maciças.

1.3.3 Análise de dados obtidos no canteiro de obras

Para avaliar as possíveis vantagens do sistema fez-se diversas visitas a canteiros de obras assim como empresas. Como não há obras executadas com esta técnica em Ribeirão Preto, fez-se uma visita em Fortaleza na maior empresa do ramo Naquela região, que é por sinal, uma das pioneiras no fornecimento de mão-de-obra e material para protensão. Aproveitou-se também para realizar visita a um empreendimento, assim como a empresa executora do mesmo, em laje lisa com cordoalha engraxada na cidade de Chapecó. Desta forma pode-se conhecer várias obras para analisar e entender toda sua dinâmica e técnica do uso do sistema.

1.3.4 Entrevistas

Faz parte do trabalho, textos com informações obtidas ao se realizar entrevistas (remotas, via e-mails) com professores da área, representantes das empresas e engenheiros cálculo estrutural de Ribeirão Preto (com experiência comprovada de projetos em de edifícios de múltiplos andares) que atuam nesta cidade e nas cidades da região, que utilizam processo de estruturas de concreto armado convencional. Também se fez o mesmo com as maiores empresas fornecedoras de mão de obra, para tentar compreender o porquê do sistema ser pouco utilizado nesta região.

1.3.5 Projeto

Aproveitando a experiência que o autor teve ao trabalhar em um edifício de vinte e cinco andares em concreto armado com sistema em pilares, vigas e lajes que foi executado em Ribeirão Preto e o acesso aos dados de consumo, detalhe e custo de obra, realizou-se um projeto inédito/original do mesmo prédio (a mesma arquitetura) em laje lisa e concreto protendido com cordoalha engraxada. É possível desta maneira comparar o custo de mão de obra e insumos do prédio executado em um sistema e noutro. Também esta parte da tese mostra que uma arquitetura mesmo não projetada para se executar laje lisa protendida pode ser, com o devido

conhecimento do engenheiro de cálculo estrutural, realizado em laje lisa protendida até com uma certa economia, como é vista nas conclusões finais.

1.3.6 Análises e conclusões

Os dados e resultados obtidos são analisados para se verificar se sob o ponto de vista econômico e técnico a solução de lajes lisa com cordoalhas engraxadas pode ser empregada na região.

É de grande importância elencar que os processos de análise aqui citados e que são desenvolvidos serão sempre estabelecidos os pontos favoráveis e os desfavoráveis de cada sistema estudado. Usando justamente esta valoração para escolher o sistema mais adequado para a tipologia de edifício proposto.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de capítulo inicial para apresentar as ideias da pesquisa e a metodologia. No segundo apresenta-se os sistemas construtivos mais utilizados na concepção da estrutura, em concreto armado e protendido, pré-lajes e feitas no local, lajes mistas, sistemas de pavimentos em lajes lisas protendidas em edificações de múltiplos pavimentos, vantagens e desvantagens destes sistemas. No terceiro apresenta-se de maneira mais profunda as definições, características e aplicações do tema do trabalho, bem como as análises dos questionários enviados aos engenheiros de cálculo estrutural, acadêmicos e construtoras. No quarto capítulo é feita uma breve introdução e definições que envolvem o tema, uma avaliação de custo de um mesmo pavimento convencional em concreto armado e com cordoalhas engraxadas, critérios iniciais para o uso do programa utilizado neste trabalho, regiões de protensão e número de cabos necessários. No quinto é realizado o cálculo de um edifício em concreto armado tradicional e outro em lajes lisas protendidas. É verificado os coeficientes de segurança, os resultados obtidos com o cálculo estrutural parametrizado pelos deslocamentos, a protensão das lajes, cabos, mudanças das seções e a comparação econômica entre os dois sistemas. O sexto apresenta as conclusões finais e considerações para novos estudos, objetivando expandir e difundir o conhecimento e incentivar a pesquisa sobre o assunto relacionado ao concreto protendido com uso de pós tração não aderente em lajes lisas.

2 SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PAVIMENTOS EM LAJES DE CONCRETO

As diferenças entre os sistemas construtivos de pavimentos de edificações se referem à maneira como seus elementos são executados ou mesmo os quais são os materiais empregados (aço comum e aço de protensão). O sistema de laje maciça em concreto armado, com vigas para prédios de múltiplos andares, pode ser considerado como o sistema mais fácil de executar, talvez por ser o mais empregado por grande parte das empresas construtoras e como solução estrutural para os engenheiros de cálculo estrutural que atuam na região de Ribeirão Preto. Esta observação decorre das análises feitas no próximo capítulo quanto a questionários e visitas feitas na região, que são apresentados no final do capítulo 3.

Neste trabalho são estudados os sistemas construtivos de pavimentos de edifícios de múltiplos com laje maciça em concreto armado e viga; e o sistema de laje lisa com protensão com cordoalha engraxada. Com o intuito de limitar as variáveis envolvidas, e ainda assim considerar um exemplo prático, optou-se por estudar a parte de cálculo e orçamento (da estrutura sem considerar a fundação) de um prédio feito no sistema laje maciça e viga em concreto armado (daqui para frente também denominado de “tradicional”) com vinte e cinco pavimentos executado na cidade de Ribeirão Preto, e simulando um outro, com mesma disposição arquitetônica e número de andares com pavimentos com cordoalhas engraxadas. É importante elencar que a estrutura da periferia deste edifício, bem como as fundações da torre não foram estudadas aqui, pois existem muitas particularidades nestas estruturas e não se trata do foco desta tese.

Neste capítulo são descritas de forma sucinta alguns sistemas construtivos de pavimentos em lajes de concreto que são empregados no país e suas principais características.

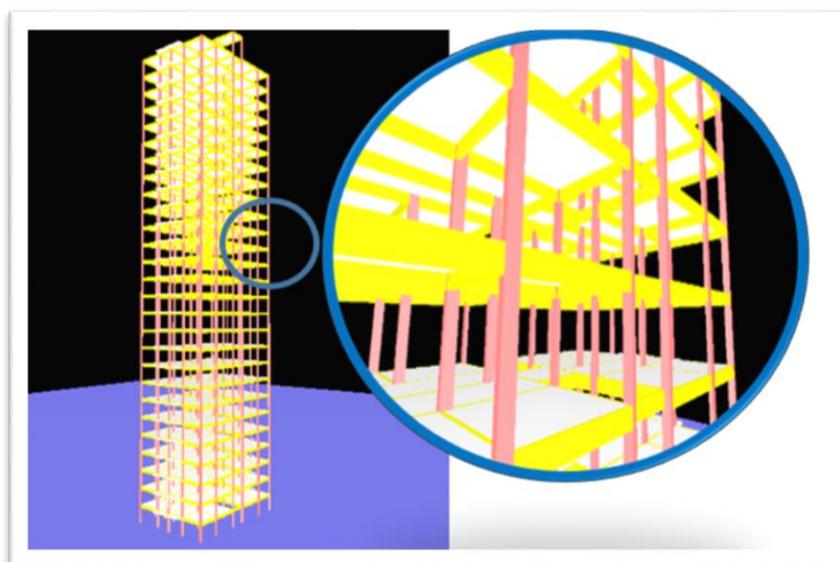
2.1 SISTEMA CONSTRUTIVO DE PAVIMENTO COM LAJE MACIÇA E VIGAS EM CONCRETO ARMADO OU SISTEMA CONVECIONAL

Este sistema é feito há mais de 90 anos no Brasil, como cita COSTA (2004), pois o prédio do jornal “A noite” o Edifício "A Noite" (com Joseph Gire), do Rio de Janeiro, bateu recorde mundial à época com 102 m de altura no Rio de Janeiro concluído em 1928.

Trata-se de um sistema que apresenta uma grande capacidade de absorver esforços horizontais, quando se conseguem pilares dispostos de forma alinhada e conectados por vigas, que tem grande rigidez a flexão. Para vãos não muito grandes (em torno de 5 m) as lajes maciças de concreto também apresentam deformações verticais pequenas. Os pórticos formados pelas viga e pilares podem, em geral, estar dispostos em duas direções. Apesar da maior complexidade das formas e altura diferentes dos pontalões das vigas e lajes, quase toda mão de obra de carpintaria já executam as formas e escoramentos deste sistema.

Na figura 2-1, onde se vê uma figura tridimensional esquemática de um edifício em concreto tradicional, pode-se perceber que a estrutura fica com muitas intersecções entre os elementos do tipo vigas e pilares, que dificulta a concretagem e podem também atrapalhar as modificações de plantas.

Figura 2-1 - Exemplo de edifício com lajes com vigas em concreto armado.



Fonte: próprio autor.

Pode ser observado na figura 2-2, um edifício onde o arquiteto necessita de adequar o projeto à necessidade de usar as vigas como detalhes para poder compatibilizar seu projeto à estrutura, isto é sabido pois a execução deste edifício foi gerenciado pelo autor, que participou das compatibilizações dos projetos.

Figura 2-2 - Exemplo de edifício com lajes e vigas em concreto armado.



Fonte: próprio autor.

Passados 90 anos dos primeiros prédios feitos com vigas procurou-se modificar as lajes para se encontrar outras soluções que pudessem de alguma maneira melhorar o custo ou aplicação do sistema. Nos próximos itens são descritos outros tipos de lajes de concreto.

2.2 TIPOS DA LAJES DE CONCRETO

Neste item foram apresentadas tipologias de lajes existentes mais utilizadas, com algumas particularidades, vantagens e desvantagens de forma sucinta, como forma de servir como comparação ao sistema de laje lisa com pós tração não aderente.

São abordados os seguintes sistemas:

- a) Lajes pré-moldadas (em concreto armado e protendido), sendo laje duplo π e alveolar;
- b) Lajes parcialmente pré-moldadas, sendo lajes tipo trilho (armado ou protendida) treliçadas e pré-laje;
- c) Lajes moldada no local, sendo maciças com vigas;
- d) Lajes moldada no local, sendo maciças sem vigas;
- e) Lajes moldada no local, sendo maciças sem vigas nervuradas (uni e bidirecionais) e mistas (lisas com capiteis e vigas faixa).

2.2.1 Lajes pré-moldadas (em concreto armado e protendido), sendo laje duplo π e alveolar

De acordo com ADÃO e HEMERLY (2010), as lajes pré-moldadas possuem uma grande vantagem no quesito economia. A economia que se faz com a dispensa de forma em toda a extensão de uma laje, além de poder diminuir o escoramento, justifica seu uso. Entretanto surgiram diversas fábricas de vigotas para estas lajes com baixa qualidade de execução.

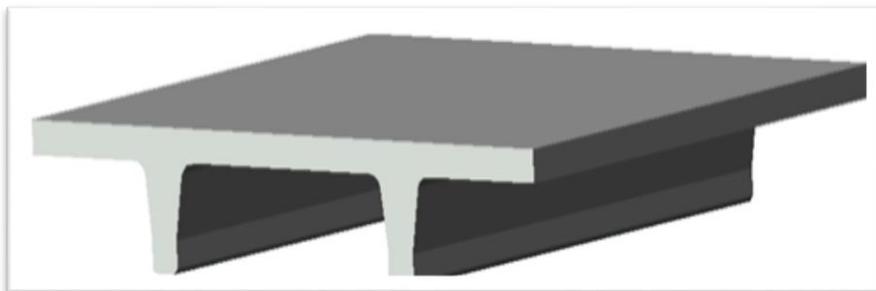
Ainda conforme afirmado por ADÃO e HEMERLY (2010), um sistema de lajes pré-moldadas, entre os mais diversos que surgiram (vigotas, treliçadas, pré-lajes, etc.), junto a um sistema tradicional de vigas e pilares, pode ser uma estrutura estável. Seu cálculo é como laje armada numa direção, sendo muito importante definir esta direção e não trocá-la na execução. É salientado por ADÃO e HEMERLY (2010), que este tipo de estrutura deve se tomar cuidado extremo de não se esquecer nunca da armação negativa, pois o conjunto monolítico formado implicará em momentos negativos apesar da consideração de lajes isostáticas.

Quando as lajes apresentam grandes vãos, podemos calculá-las como mistas. Dentre os materiais que podemos compor com o concreto, temos isopor (permite bom isolamento termo acústico, além de leveza), caixas de papelão (que estarão perdidas dentro das vigotas, a tradicional, com peças cerâmicas e as alveolares em que não há material algum, somente o vazio. Ainda existem fábricas que criaram formas metálicas para preencher os vazios formando vigas intermediárias, dando um bom aspecto a estas lajes, com as nervuras bem definidas nas duas direções.

No caso específico de lajes alveolares, apesar de serem muito versáteis e econômicas é pouco usada no Brasil para prédios acima de 12 andares. Isto porque devido ao seu peso, requer que no processo de transporte vertical no caso de edifícios altos, necessidade do uso de guias de grande capacidade. No Brasil as guias ainda são muito caras, não só por seu preço de compra, locação e manutenção, mas, na sua fixação (fundação) e custos indiretos de funcionários, pois, se faz necessária a contratação de dois operadores capacitados, um grueiro e um sinaleiro, o que praticamente inviabiliza seu uso. O mesmo se aplica as lajes em seção pi (como a indicada na figura 2.3) que, embora em situações similares, consome menos concreto que a alveolar, caso não usado forro, apresenta as nervuras.

Na figura 2-3, pode-se verificar a tipologia da seção transversal da laje pré-moldada do tipo π .

Figura 2-3 – Seção transversal de laje pré-moldada tipo π .



Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

É mostrada da figura 2-4 a seção transversal da laje pré-moldada tipo alveolar.

Figura 2-4 – Seção transversal de laje pré-moldada tipo alveolar.



Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

Conforme já mencionado, o uso de lajes alveolares é muito prático, porém, ainda possuem custos elevados para a realidade brasileira, é demonstrada da figura 2-5 a aplicação e o içamento de uma laje pré-moldada do tipo alveolar utilizando-se um guindaste móvel. Ou seja, para obras com pequena altura (até 4 pavimentos) e grandes vãos (acima de 5 m) são econômicas e bastante empregadas, evitando praticamente a forma e escoramento.

Figura 2-5 – Aplicação de laje pré-moldada tipo alveolar.



Fonte: Foto cedida gentilmente pelo Professor Roberto Chust Carvalho.

Já em países em que o uso de equipamentos de transporte vertical é mais comum e barato, este sistema se traduz em economia e agilidade, esta afirmação pode ser constatada em um edifício alto executado na Bélgica, em pavimentos com lajes alveolares que utiliza uma grua de travamento central de grande porte para içamento das lajes, que pode ser observado na figura 2-6.

Figura 2-6 – Edifício alto na Bélgica em lajes alveolares com uso de grua de grande porte.



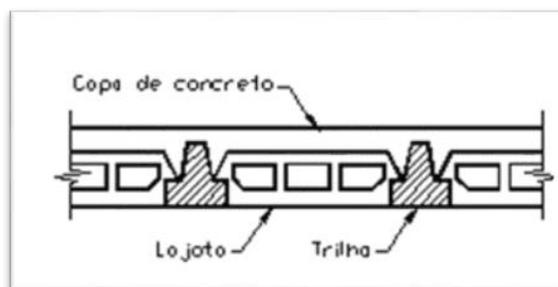
Fonte: Foto cedida gentilmente pelo Professor Marcelo de Araújo Ferreira.

2.2.2 Lajes parcialmente pré-moldadas, lajes tipo trilho (armado ou protendida) treliçadas e pré-laje

Conforme já descrito por ADÃO e HEMERLY (2010), as lajes parcialmente pré-moldadas do tipo trilho armado ou protendida, treliçadas e pré-laje possuem uma grande vantagem no que diz a respeito de economia. A economia que se faz com a dispensa de forma em toda a extensão de uma laje, além de poder diminuir o escoramento, pode em algumas situações serem muito mais práticas e vantajosas.

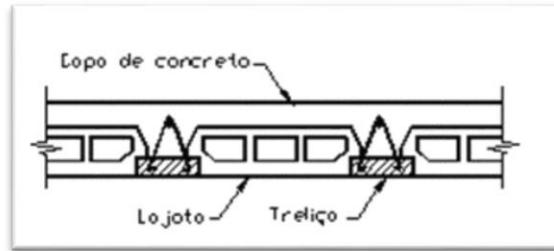
Nas figuras 2-7 e 2-8, pode-se verificar a tipologia da seção transversal de laje parcialmente pré-moldadas tipo trilho e treliçada respectivamente.

Figura 2-7 – Seção transversal de laje parcialmente pré moldadas tipo trilho.



Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

Figura 2-8 – Seção transversal de laje parcialmente pré moldadas tipo treliça.



Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

Nas lajes do tipo pré-moldadas, no caso de trilhos, faz-se necessária a incorporação de armação por meio de uma treliça, na figura 2-9 é apresentada a armadura típica da nervura de uma laje do tipo treliçada.

Figura 2-9 – Amadura da nervura da laje tipo treliça.

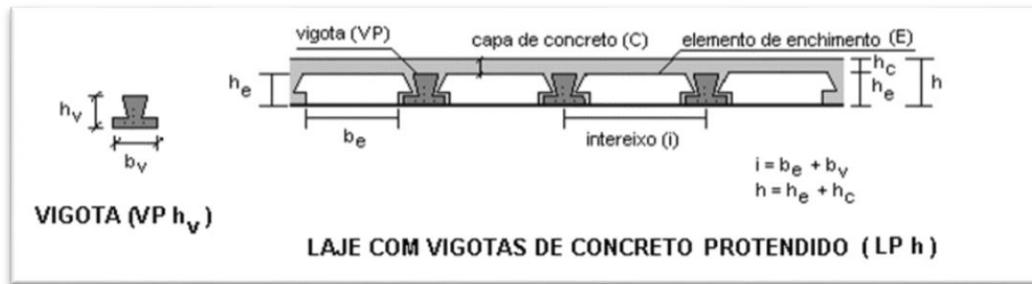


Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

As lajes parcialmente pré-moldadas tipo trilho e treliçada são mais comuns em obras de pouca altura, geralmente obras residenciais em que o projeto arquitetônico é único e personalizada e requer uma construção mais artesanal. Evitam formas e requerem pouco escoramento, mas não são tão adequadas para prédios mais altos.

Na figura 2-10 é possível verificar uma laje com vigotas protendidas, bem como o esquema da capa de concreto e o elemento de enchimento.

Figura 2-10 – Laje com vigotas protendidas.



Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

A pré-laje maciça de concreto (apresentada na figura 2-11) é uma opção muito interessante, haja vista a facilidade que ela apresenta no momento da montagem no local de sua aplicação.

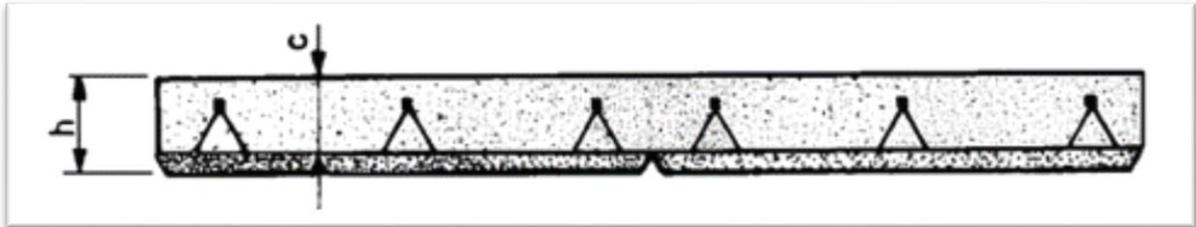
Além de sua fácil aplicação e uso reduzido de escoramento, estas lajes apresentam um bom acabamento que também traz uma redução de custos, pois praticamente dispensa operários para executar tal acabamento.

No caso do uso de pré-lajes maciças em periferias de edifícios e edificações de poucos pavimentos, ela pode ser movimentada facilmente por operários e pequenos guinchos de baixo custo, bem como facilidade do momento da concretagem, porém, para edifícios altos dependem de grandes guindastes ou gruas de grande capacidade e de equipamentos para concretagem de grande capacidade de bombeamento, o que acaba por inviabilizar economicamente.

Pode ser verificado em CARVALHO e PINHEIRO (2009), detalhes do cálculo estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas e pré-lajes.

Na figura 2-11 é mostrada um esquema da seção transversal de duas pré-lajes maciça de concreto, também pode ser observada a capa de concreto que deve ser executada após a montagem das lajes e suas respectivas armaduras complementares e instalações prediais necessárias.

Figura 2-11 – Esquema de pré-laje maciça de concreto.



Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

Na figura 2-12 pode ser visto uma laje pré-moldada sendo içada para transporte até o local de sua fixação com o uso de uma grua de grande porte.

Figura 2-12 – Içamento de pré-laje maciça de concreto com uso de grua.



Fonte: Fotos cedidas gentilmente pelo Professor Roberto Chust Carvalho.

Na verdade, o uso da pré-laje, é sob o ponto de vista estrutural o sistema estrutural tradicional, pois após a colocação da armadura (na própria pré laje) e depois por cima dela na outra direção, obtém-se uma laje maciça armada em duas direções, com a vantagem de não se gastar forma.

2.2.3 Lajes moldada no local, sendo maciças com vigas

A principal característica do sistema de lajes moldadas no local maciças com vigas de concreto armado é a realização da maior parte dos serviços na própria obra, tanto na execução de formas quanto da armação. No caso de execução de formas para concreto armado com vigas, além do ciclo de concretagem ser maior, há um

elevado número de funcionários no canteiro, pois a execução de formas de vigas e a maior quantidade de pilares requer muito mais horas trabalhadas, desta maneira existem muito mais funcionários executando as diversas tarefas e etapas do que em outros sistemas estruturais, tipo lajes pré-moldadas, lajes lisas protendidas, etc.

No caso deste sistema, destaca-se o alto custo de formas para lajes e vigas, pois, as matérias primas destas formas são caras e sua fabricação possui altos custos, pois além do custo do material, há uma grande perda, pois, as formas possuem dimensões únicas, principalmente as vigas, onde há grande número de peças e conseqüentemente recortes. Geralmente é necessário dois jogos de formas e três jogos de fitas, que são faixas de madeira compensada recortadas e mantidas na parte inferior da laje para que as escoras sejam apoiadas, como as escoras não podem ser retiradas rapidamente, estas fitas ficam por um grande período de tempo na estrutura, o que faz necessário ter vários jogos para que as lajes superiores possam ser preparadas e concretadas. No caso de concreto armado com vigas, também são necessários mais jogos dos fundos das vigas, pois servirão também como apoio de escoras.

No sistema moldado no local, não há a obrigatoriedade de equipamentos de grande porte, tendo em vista que não há grandes peças a serem transportadas. Geralmente o transporte até o local do uso é feito por meio de elevadores laterais do tipo cremalheira.

Nas etapas críticas da estrutura, como por exemplo a concretagem, o caminhão betoneira e bomba ficam na rua juntos, bombeando o concreto através de mangueiras até o destino final.

A grande questão quando se trata do canteiro é o estoque dos materiais a serem utilizados. Como grande parte do serviço é feito na própria obra é necessária uma área destinada a tal função.

Há estudos específicos destinados à organização de canteiros e melhores maneiras de otimizar os processos, como por exemplo o processo Lean Construction, 5S, PBQP-H e a própria ISO 9001, como pode ser verificado em NUNES (2011).

É oportuno destacar que as formas representam uma grande parcela do custo final da estrutura, e em particular as vigas, pela dificuldade de material e mão de obra.

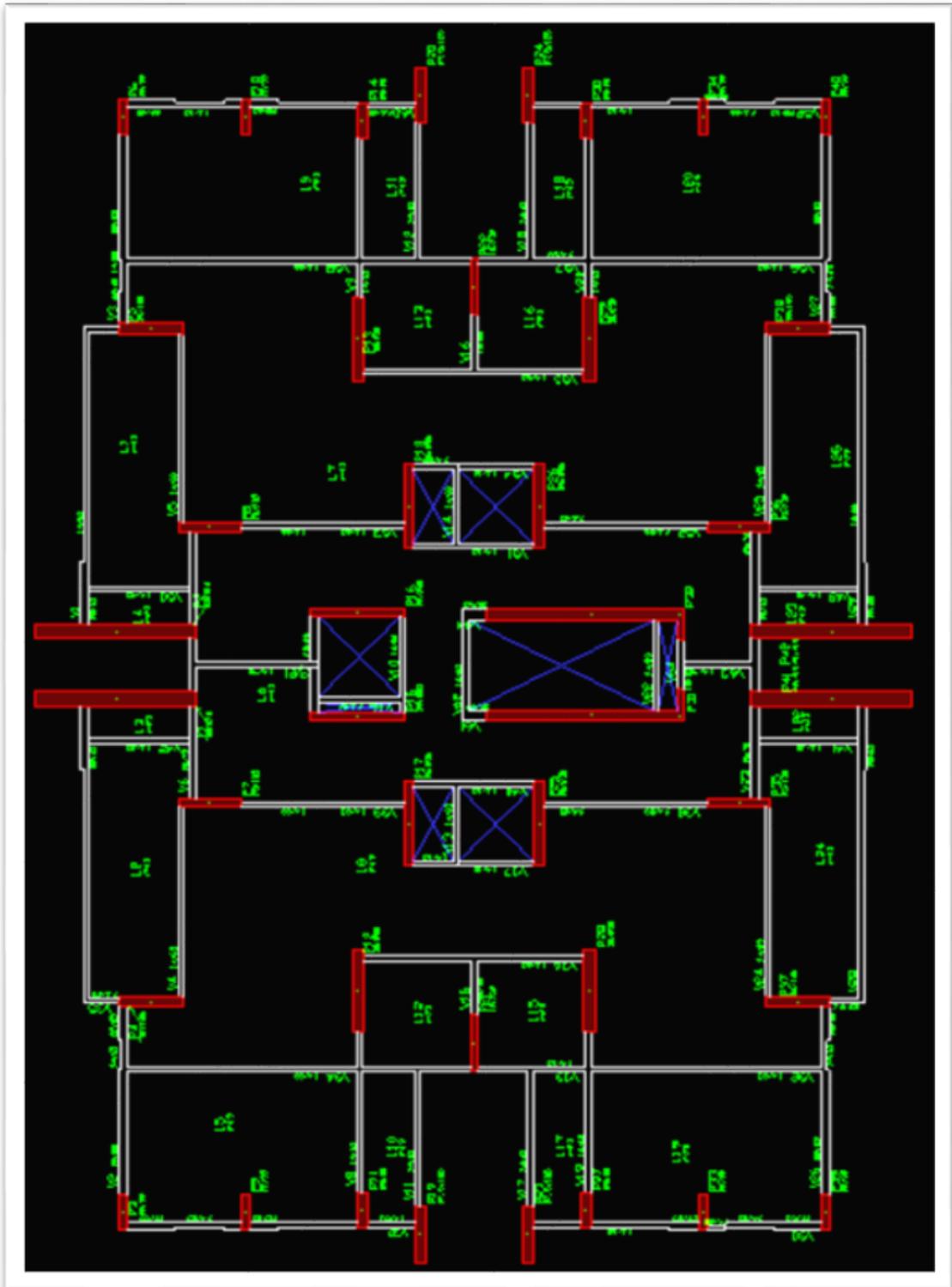
Não se pode deixar de destacar as qualidades do sistema de lajes moldadas no local com uso de vigas, pois, a maior parte das construções no Brasil utiliza-se

deste sistema. Além das qualidades inerentes ao concreto armado, hoje em dia, é o sistema mais conhecido por parte da mão de obra, pois não necessita de grandes equipamentos para sua execução nem de conhecimentos muito específicos, ao contrário do seu cálculo. No Brasil existem vários programas de computadores que auxiliam os engenheiros de cálculo estrutural a desenvolverem seus projetos, bem como seu detalhamento e concepção estrutural, desta maneira é o sistema estrutural mais conhecido e difundido, o que não significa que é o mais moderno ou melhor que os outros sistemas estruturais.

Como este trabalho possui seu foco em sistemas, o cálculo estrutural detalhado de lajes com vigas pode ser encontrado, entre outros, em ARAÚJO (2014).

Na figura 2-13 verifica-se a planta de uma laje maciça moldada no local com vigas, esta planta serviu como base para o cálculo de estrutura que será apresentada no capítulo 5.

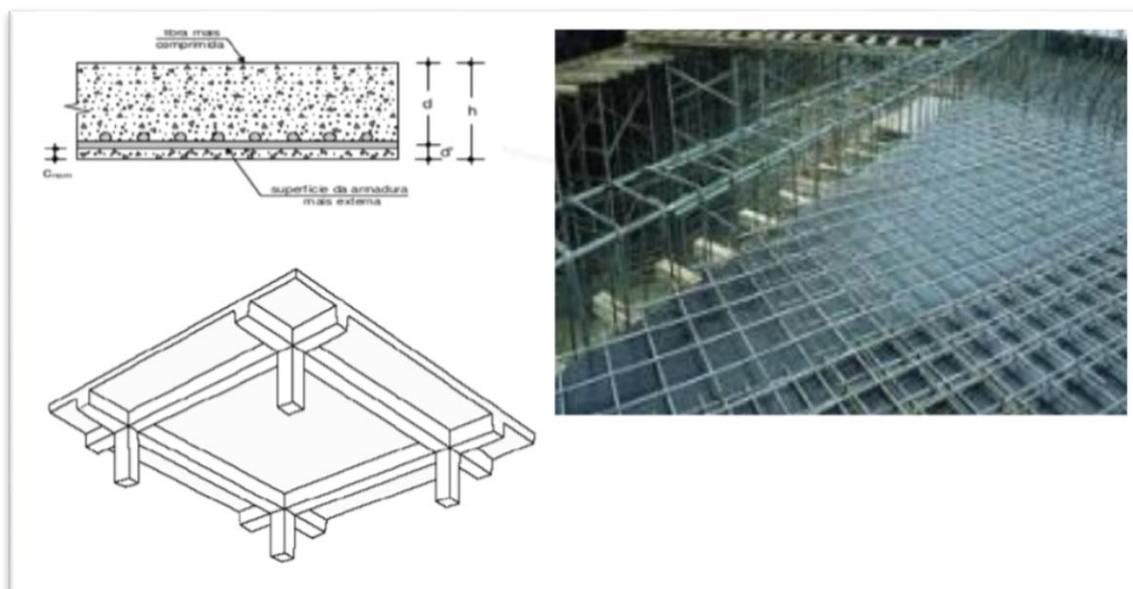
Figura 2-13 – Planta do prédio com laje com viga a ser calculado no capítulo 5.



Fonte: Próprio autor.

Na figura 2-14 se observa uma laje maciça com corte, sua perspectiva esquemática e os detalhes da armação já devidamente montada.

Figura 2-14 – Laje maciça com corte, perspectiva esquemática e armação.



Fonte: Figuras cedidas gentilmente pelo Professor Roberto Chust Carvalho.

2.2.4 Lajes moldada no local, sendo maciças sem vigas

No Brasil é difícil saber quando este sistema começou a ser utilizado, porém segundo RABELLO (2016) nos Estados Unidos, em Minneapolis, Turner projetou e construiu o prédio C. A. Bover com laje lisa no ano de 1906, portanto há mais de 110 anos.

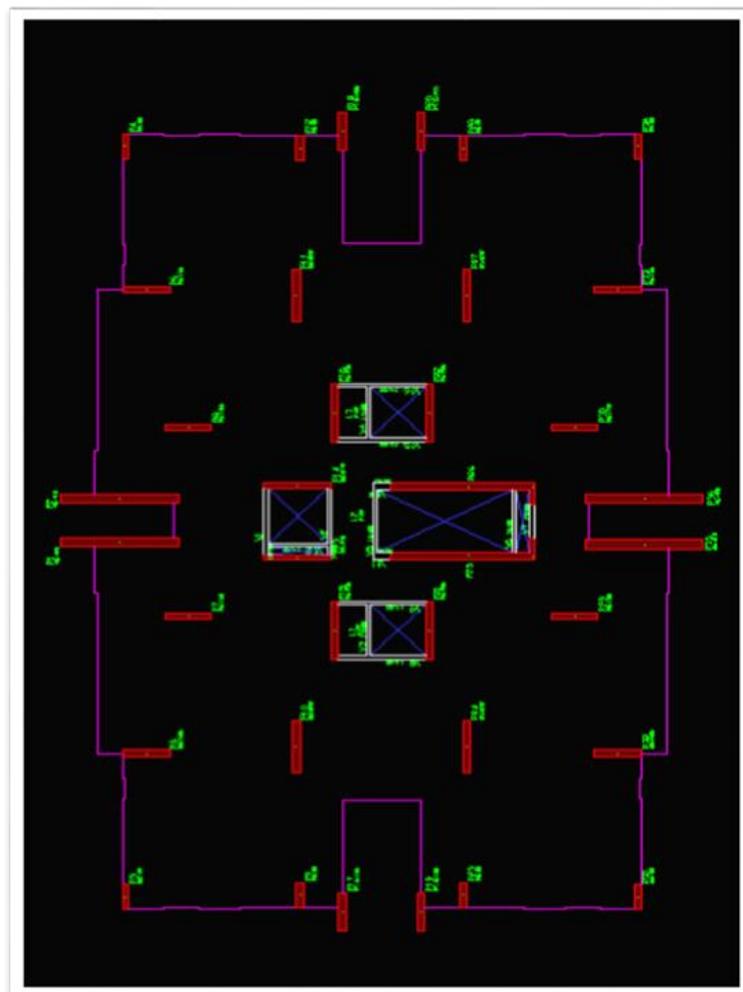
No sistema de lajes moldadas no local, com lajes maciças sem vigas, suas características são muito semelhantes aos das lajes com vigas, conforme descrito no item anterior, 2.2.1, porém a grande diferença se dá na espessura da laje e na forma.

No caso das formas, como se trata de um item muito caro na composição do valor de uma edificação, devido aos custos de mão-de-obra e de matéria prima, este sistema, acaba proporcionando uma grande economia, pois como a laje não possui vigas, praticamente não há recortes, desta maneira são facilmente fabricadas e montadas e se forem utilizadas formas de material plástico ou metálico o custo é ainda menor.

No caso de lajes lisas em concreto armado, estas lajes possuirão uma espessura muito maior se comparada as lajes maciças com uso de vigas, e o custo do concreto aumentará consideravelmente também, pois no caso das vigas, elas exercem um enrijecimento da estrutura formando um pórtico, permitindo que a esta estrutura se deforme de uma maneira controlada já na concepção do próprio projeto, conseqüentemente mais eficiente, ao contrário de lajes lisas maciças sem vigas, em que o engenheiro de cálculo estrutural precisa combater estas deformações se utilizando também da laje como um diafragma, o que acaba por ser necessário o aumento da espessura da laje, bem como o uso de capitéis para combater as grandes forças de punção e cisalhamento junto aos pilares por não haverem vigas. Estas técnicas para o desenvolvimento do cálculo estrutural desses elementos podem ser melhores entendidos em FUSCO e ONISHI (2017) e em CARVALHO e FIGUEIREDO (2014).

Na figura 2-13 verifica-se a planta de uma laje maciça moldada no local sem vigas, esta planta serviu como base para o cálculo da estrutura que será apresentada no capítulo 5.

Figura 2-15 – Planta do prédio com laje sem viga a ser calculado no capítulo 5.



Fonte: Próprio autor.

2.2.5 Lajes moldada no local, sendo maciças sem vigas nervuradas (uni e bidirecionais) e mistas (lisas com capiteis e vigas faixa)

Conforme PORTO e FERNANDES (2015), as lajes nervuradas são vistas como uma opção para os casos nos quais se deseja reduzir cargas na estrutura, economizar concreto e ainda vencer maiores vãos (7m a 15m).

Nessas lajes, há um melhor aproveitamento do concreto e do aço, pois se utiliza o mesmo princípio da viga T. Elas ainda possuem, em sua parte inferior, nervuras e sem vigas, uni ou bidirecionais, podendo ser lisas com capitéis e vigas faixas.

As nervuras dessas lajes lisas acabam sendo calculadas como se fossem pequenas vigas, porém, não com a mesma eficiência de uma viga, existe outro artifício estrutural chamada de vigas faixas, que são praticamente vigas executadas deitadas,

analogamente calculadas como vigas, esses dois sistemas podem ser utilizados concomitantemente. No caso como as lajes neste caso são executadas sem vigas, faz-se a necessidade de se optar pelo uso de vigas faixas como já comentado, ou capitéis, combatendo assim os esforços de punção aplicados nas respectivas lajes, pois, somente utilizando lajes tipo cubetas não seria possível.

Uma das grandes vantagens das lajes moldadas no local com utilização destas formas reutilizáveis chamadas de cubetas ou cabaças, é que são leves facilitando o transporte e facilidade para a montagem dos escoramentos.

As lajes nervuradas, assim como as maciças, podem ser armadas em uma ou duas direções (armaduras em cruz), o que é definido pelas suas nervuras, que podem ocorrer em uma ou nas duas direções. Quando armadas em apenas uma direção, são analisadas na direção das nervuras (menor vão), já quando armadas em cruz, são calculadas como lajes maciças convencionais.

A NBR 6118:2014, item 13.2.4.2, define algumas condições a serem obedecidas para o projeto das lajes nervuradas, estes detalhes podem ser melhores observados em ADÃO e HEMERLY (2010).

Na figura 2-16 verifica-se um esquema de lajes maciças com capitéis e sem capitéis bem como uma foto e uma ilustração.

Figura 2-16 – Detalhes esquemáticos de pilares com e sem capitéis em laje maciça.



Fonte: Figuras cedidas gentilmente pelo Professor Roberto Chust Carvalho.

Conforme demonstrado na figura 2-17, é visto a fôrma do pavimento de um edifício executado utilizando o sistema de laje nervurada.

Figura 2-17 – Forma de pavimento em laje nervurada.



Fonte: Foto cedida gentilmente pelo Professor Roberto Chust Carvalho.

Na figura 2-18, é mostrado o esquema de uma laje em concreto com forma do tipo cubeta (nervurada), bem como uma foto do aspecto da laje já desformada e tratada superficialmente para um bom acabamento na parte inferior, no caso indicado principalmente para estruturas de periferia de edifícios, observa-se também que as lajes ficam moldadas conforme as formas utilizadas. No caso de edifícios residenciais de múltiplos pavimentos que é o foco de nosso estudo, é necessário a colocação de um forro de gesso, que no caso inviabiliza em termos econômicos a sua execução para edifícios altos residenciais.

Figura 2-18 – Esquema de laje nervurada tipo cubeta.



Fonte: Figuras cedidas gentilmente pelo Professor Roberto Chust Carvalho.

Na figura 2-19, se observa a construção de um edifício no qual é utilizado o sistema estrutural de laje mista, lisa e nervurada com seus respectivos elementos em laje treliçada, porém, se faz necessário o uso de um tratamento na superfície inferior na laje para o caso de edifícios residenciais, o que prejudica sua viabilidade para edifícios de múltiplos pavimentos para uso residencial.

O sistema de laje lisa mista, lisa e nervurada, geralmente não é utilizada para edifícios altos por seu comportamento estrutural, no qual os efeitos de segunda ordem são mais complexos de se combater ou atenuar, estes detalhes são bem definidos em JOVAIR e FIGUEIREDO (2010).

Figura 2-19 – Laje lisa mista (lisa e nervurada) com elementos de laje treliçada.

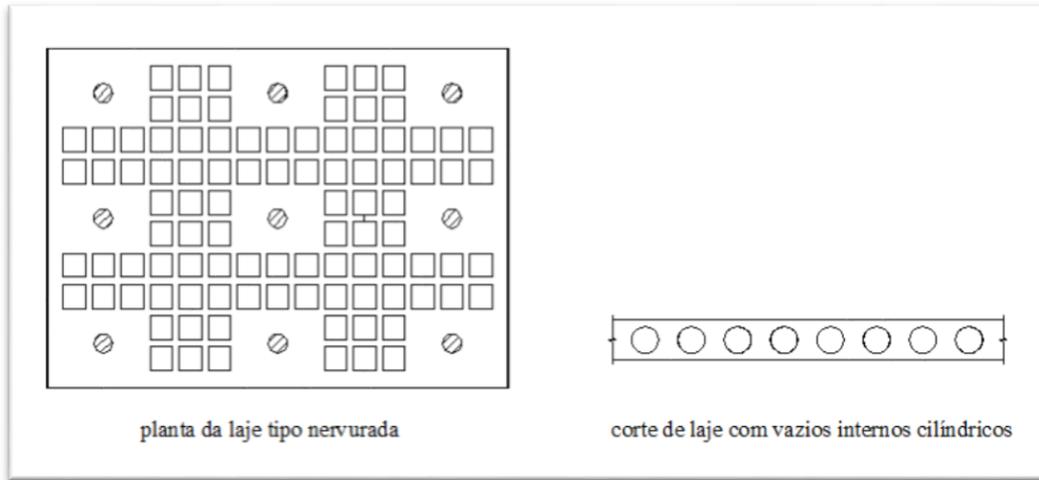


Fonte: JOVAIR e FIGUEIREDO (2010).

As lajes nervuradas lisas e lisas com vigas faixas, podem ser utilizadas tanto para edifícios residenciais ou comerciais, o que se torna um fator para sua viabilidade será seu comportamento estrutural conforme a altura do edifício e a aceitação do cliente se caso for mantido sem forro, porém não se trata do cerne de nosso estudo.

Na figura 2-20 na sequência, é mostrada o esquema de um pavimento em lajes nervuradas sem vigas.

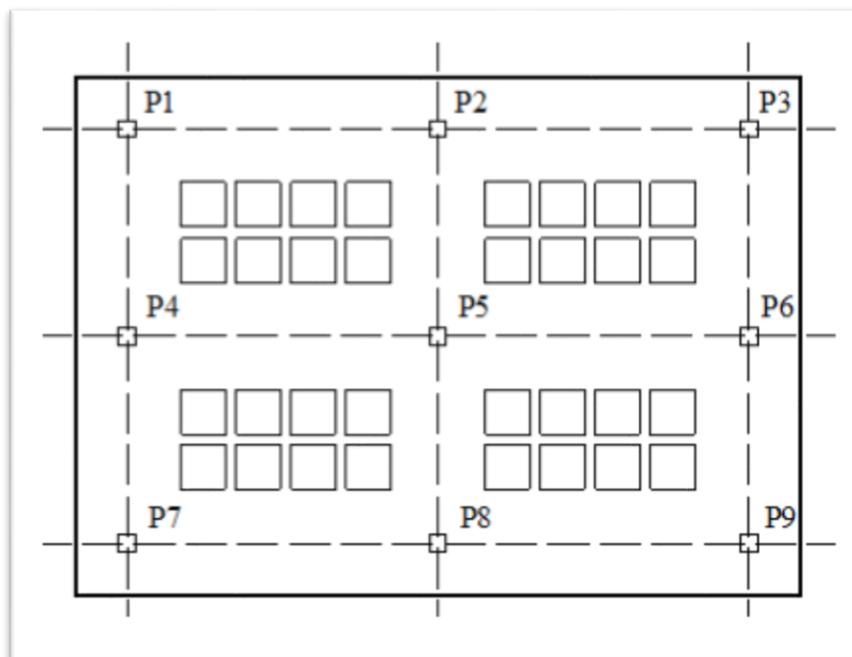
Figura 2-20 – Pavimento de lajes nervuradas sem vigas.



Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

Na figura 2-21 verifica-se o esquema de uma laje no qual é utilizado lajes nervuradas sem vigas com uso do artifício de vigas faixas.

Figura 2-21 – Pavimento de lajes nervuradas com vigas faixas.



Fonte: CARVALHO e PINHEIRO (2009).

2.3 DESVANTAGENS ESTRUTURUAIS DE LAJES LISAS PROTENDIDAS

O sistema de lajes sem viga, denominada lajes lisa pala ABNT NBR6118:2014 (2014) como lajes lisas e cogumelos (quando houver capiteis), apresentam, quando comparados aos sistemas tradicionais, em princípio, três desempenhos estruturais piores (em condições similares): 1) Menor resistência a esforços laterais (vento) devido a inexistência das vigas; 2) Maiores flechas nas lajes (de novo pela inexistência das vigas) e 3) A possibilidade de a laje ser puncionada pelo pilar.

Para HANAI (2005) a protensão pode ser empregada como um meio de se criar tensões de compressão prévias nas regiões onde o concreto seria tracionado em consequência das ações sobre a estrutura, principalmente no uso em lajes lisas onde as deformações são maiores se não observadas em projeto.

CARVALHO (2017) considera as estruturas em concreto protendido em lajes lisas um avanço ou extensão das de concreto armado, pois nelas é possível otimizar o uso de aços de grande resistência, assim como concretos de alto desempenho.

O concreto protendido possui como objetivo introduzir no elemento um estado prévio de tensões através de uma compressão anterior na peça a ser concretada. Isso é feito para diminuir a fissuração do concreto, conforme CARVALHO (2017) apresenta ao longo do seu trabalho.

De acordo com TAKATA (2017), a protensão tem bons resultados no controle e redução de deformações e fissuração, permite cobrir grandes vãos e também pode ser utilizado em elementos pré-fabricados.

Assim a protensão melhora bem o desempenho das lajes lisas em relação às flechas como também na punção (embora em geral se possa colocar armadura complementar neste sentido).

A quantidade de equipamentos e materiais envolvidos no processo construtivo, bem como a necessidade de um concreto de melhor qualidade, motivam a construção das peças num canteiro de obras apropriado, onde é possível executar as protensões e processar a cura do concreto em condições favoráveis com rigoroso controle tecnológico.

Um exemplo prático é mostrado na figura 2-22, uma laje executada com protensão.

Figura 2-22 - Construção de um pavimento em concreto protendido.



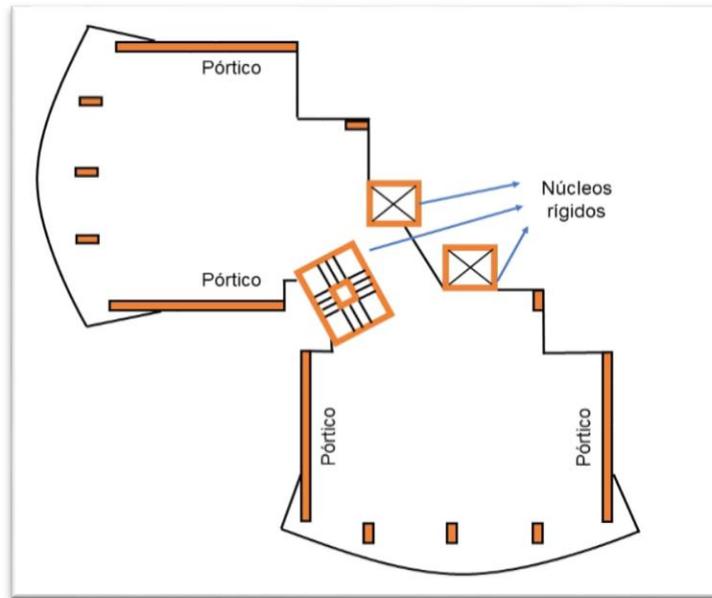
Fonte: TAKATA (2017).

2.4 ESTABILIDADE LATERAL DE PRÉDIOS COM LAJES LISAS

A protensão melhora o desempenho do pavimento de lajes lisa, mas a questão da maior deslocabilidade lateral deve ser combatido com arranjos de pilares, núcleos de travamentos e a outros sistemas que não pertencem propriamente ao pavimento. Um dos grandes problemas enfrentados no cálculo estrutural de edifícios altos em lajes lisas são os efeitos de segunda ordem consequentemente sua estabilidade lateral.

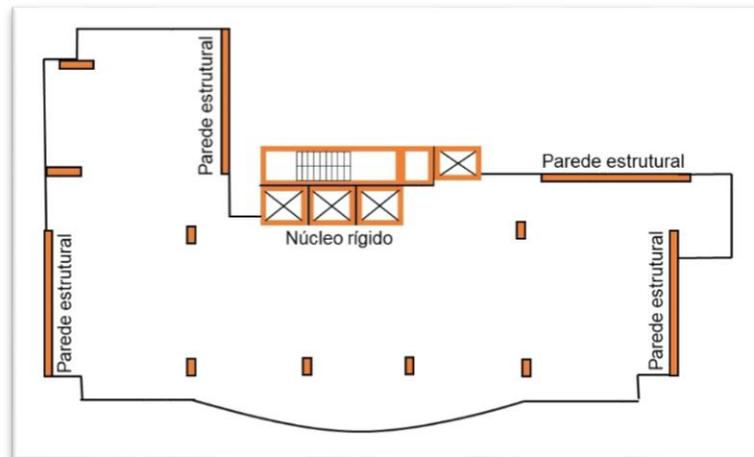
Conforme SILVEIRA (2012), lançando-se mão de pórticos de alta rigidez, formados por vigas altas ligadas a alguns pilares, convenientemente posicionados, é possível associar às estruturas em lajes lisas a utilização de pilares mais robustos bem como pilares paredes (no lugar dos pórticos), e as caixas de escadas e elevadores usados como núcleo rígidos para combaterem os efeitos de segunda ordem. Os pórticos mostrados nas figuras 2-23 e 2-24 podem ser indicados para situações onde uma planta baixa de grande área não possui os núcleos rígidos convenientemente espaçados bem como pavimentos executados em lajes lisas.

Figura 2-23 - Núcleos rígidos e pórtico.



Fonte: Adaptado, SILVEIRA (2012).

Figura 2-24 - Núcleo rígido em planta com pilares-parede.



Fonte: Adaptado, SILVEIRA (2012).

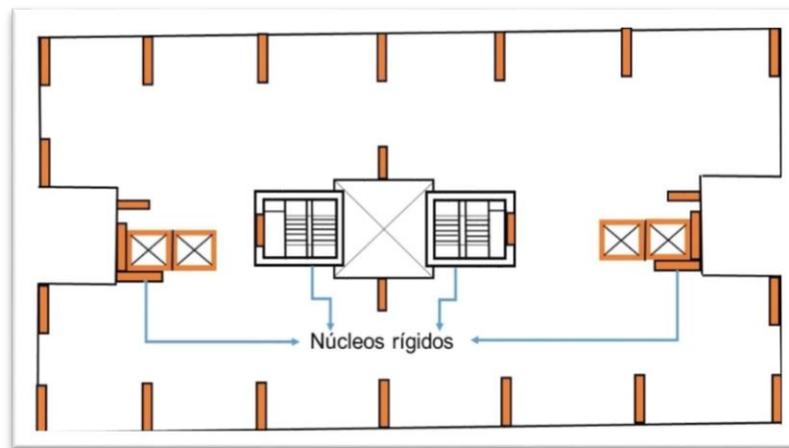
2.4.1 Uso de modelos tridimensionais que consideram o efeito de laje o contraventamento da estrutura

Para o cálculo de estruturas em laje lisa, é de grande importância que o engenheiro de cálculo estrutural faça um correto arranjo das peças estruturais para combater os efeitos das deformações da estrutura, usando-se um modelo tridimensional de cálculo. O emprego de núcleo rígido em edifícios com lajes lisas é comumente formado por pilares-paredes de concreto armado em formato de "U" ou

"L", localizados nas regiões das caixas de elevadores e escadas, como podem ser vistos na figura 2-25.

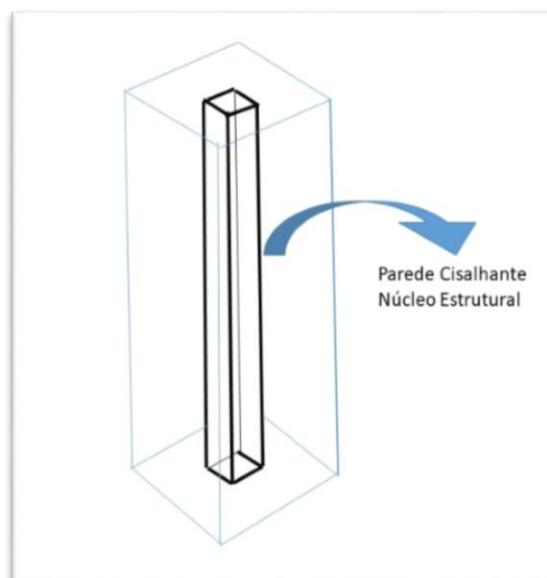
CHING, ONOUYE e ZUBERBUHLER (2009) recomenda um posicionamento centralizado para os núcleos rígidos afim de se evitar excentricidades entre o centro de massa e centro de rigidez do edifício, exemplo observado na figura 2-26. Mas salienta que, independentemente da posição o ideal é a utilização de um elemento fechado, em formato de tubo, podendo inclusive ser enrijecido por barras metálicas se possível for. Usa-se, portanto, modelos tridimensionais.

Figura 2-25 - Núcleos rígidos em planta.



Fonte: Adaptado, SILVEIRA (2012).

Figura 2-26 - Sistema de contraventamento por núcleo rígido.

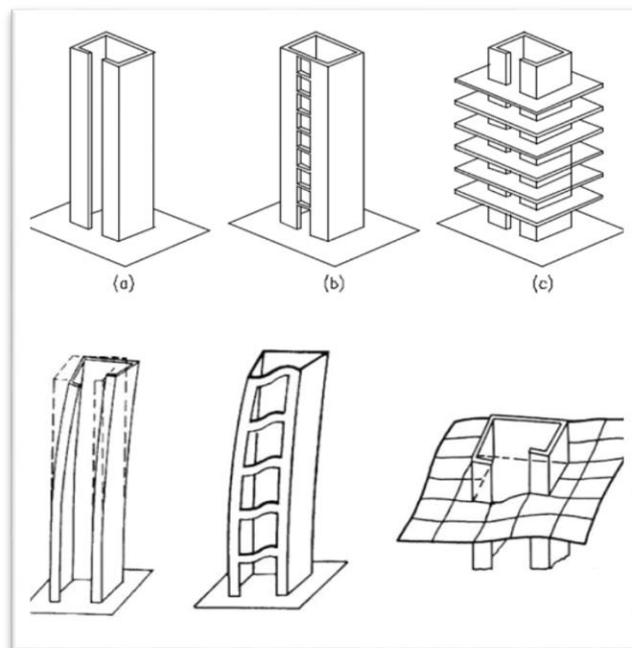


Fonte: Adaptado. CHING, ONOUYE e ZUBERBUHLER (2009).

A consideração da rigidez à flexão transversal das lajes, associada com vigas normalmente localizadas sobre vãos de portas de elevadores, ou no caso de lajes protendidas com as cordoalhas sobre os pilares, enrijecem o núcleo estrutural restringido parcialmente o empenamento da seção, figura 2-27, reduzindo assim os deslocamentos laterais, e conseqüentemente os efeitos de 2ª ordem.

Os núcleos estruturais sendo parcialmente fechados pelas vigas, lintéis ou lajes, estes elementos contribuem com suas resistências à flexão para diminuir o empenamento. [...]. Segundo MATIAS JR. (1997) a característica principal que distingue os núcleos estruturais dos demais sistemas estruturais é a sua capacidade de absorver as cargas horizontais. [...]. Sendo os núcleos estruturais parcialmente fechados pelas vigas, lintéis ou lajes, estes elementos contribuem com suas resistências à flexão para diminuir as deformações na direção do empenamento. Em alguns edifícios altos eles podem isoladamente constituir a estrutura, absorvendo tanto os esforços horizontais como verticais; nestes casos as tensões devido às deformações por flexão e empenamento podem ter a mesma ordem de grandeza, devendo ser ambas consideradas, o que exige conhecimentos da teoria da flexo-torção. No exemplo formado por dois núcleos simétricos, deve-se salienta que quando não se considera a rigidez da laje, os esforços normais no núcleo, esforço normal e bimomento, são nulos. Porém quando se considera a rigidez transversal à flexão há o impedimento parcial do empenamento do núcleo na direção longitudinal de sua seção transversal, e, portanto, aparecem os esforços normais e os bi momentos, que são iguais e de sinais opostos (MARTINS, 2001).

Figura 2-27 - Restrição ao empenamento do núcleo rígido.



Fonte: MARTINS (2001).

3 PAVIMENTOS DE LAJES LISAS COM CORDOALHAS ENGRAXADAS E PERCEPÇÃO DOS ENGENHEIROS DE CÁLCULO ESTRUTURAL, CONSTRUTORAS E ACADÊMICOS DIANTE DESTE SISTEMA

Neste capítulo são apresentados tópicos de projeto, detalhamento e de execução no uso da protensão em pavimentos com lajes lisas. Também são citados alguns conceitos gerais para demonstrar as particularidades deste sistema em relação ao tradicional.

Concomitantemente são apresentadas algumas diferenças na análise de cálculo que os engenheiros de cálculo estrutural se deparam e também na necessidade do uso de programas de computadores específicos.

Devido à falta de dados sobre obras de concreto protendido junto aos órgãos competentes tais como a prefeitura municipal, conselho regional de engenharia e associação de engenharia, criou-se um texto sobre, a percepção dos engenheiros de cálculo estrutural, construtoras e acadêmicos deste sistema (laje lisa com cordoalha engraxada) obtido por meio de entrevistas a profissionais que trabalham com prédios de múltiplos andares (projeto e detalhamento, execução e ensino).

3.1 CONCEITOS ESPECÍFICOS DA PROTENSÃO

Conforme descrito por CHOLFE e BONILHA (2018), ao longo do último século, observamos uma espantosa evolução da engenharia das estruturas civis, tanto metálicas quanto as de concreto. Essa evolução ocorreu em três grandes grupos: dos materiais estruturais, dos processos de cálculos, projetos, e dos métodos e procedimentos construtivos.

Os materiais, que são representados basicamente pelo concreto e pelo aço, possuem hoje características especiais de performance e resistência. A tecnologia desenvolveu novas aditivos/adições, que, incorporados ao concreto, garantiram melhorias de qualidade, durabilidade e aumento da resistência a valores que ultrapassam com facilidade a marca dos 50 MPa. Surgiram, em decorrência, os concretos especiais de alto desempenho (CAD), os autoadensáveis (CAA) e outros

de uso corrente na construção das estruturas. O emprego adequado desses concretos tem produzido estruturas mais seguras e duráveis, isto é uma realidade aceita por todos os setores envolvidos na produção e projetos, e propriamente a execução das estruturas.

Ainda de acordo com CHOLFE e BONILHA (2018), em relação ao aço, considerado a mais versátil e a mais importante das ligas metálicas, o desenvolvimento industrial disponibilizou no mercado os chamados aços-carbono, com aplicações importantes para as estruturas concreto armado (CA 50 e CA 60) e concreto protendido (CP 190 e CP 210). Nas estruturas modernas, tornou-se comum o uso de cordoalhas engraxadas, simplificando e popularizando a aplicação da protensão, principalmente em lajes e pré-moldados, porém, como intuito de nosso trabalho é desmistificar o uso para estruturas moldadas no local, são também vistos argumentos a este respeito ao longo deste trabalho.

As metodologias para execução de cálculo de projetos estruturais começaram a apresentar grande impulso a partir da década de sessenta conforme pode-se constatar também na obra de CHOLFE e BONILHA (2018). A técnica de definir de forma semi-estatística as variáveis estruturais (ações e resistências) e o método dos estados limites permitiram ao engenheiro de cálculo estrutural desenvolver formulações mais claras para verificar a segurança e o desempenho das construções, e conseqüentemente na base de todo projeto de estrutural.

A análise estrutural com auxílio de computadores e programas de alta capacidade também teve um papel importante ao ampliar a possibilidade de uso de modelos sofisticados, dotados de processamento rápidos e confiáveis. As simulações podem ser lineares ou não lineares (geometria e materiais), com respostas estáticas ou dinâmicas. Para o prédio que será resolvido como exemplo neste trabalho empregou-se o programa comercial TQS V.20 (2018).

Ainda afirmam CHOLFE e BONILHA (2018), que profissionais de projeto contam com programas integrados de cálculo e desenhos para aumentar a produtividade e a qualidade do detalhamento gráfico dos elementos das estruturas. Vale ressaltar que a criação dos ambientes colaborativos promoveu a integração das diversas disciplinas do projeto (arquitetura, estrutura, instalações, mecânica e outras), com transmissão instantânea e troca de arquivos via internet.

O sistema BIM (Buildings Information Model), em implantação no país e no mundo, já permite que engenheiros das diversas especialidades desenvolvam os seus projetos por meio da modelagem da mesma edificação e alimentem simultaneamente o sistema que vai verificar automaticamente eventuais interferências. Este sistema também permite controlar informações sobre materiais, orçamento, cronograma e histórico do empreendimento, ou seja, está sendo desenvolvido para todo o acompanhamento da edificação desde a sua concepção até o final da sua vida útil. Neste trabalho ainda não se abordará tal técnica.

Em relação a técnica dos procedimentos construtivos, as máquinas e os equipamentos passaram a realizar tarefas que costumavam ser executadas manualmente por operários construtores. O transporte a montagem de materiais e peças foram otimizados e passaram a possibilitar significativas reduções nos prazos das obras, que é aqui que a protensão com concreto com cordoalhas engraxadas e lajes lisas são mais eficientes ainda.

Enfoca CHOLFE E BONILHA (2018), que a protensão, também encarada como um sistema construtivo (por meio da aplicação de forças externas nas seções fletidas/tracionadas de concreto), propiciou um maior aproveitamento estrutural, com aumento das capacidades resistentes, redução das deformações e melhorias de durabilidade e uso, como veremos mais detalhadamente a frente em nosso modelo de um edifício executado na cidade de Ribeirão Preto. A protensão teve influência decisiva na industrialização da construção civil, com a produção em série de peças pré-moldadas: lajes, vigas, estacas e painéis de fachada e que tange na agilidade a maior qualidade estrutural, mesmo em estruturas executadas no local.

A própria NBR 6118:2014 pode ser considerada uma consequência da evolução da engenharia das estruturas de concreto. Trata-se, portanto, como podemos observar, de uma norma moderna, que está nivelada a outros códigos internacionais e servirá como base para a apresentação deste trabalho.

Muitas são as aplicações práticas da protensão. Esse sistema atinge obras de grande porte (pontes, viadutos), médio porte (edifícios) e também leves pré-moldados. Porém, de acordo com uma pesquisa do IBGE (2018), a construção de edifícios é a maior geradora de riquezas na construção civil, representando 74 bilhões de reais, seguido pela infraestrutura que gera 65 bilhões de reais e serviços especializados 39,4

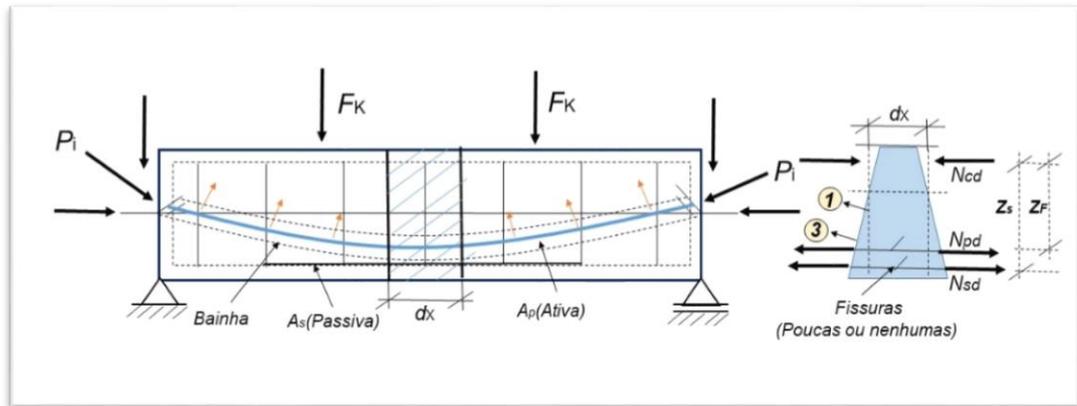
bilhões de reais respectivamente, como já informados anteriormente em nosso trabalho.

3.2 O CONCRETO ESTRUTURAL

É de extrema importância que se conheçam os componentes que se inter-relacionam para formar o concreto protendido e o concreto armado, esta conceituação está descrita a seguir conforme a NBR 6118:2014, temos, portanto, as seguintes definições de concreto:

- a) Concreto Simples: são elementos sem quaisquer armaduras ou com quantidade inferior a armadura descrita como mínima, descrita no item 3.1.2 da NBR 6118:2014.
- b) Concreto Armado: são elementos cujo comportamento estrutural depende da aderência entre o respectivo concreto e a armadura, sem aplicação de alongamentos iniciais nas armaduras antes da materialização dessa aderência, descrita no item 3.1.3 da NBR 6118:2014.
- c) Armadura Passiva (A_s): não é pré-alongada, ou seja, são os aços apresentados na forma de barras ou fios, conforme descrito no item 3.1.5 da NBR 6118:2014.
- d) Concreto protendido: são os elementos nos quais parte das armaduras são previamente alongadas, ou seja, a protensão, com a finalidade de, em Estado Limite de Serviço (ELS), reduzir fissuras e deslocamentos e, no Estado Limite Ultimo (ELU), propiciar melhor aproveitamento de aços, especiais conforme descrito no item 3.1.4 da NBR 6118.
- e) Armadura Ativa (A_p): são as armaduras pré-alongadas para produzir forças de protensão, descritas do item 3.1.6 da NBR 6118:2014. Podemos observar nas figuras 3-1 e 3-2 o esquema prático de uma viga com protensão, em suas etapas de trabalho:

Figura 3-1 - Viga de concreto protendido.



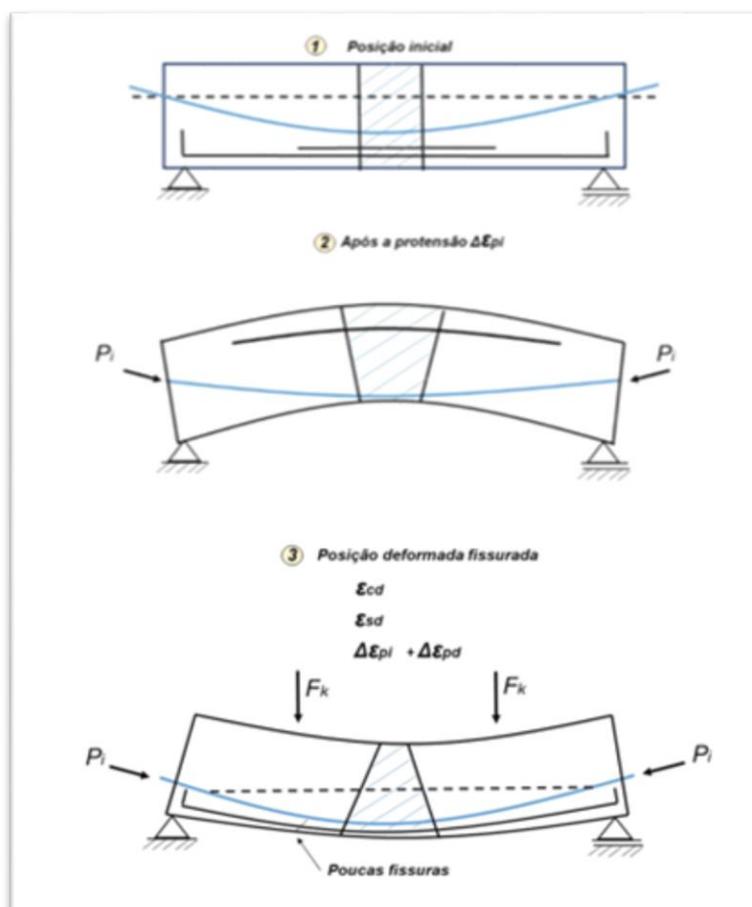
Fonte: Adaptado, CHOLFE e BONILHA (2018).

É importante informar que nas lajes lisas com uso de pós tração moldadas no local, as extremidades ativas e passivas das cordoalhas engraxadas são posicionadas na horizontal e não em um ângulo diferente como mostrado nas figuras 3.1 e 3.2, isto se dá pela dificuldade de se definir um ângulo diferente no momento da montagem e concretagem da laje no local. Isso se faz necessário para facilitar a execução, desta maneira os programas existentes para cálculo de lajes lisas com pós tração já fazem este detalhamento, os programas usuais no Brasil com essa capacidade de detalhamento do perfil de cabos são somente o TQS (2018) e o ADAPT (2018), os outros programas não fazem o detalhamento, pode isso ser um dos motivos a dificultar o uso do sistema de laje lisa protendida na região de Ribeirão Preto. Há programas de análise que permitem calcular os esforços de protensão, mas, não fazem a parte de detalhamento.

Algumas diferenças marcantes entre os sistemas de lajes lisas protendidas, em relação ao sistema convencional são: nas estruturas protendidas, normalmente, surgem esforços hiperestáticos de protensão e diferentemente das estruturas de concreto armado não há uma única solução de armadura pois há influência no traçado vertical (perfil) dos cabos. Assim, após cálculos de esforços no pavimento, sem considerar a protensão, imagina-se uma quantidade de cabos (com trajetórias definidas em planta e elevação) e depois calculam-se os esforços do efeito destes (a protensão). A aceitação da armadura é sempre feita pelo engenheiro que calcula. Ele deve, com auxílio de um programa, verificar se as trajetórias, as quantidades de cordoalha estão adequadas, usando, entre outras coisas os resultados apresentados nos relatórios de limites de tensão no concreto para aprovar uma solução que atenda

as condições de norma de concreto. Nos projetos com protensão, não há, em geral, a possibilidade de automação total, como no concreto armado. No sistema convencional dada uma planta de forma de piso com ações, elementos geométricos e materiais definidos, realizado o cálculo (por programa) de esforços e armaduras e não se encontrando erros a planta de armadura pode ser gerada pelo próprio programa, em seguida, sem mesmo a intervenção de alguém. Sob este aspecto, portanto, o cálculo de lajes protendidas pode ser mais difícil em relação ao concreto armado. O hiperestático é inerente ao processo de cálculo de estruturas protendidas, este fenômeno pode ser entendido com maior riqueza de detalhes em CARVALHO (2017).

Figura 3-2 – Esquema simples de uma viga de concreto protendido.



Fonte: Adaptado, CHOLFE e BONILHA (2018).

A solução da viga acima de concreto protendido consiste no estudo do equilíbrio das diversas seções resistentes, levando-se em conta a geometria, os materiais e as solicitações externas.

Em relação a protensão pode-se destacar ainda algumas qualidades como:

- a) A protensão se consolidou como ferramenta de qualidade na Construção Civil;
- b) Solução economicamente viável, mesmo para edificações com vãos médios
- c) Permita um maior controle de deformações e fissuras;
- d) Deve gerar uma maior durabilidade da estrutura;
- e) Execução rápida: fôrmas planas, menor taxa de armadura (o aço é cerca de três vezes mais resistente que o aço comum);
- f) Maior espaço livre: liberdade para o arquiteto e principalmente para o cliente.

3.3 CORDOALHAS ENGRAXADAS

Elementos em concreto protendido são aqueles nos quais parte das armaduras são previamente alongadas 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). Em obras específicas como a de CARVALHO (2017) entre outros pode-se ver os diversos tipos de protensão. Neste trabalho será unicamente usada a protensão sem aderência e com pós tração, ou seja, usando cordoalha engraxada.

Mostra-se nas figuras 3-3,3-4 e 3-5 detalhes das cordoalhas engraxadas e seus complementos para orientação e verificação.

Figura 3-3 - Cordoalhas engraxadas, seus detalhes.



Fonte: Seminário protensão de A à Z, Ribeirão Preto, Impacto Protensão (2016).

Figura 3-4 - Cordoalhas engraxadas, seus detalhes.



Fonte: Seminário protensão de A à Z, Ribeirão Preto, Impacto Protensão (2016).

As cordoalhas engraxadas, pós-tracionadas não aderentes podem ser definidas como a armadura de protensão. Estas cordoalhas são inseridas no interior de bainhas que a isolam do concreto, seguindo elevações pré-estabelecidas em projeto. Após a concretagem, quando o concreto tiver atingido a resistência desejada, os cabos são tracionados e ancorados nas extremidades da peça, onde o aço fica permanentemente sem aderência com o concreto durante toda a vida da estrutura;

Figura 3-5 - Cordoalhas engraxadas, seus detalhes



Fonte: seminário protensão de A à Z, Ribeirão Preto, impacto protensão (2016).

Na figura 3-6, é mostrada uma laje com uso de protensão em cordoalhas engraxadas preparada para concretagem. É importante salientar que em um sentido desta laje se encontram feixes com quatro cordoalhas e na outra direção três cordoalhas, as cordoalhas se encontram juntas, encostadas umas às outras, pois diferentemente das armaduras passivas não precisam neste ponto ter aderência ao concreto. Toda aderência se dá pelas ancoragens extremas.

Ainda em relação à figura 3-6, podem ser observadas também os espaçadores abaixo das cordoalhas, cujas alturas são definidas pelo engenheiro de cálculo estrutural, sendo que o perfil do cabo é enviado em projeto para a obra poder executar de forma mais precisa possível, desta maneira os operários e o engenheiro residente precisam se atentarem para estes detalhes, que são de extrema importância em lajes protendidas, haja vista que as cordoalhas serão responsáveis pela distribuição das forças após sua protensão. É importante que a equipe de concretagem e de instalações prediais sejam bem treinadas para que não comprometam as posições das cordoalhas devido suas intervenções, caso contrário é possível que hajam falhas graves no momento da protensão, detalhes em CARVALHO (2017).

Figura 3-6 - Cordoalhas engraxadas, seus detalhes em laje e espaçadores sob cabos.

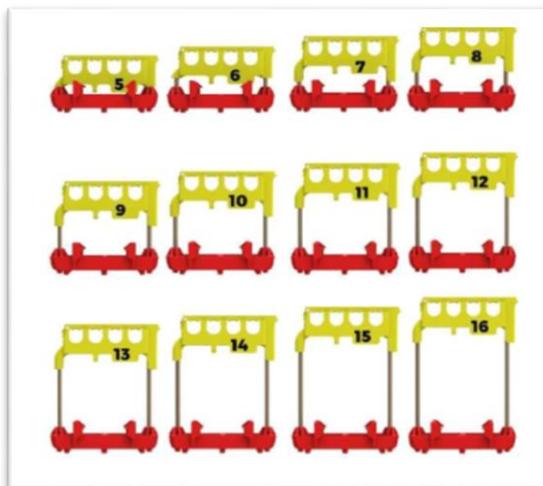


Fonte: Adaptado, seminário protensão de A à Z, Ribeirão Preto, Impacto Protensão (2016).

Devido à grande importância de se manter o perfil dos cabos de protensão conforme o projeto estrutural, já existem espaçadores mais modernos e confiáveis que travam os cabos paralelamente uns aos outros, sem a necessidade de amarrá-los

com arames, estes espaçadores que são também conhecidos como “cadeirinhas” do modelo garra, conforme MOREIRA (2017), também possuem alturas definidas já oriundas de fábrica, afim de facilitar o trabalho em obra para posicionar corretamente os cabos, colaborando de uma forma mais precisa no atendimento das especificações solicitadas em projeto, conforme pode ser observado na figura 3-7

Figura 3-7 – Cadeirinhas modelo agarra cabos com alturas específicas já definidas.

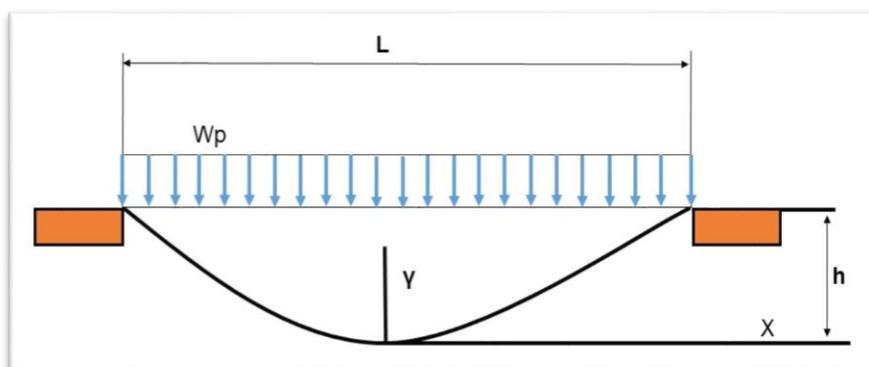


Fonte: MOREIRA (2017).

3.4 ABORDAGEM BÁSICA DE CÁLCULO

Para MAGLIORI JR (2016), o conceito de protensão, são cabos suspensos apenas nas extremidades e sujeitos a carga uniforme no vão estão apenas tracionados e adquirem a forma de uma parábola do segundo grau, conforme mostrado na figura 3-8 a seguir:

Figura 3-8 - Cabos formam uma parábola.

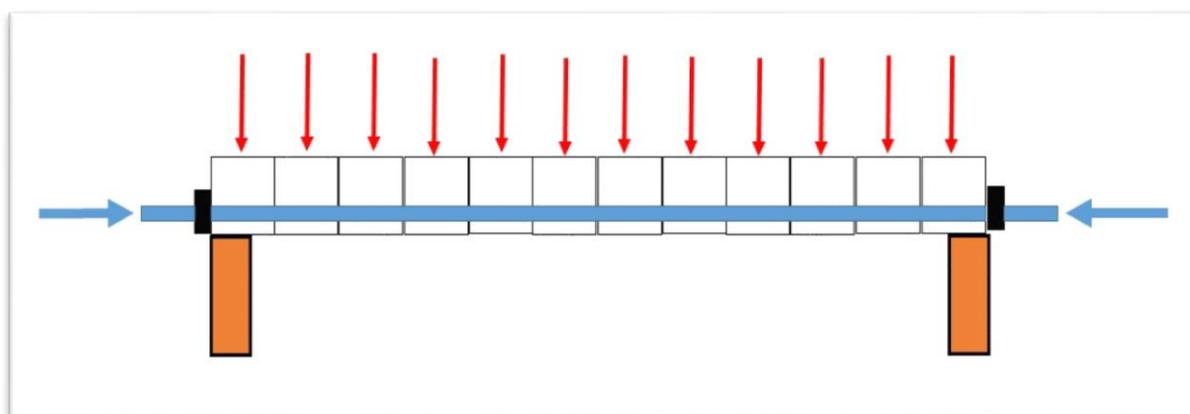


Fonte: Adaptado, Seminário protensão de A à Z, Ribeirão Preto, Impacto Protensão (2016).

O conceito ainda pode ser explicado, conforme MAGLIORI JR (2016), se utilizando de um simples exemplo, uma série de blocos de concreto apenas justapostos (aduelas) não pode resistir aos esforços de flexão sequer do peso próprio. Comprimindo externamente o conjunto é possível aplicar ações que originam flexões maiores e opostas do que aquelas do peso próprio.

Um cabo tracionado com forma parabólica preso nas extremidades e montado no interior de uma massa de concreto tende a retificar, comprimindo e suspendendo o conjunto. Observa-se na figura 3-9, uma exemplificação de protensão.

Figura 3-9 - Exemplificação de protensão.



Fonte: Adaptado, Seminário protensão de A à Z, Ribeirão Preto, Impacto Protensão (2016).

3.4.1 Perdas de tensões

Outra novidade para quem faz só projeto de concreto armado está no fato em que os esforços na estrutura protendida mudam ao longo do tempo. A protensão não é constante ao longo do tempo. Costuma decrescer devido a efeitos iniciais (deformação do concreto, perda por atrito cabo bainha e deformação da ancoragem) assim como com o passar do tempo (relativa aos efeitos de retração e fluência do concreto, além da relaxação da armadura). Ao valor das diminuições de protensão se dá o nome de perda. De acordo com CARVALHO (2017), o método geral de cálculo (cálculo para perdas progressivas quando não são satisfeitas as condições estabelecidas) quando as ações permanentes (carga permanente ou protensão) são aplicadas parceladamente em idades diferentes, é preciso considerar a fluência de cada uma das camadas de concreto e a relaxação de cada cabo, separadamente.

Permite-se as substituições das seções transversais compostas de diferentes camadas, por prismas equivalentes que se comportam como camadas discretas. Permite-se, a favor da segurança, a consideração isolada da relaxação de cada cabo independentemente da aplicação posterior de outros esforços permanentes.

De acordo com FRANÇA (2015) força efetiva de pretensão é variável ao longo do cabo e menor do que a aplicada pelo dispositivo de pretensão. Esta redução de força é chamada de perda de pretensão. Ela é devida a várias causas.

Costuma-se agrupar as perdas em dois conjuntos:

- A. Perdas imediatas que ocorrem durante o estiramento e ancoragem dos cabos;
- B. Perdas progressivas, que ocorrem ao longo do tempo.

No caso comum de concreto protendido com aderência posterior, constituem perdas imediatas, aquelas provenientes de:

- a) Atrito entre o cabo e a bainha;
- b) Acomodação do cabo nas ancoragens;
- c) Encurtamento do concreto durante a operação de protensão. As perdas progressivas são provocadas pela: retração e fluência do concreto e relaxação da armadura de protensão.

3.5 TIPOS DE CORDOALHAS ENGRAXADAS

Os aços para concreto protendido são fabricados desde 1952 no Brasil pela Belgo Bekaert Arames, dentro dos mais elevados padrões de qualidade, e representam o que existe de melhor em aço-carbono no mundo.

Hoje no Brasil, estão disponíveis as cordoalhas de 7 fios engraxadas e plastificadas, sendo CP 190 e CP 210, suas características são:

- fabricadas por meio de processo contínuo;
- possuem camada de graxa e são revestidas de PEAD (polietileno de alta densidade) extrusado diretamente sobre a cordoalha já engraxada, em toda a sua extensão;
- características mecânicas idênticas às das cordoalhas sem revestimento;

- atendem a norma NBR 7483:2003;
- são revestidas em plástico e graxa, de acordo com as especificações do PTI (Post-Tensioning Institute);
- massa aproximada (kg/km): $\varnothing 12,70 = 890$ / $\varnothing 15,20 = 1.240$.

As cordoalhas são divididas em dois grupos, em cor azul, CP 190 e as em cor laranja, CP 210, estas cores são utilizadas para diferenciá-las de acordo com suas resistências, pois não podem ser confundidas, haja vista, que cada uma deve ser tratada de maneira diferente no momento da protensão, na figura 3-10 observa-se a diferença de cores entre os dois tipos de cabos, o que é de fundamental importância no momento de sua aplicação nas peças a serem concretadas. Já na figura 3-11 podemos verificar as características técnicas de cada tipologia de cordoalha, tornando evidente a necessidade de poder diferenciá-las visivelmente.

Figura 3-10 - Cordoalhas engraxadas CP-190 e CP-210.



Fonte: Catálogo técnico Arcelor Mittal (2019).

Figura 3-11 - Especificações das cordoalhas engraxadas CP-190 e CP-210.

ESPECIFICAÇÕES DOS PRODUTOS - CORDOALHAS PARA PROTENSÃO ENGRAXADAS E PLASTIFICADAS							
Produto	Diâmetro nominal (mm)	Área aprox. (mm ²)	Área mínima (mm ²)	Massa aprox. (kg/1.000 m)	Carga mínima de ruptura (KN)	Carga mínima à 1% de deformação (KN)	Alongamento após ruptura (%)
Cordoalhas de 7 fios CP 190, cor azul							
Cord. CP 190 RB 12,70	12,7	101	99	792	187	169	
Cord. CP 190 RB 15,20	15,2	143	140	1126	265	239	3,5
Cord. CP 190 RB 15,70	15,7	150	147	1172	279	246	
Cordoalhas de 7 fios CP 210, cor laranja							
Cord. CP 210 RB 12,70	12,7	101	99	792	203	183	
Cord. CP 210 RB 15,20	15,2	143	140	1126	288	259	3,5
Cord. CP 210 RB 15,70	15,7	150	147	1172	308	277	

Fonte: Adaptado, catálogo técnico Arcelor Mittal (2019).

3.6 PERCEPÇÃO DOS ENGENHEIROS DE CÁLCULO ESTRUTURAL, CONSTRUTORAS E ACADÊMICOS DIANTE O SISTEMA DE CONCRETO PROTENDIDO COM CORDOALHAS ENGRAXADAS

Como parte do desenvolvimento da tese, a procura por materiais nacionais que são referências sobre o tema, nos leva aos cinco principais autores/acadêmicos precursores sobre o assunto no Brasil, aos quais possuem as edições mais atuais sobre o tema de concreto protendido, que são os professores Roberto Chust Carvalho, Luiz Cholfe, Luciana André Sanvito Bonilha e José Sérgio dos Santos, com suas respectivas obras: Estruturas em Concreto Protendido – Pré-Tração, Pós-Tração, Cálculo e Detalhamento, editado em 2017 (Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho – UFSCar), Concreto Protendido Teoria e Prática, editado em 2018 (Prof. M.Sc. Luiz Cholfe e Prof.^a M.Sc. Luciana André Sevilha Bonilha - Mackenzie) e o livro Desconstruindo o Projeto Estrutural de Edifícios, Concreto Armado e Protendido, editado em 2018 (Prof. Dr. José Sérgio dos Santos – IFCE), e também o Prof. e engenheiro de cálculo estrutural Evandro Porto Duarte, diretor da MAC-Protensão, é o responsável por mais de 1400 obras protendidas no Brasil e no exterior. Formado

em engenharia civil pela Pontifícia Universidade Católica (PUC) do Rio de Janeiro, em 1971, foi professor de hiperestática e concreto protendido, na PUC-RJ, de 1971 a 1975, no Instituto Militar de Engenharia (IME), de 1998 a 2004, e na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), de 1977 a 2011. Outros professores foram contatados, porém, por motivos diversos acabaram não respondendo a tempo os questionários.

Detalhando melhor o currículo dos professores consultados segue-se um breve resumo dos mesmos:

- Prof. M.Sc. Luiz Cholfe – Engenheiro Civil, autor de livros, dentre eles o livro mais atual sobre concreto protendido no Brasil, publicado em 2018 “Concreto Protendido: Teoria e Prática”, Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie - EEUPM, SP - Brasil. É Professor do Departamento de Estruturas do Departamento de Estruturas da EEUPM desde 1974 e responsável pela disciplina de Concreto Protendido.

É sócio fundador e diretor responsável da STATURA Engenharia e Projetos Ltda. (1975), empresa de consultoria e projetos estruturais (concreto armado/protendido e metálica, com mais de 1800 trabalhos implantados no território brasileiro. É membro da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) e do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON).

- Prof.^a M.Sc. Luciana André Sanvito Bonilha – Engenheira Civil, autora de livros, dentre eles o livro mais atual sobre concreto protendido no Brasil, publicado em 2018 “Concreto Protendido: Teoria e Prática”, Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie - EEUPM, SP - Brasil. É Professora da disciplina de Estruturas de Concreto Protendido da EEUPM desde 1974 e responsável pela disciplina de Concreto Protendido na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie desde 1991. Desde formada, atua profissionalmente como engenheira de estruturas em projetos industriais, comerciais, institucionais e residenciais, projetando soluções em concreto armado, concreto protendido e estruturas metálicas. É sócia e diretora técnica da Statura Engenharia e Projetos Ltda, onde exerce atividades de gerenciamento de

projetos e obras, desenvolvimento de projetos de estruturas e acompanhamento técnicos em obras.

- Prof. e engenheiro de cálculo estrutural Evandro Porto Duarte, que é autor de mais de 350 projetos de Obras de Arte – pontes e viadutos e de 15 obras portuárias, dentre elas o Porto de Itaqui, em São Luís do Maranhão. Diretor da Portante Engenharia, é o responsável técnico por mais de 2000 projetos estruturais e diretor da MAC-Protensão, é o responsável por mais de 1400 obras protendidas no Brasil e no exterior. Formado em engenharia civil pela Pontifícia Universidade Católica (PUC) do Rio de Janeiro, em 1971, foi professor de hiperestática e concreto protendido, na PUC-RJ, de 1971 a 1975, no Instituto Militar de Engenharia (IME), de 1998 a 2004, e na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), de 1977 a 2011. Além disso, proferiu palestras e cursos por todo o Brasil sobre a aplicação da protensão. Antes de fundar a Portante Engenharia e a Mac Protensão, Evandro Duarte foi gerente no escritório de projetos da STUP, empresa que introduziu o concreto protendido no Brasil.

Além das obras citadas acima obtidas para consulta, foram feitos contatos com os autores para melhor compreensão sobre a origem e o emprego do sistema construtivo de concreto protendido com cordoalhas engraxadas em lajes lisas em edifícios de múltiplos pavimentos no Brasil.

Concomitantemente fez-se contato com cinco conceituados engenheiros de cálculo estrutural da região de Ribeirão Preto.

Para estes profissionais, foram enviados uma série de perguntas (questionários), que apenas um não respondeu em tempo hábil.

Entrou-se em contato com quatro empresas construtoras que atuam Ribeirão Preto e região, que são empresas que podem utilizar o sistema estudado em neste trabalho, da mesma forma, enviou-se uma série de perguntas (questionários), que foram respondidas gentilmente. Estas informações foram utilizadas para entender sua percepção sobre o sistema de concreto protendido.

Os engenheiros de cálculo estrutural contatados e que responderam o questionário em tempo hábil são chamados aqui de Eng. 1, Eng. 2, Eng. 3 e Eng. 4, porém são descritas um breve histórico curricular:

- Eng. 1 – Engenheiro Civil, Escola de Engenharia do Centro Universitário Moura Lacerda - EECUML, Ribeirão Preto - SP - Brasil. Docente de uma universidade particular em Ribeirão Preto. É mestre pela Universidade Federal de São Carlos – (UFSCAR), já trabalhou nos dois mais renomados escritórios de projetos de estruturas de Ribeirão Preto.
- Eng. 2 – Engenheiro Civil, Escola de Engenharia do Centro Universitário Moura Lacerda - EECUML, Ribeirão Preto - SP - Brasil. Docente de uma universidade particular em Bebedouro. É mestre pela Universidade Federal de São Carlos – (UFSCAR), já trabalhou nos dois mais renomados escritórios de projetos de estruturas de Ribeirão Preto.
- Eng. 3 – Engenheiro Civil, Escola de Engenharia do Centro Universitário Moura Lacerda - EECUML, Ribeirão Preto - SP - Brasil. Docente de uma universidade particular em Ribeirão Preto e Taquaritinga. É mestre pela Universidade de São Paulo – (EESC-USP), já trabalhou em um grande escritório de projetos estruturais em Ribeirão Preto.
- Eng. 4 – Engenheiro Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Uberlândia- EECUFU, Uberlândia - MG - Brasil. Docente de uma universidade particular em Ribeirão Preto. É mestre pela Universidade Federal de Uberlândia- EECUFU, é diretor de um escritório de projetos estruturais em Ribeirão Preto.

As perguntas feitas para os autores acadêmicos do Mackenzie Prof. M.Sc. Luiz Cholfe, Prof.^a M.Sc. Luciana André Sanvito Bonilha e Prof. e Engenheiro de cálculo estrutural Evandro Porto Duarte, bem como suas respectivas respostas foram:

1. Na sua opinião, o sistema construtivo de lajes lisas protendidas em cordoalhas engraxadas em edificações de múltiplos pavimentos está conectado ao tempo de construção ou ao processo de manufatura?

Resposta Profs. Cholfe e Luciana: Sim, o sistema construtivo de lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas em edificações de múltiplos pavimentos está conectado ao tempo (prazo) e ao processo executivo. As formas são mais simples (assoalhos de fácil montagem e desmontagem) incluindo escoramentos. As

armaduras passivas podem ser constituídas por tela soldada e aço solto. As armaduras de punção, quando não se usa capiteis, podem ser pré-fabricadas (conectores de punção) e facilitam o correto posicionamento das armaduras superiores. Empresas como a TREJOR fornecem esse tipo de produto. As armaduras ativas constituídas por cordoalhas engraxadas (em geral isoladas ou agrupadas com no máximo 4 unidades) devem estar posicionadas corretamente para evitar esforços indesejados. A tarefa para o posicionamento adequado do cabo ao longo da laje, em razão também da pequena espessura (geralmente abaixo de 25cm), pode ser facilitada pelo uso de “cadeirinhas” e suportes reguláveis como a figura 3-12 a seguir.

Figura 3-12 - Suporte regulável para posicionamento adequado de cabos engraxados.



Fonte: Foto cedida gentilmente pela Prof^a. Luciana Bonilha e Prof. Luiz Cholfe.

Empresas como a Impacto, especialista em armaduras protendidas, desenvolvem dispositivos de apoio (“cadeirinhas”) para facilitar a montagem da cablagem da laje garantindo o posicionamento correto dos cabos.

A concretagem das lajes lisas também é muito simples com lançamento e adensamento facilitado pelos equipamentos disponíveis no mercado. A evolução da engenharia nos direciona para concreto auto adensáveis de alta resistência que otimiza ainda mais a estrutura.

Para antecipar a desforma e conseqüentemente reduzir o prazo da obra é comum se protender 50% dos cabos respeitando-se a resistência do concreto com pouca idade. O saldo da protensão pode ser executada logo em seguida com idade em torno de 7 dias.

Resposta Prof. Engenheiro de cálculo estrutural Evandro Porto Duarte:

Atualmente todos os sistemas construtivos prediais, seja em concreto armado, seja concreto protendido aderente e concreto protendido engraxado estão atendendo as necessidades executivas de prédios de múltiplos pisos.

Correntemente tem-se utilizado um ciclo de execução por laje de um mínimo de 7 dias (uma semana), a saber:

- A- Término da protensão do teto inferior;
- B- Retirada de parte do escoramento e montagem do escoramento do teto superior;
- C- Montagem das formas planas;
- D- Montagem das Armações de aço doce e de protensão;
- E- Concretagem e Cura da laje (normalmente esta concretagem termina na 6ª feira a tarde para que o concreto ganhe resistência desde 6ª feira final da tarde até 3ª feira de manhã);
- F- Início da protensão deste teto 3ª feira cedo e assim por diante, retoma-se o item “A”, no período da manhã de 3ª feira até o item “E” na 6ª feira a tarde.

2. Qual o procedimento quando se está planejando/projetando estruturas em lajes lisas em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas em edifícios de múltiplos pavimentos? Quais são os aspectos relevantes que devemos ter em mente para projetar a construção neste sistema?

Resposta Profs. Cholfe e Luciana: Os aspectos relevantes que devemos ter em mente no projeto de estruturas com lajes lisas, sempre em sintonia com os requerimentos arquitetônicos, são os seguintes:

- 1 Redução do número de pilares com pavimentos mais livres e garagens mais amplas;
- 2 Maiores vãos com peças mais esbeltas e com deformações controladas (muito importante);
- 3 Forros livres para tubulações e utilidades sem redução do pé direito dos andares;
- 4 Redução dos índices de forma e de aço e melhoria do custo/benefício;

- 5 Possibilidade de redução da altura da construção ou do acréscimo de pavimentos. Nos subsolos com lajes lisas as escavações e contenções serão reduzidas;
- 6 Nas lajes lisas protendidas podemos utilizar concretos de alto desempenho (com módulos maiores), incluindo concretos auto adensáveis;

Os procedimentos de cálculo/projeto são semelhantes aos de concreto armado com verificações dos estados limites últimos e de serviço. É importante o atendimento das recomendações da NBR 6118:2014 - tabela 13.4 onde se define o tipo de protensão (níveis 1, 2 e 3) conforme a classe de agressividade ambiental (CAA). No caso de lajes contínuas devem ser considerados os hiperestáticos de protensão.

Capitéis (engrossamento sobre os pilares) nas lajes ajudam nos efeitos de punção com dispensa de armaduras tipo conectores. Não esquecer das recomendações da Norma para segurança contra colapsos progressivos.

Resposta Prof. Engenheiro de cálculo estrutural Evandro Porto Duarte: A princípio melhor será que também o engenheiro de cálculo estrutural de arquitetura entenda e saiba as vantagens da protensão nas lajes lisas, pois sendo assim ele irá projetar uma arquitetura aonde se possa tirar partido de vãos estruturais da ordem de 7,0 ml.

Aspectos Relevantes:

- A- Que os pilares possam ficar embutidos nas alvenarias formando vãos de 7,0 ml (entre 5,0 e 7,0 ml). Muito saudável usar um vão de 7,0 ml pois além de ser um vão ótimo para lajes lisas protendidas, também pagina na garagem a utilização de 2 vagas de carros;
- B- Que estes pilares somados a caixa de escada e de elevadores deem rigidez horizontal ao prédio;
- C- Que a espessura de laje lisa protendida fornece um pé direito total que possibilita em um gabarito total de um prédio ter mais andares;
- D- Avaliar a possibilidade de usar o conceito de falsas vigas embutidas em um dos sentidos e uma laje considerada armada em uma só direção no outro sentido.

3. Quando se está considerando estrutura em lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas, você tem que ter em mente que a altura é uma preocupação, pois há custos para o deslocamento do material, mão de obra etc, o que teoricamente seriam as mesmas preocupações para a execução de um edifício de múltiplos pavimentos em concreto armado com uso de vigas. Desta maneira, em tese a maioria das empresas no Brasil, não teriam impecílios para mudança do processo de execução de estruturas em concreto armado com uso de vigas para o uso de concreto protendido em lajes lisas com cordoalhas engraxadas, mas, na verdade o que acontece, é que ao se propor este processo, somos barrados principalmente em quebrar um paradigma cultural. As estruturas no sistema estudado em nosso trabalho são mais ou menos influenciadas pelas alturas e liberdade arquitetônica?

Resposta Profs. Cholfe e Luciana: A movimentação vertical de materiais, serviços e pessoas nos edifícios de andares múltiplos é semelhante nas estruturas convencionais de concreto armado (com vigas internas) ou especiais de lajes lisas protendidas. A escolha da solução por parte das construtoras e dos engenheiros de cálculo estrutural, leva em conta a tradição e a experiência do empreendedor. As obras protendidas no Brasil, implantadas após a segunda guerra mundial utilizavam armadura com fios ou cordoalhas RN em bainhas metálicas com injeção posterior. As ancoragens e sistemas de protensão eram patenteados com domínio de poucas empresas. As dificuldades de materiais, equipamentos, mão de obra e qualidade técnica provocaram uma cultura negativa para as obras protendidas de maneira geral. As estruturas de concreto armado eram mais simples e de domínio popular com aplicação generalizada nos edifícios de andares múltiplos.

A partir da década de 80/90 com o desenvolvimento da engenharia, dos materiais concreto/aço e principalmente da cordoalha engraxada (CP190RB) com ancoragens e macacos individualizados, o concreto protendido em lajes lisas teve um incremento substancial com evolução que continua até os dias atuais.

O paradigma cultural que dificultava a adoção das lajes lisas protendidas foi fortemente reduzido com o aparecimento e popularização da cordoalha engraxada. Os sistemas de protensão, antes controlados por poucas empresas (patentes estrangeiras) perderam exclusividade diante da simplicidade construtiva das lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas.

Resposta Prof. Engenheiro de cálculo estrutural Evandro Porto Duarte:

Vou responder de forma enviesada esta pergunta, pois não existe tal preocupação acima descrita. Uma solução de laje lisa pode ser executada em concreto armado ou em concreto protendido, apenas no caso de uso do CA teremos uma maior espessura de laje (uns 25% a mais). Sendo assim, além desta laje ser bem mais pesada dando mais cargas nos pilares e na fundação, o dimensionamento desta será mais pesado tendo em vista que em um prédio o principal carregamento é o peso próprio.

Quando se usa a solução da laje lisa em concreto protendido se tem uma tripla vantagem, a saber: uma espessura e um gasto de concreto bem menor, uma menor reação de peso próprio nos pilares e fundação, e finalmente vencer maiores vãos com espessuras menores, viabilizando-se vãos no em torno de 7,0 ml, o qual dificilmente em concreto armado viabilizaria em laje lisa, conduzindo então para uso em CA de lajes apoiadas em vigas.

4) Autores, engenheiros de cálculo estrutural, acadêmicos que escrevem sobre construção em lajes protendidas em cordoalhas engraxadas dizem que este sistema é o futuro, como já é realidade a muito tempo nos EUA e em algumas poucas cidades no Brasil. Vejo grande potencial também, mas, não vejo muitas empresas, canteiros e pessoas tentando utilizar/construir/projetar estruturas como estas. Por quê? Por qual/quais motivos estas empresas utilizam o modelo de estrutura em concreto armado com vigas?

Resposta Profs. Cholfe e Luciana: Na evolução da engenharia das estruturas as lajes protendidas com cordoalhas engraxadas representam grande parte do futuro principalmente em projetos de vãos maiores e com limites mais rigorosos para as deformações. Nos casos de edifícios residenciais mais populares o concreto armado é uma solução adequada que está incrementada e industrializada com formas prontas, aços pré cortados/dobrados e até montados. A industrialização da construção será estendida também para as obras protendidas onde os cabos serão pré cortados e pré-montados de forma semelhante à das armaduras passivas. A simplificação e a padronização deve ser uma das metas para os futuros projetos de concreto protendido.

Resposta Prof. Engenheiro de cálculo estrutural Evandro Porto Duarte: No presente momento estamos vendo poucas obras de edificação como um todo, devido a recessão vigente, porém, mesmo assim temos no presente momento 4 prédios em São Paulo e 5 prédios no Rio de Janeiro em execução com este tipo de solução. Lógico frisar que não serão em todos os prédios viável esta aplicação, porém, temos visto uma utilização razoável ao longo do Brasil. Apenas, no momento temos um inconveniente que é o preço desequilibrado do aço de protensão por ser manufaturado por apenas uma única empresa daqui do Brasil.

5) Construções em lajes lisas com concreto protendido e uso de cordoalhas engraxadas oferecem melhoras na construtibilidade, velocidade do ciclo das lajes, estruturas com alta qualidade, controle de deformação e flexibilidade arquitetônica por exemplo. Comparadas as estruturas em concreto armado convencional com vigas e sem protensão, as vantagens são grandes. Mas, quando propomos a troca de sistemas para as construtoras, existem barreiras culturais à serem transpostas. Como não se faz necessário a mudança de equipamentos de transporte vertical de material de um edifício construído em concreto armado para um edifício construído em concreto protendido em cordoalhas engraxadas, já que o uso de formas e aços são menores e os custos não são maiores e as vantagens sim, como e o que faz a diferença em escolher uma estrutura de concreto armado convencional ao invés de uma estrutura de concreto protendido com cordoalhas engraxadas?

Resposta Profs. Cholfe e Luciana: A análise a ser feita para a escolha da solução armado ou protendido deve ser aplicada caso a caso. As facilidades construtivas e o chamado custo/benefício são elementos fundamentais na decisão.

Resposta Prof. Engenheiro de cálculo estrutural Evandro Porto Duarte: Importante frisar que o conhecimento e a técnica do engenheiro de cálculo estrutural deste tipo de obra devem ser utilizados, pois, com a transparência das informações e o correto lançamento estrutural e quantificação de custos levará ao construtor utilizar tal solução. Acoplado a este conhecimento vem a utilização adequada de ferramenta vital que é o “ Programa de Cálculo de Prédios em Lajes Lisas Protendidas“, o qual com certeza você e o mercado bem conhecem (TQS).

Foram feitas algumas perguntas aos engenheiros de cálculo estrutural da região de Ribeirão Preto, com intenção de se obter detalhes do sistema construtivo em estudo no que tange às solicitações de seus clientes para os projetos de edifícios de múltiplos pavimentos.

As perguntas feitas para os engenheiros de cálculo estrutural bem como suas respectivas respostas foram:

1. Seu escritório recebe pedidos de projetos estruturais de edifícios de múltiplos pavimentos?

Eng. 1: Sim, de vários estados diferentes.

Eng. 2: Sim. Características do empreendedor: Empresa (construtora) que iniciou com pequenas edificações e a cada obra foi aumentando o número de pavimentos (4; 8; 12; 20 etc.). Construtoras onde o processo construtivo tradicional ainda prevalece.

Eng. 3: Sim.

Eng. 4: Sim.

2. Geralmente as construtoras que lhes contratam já definem a tipologia de estrutura que querem usar? (Concreto armado, alvenaria estrutural, metálicas etc).

Eng. 1: Sim, os arquitetos e construtoras, já definem a tipologia segundo critérios e metodologia construtiva da empresa.

Eng. 2: Sim. O mais comum é o projeto já definir uma tipologia estrutural. Em alguns poucos casos, há uma etapa de estudos de soluções com tipologia diferentes; mas, o mais comum são estudos com arranjos estruturais diferentes (locação de pilares/dimensões dos painéis de lajes/etc.). Em edificações menores, há estudos com variação na tipologia das lajes (maciça; pré-fabricado; nervurada; etc), mas, para edificações maiores, a solução comum é em lajes maciças em concreto armado com uso de vigas.

Eng. 3: Não, após estudos, definimos o melhor sistema para a referida obra.

Eng. 4: Sim.

3. Alguma construtora lhes pedira para fazer um projeto estrutural em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas com lajes lisas?

Eng. 1: Não, mas, já foi apresentado solução mais viável com cordoalhas engraxadas. Porém, não viabilizada.

Eng. 2: Não. Nos casos em que é proposto este sistema estrutural, esbarra-se na disponibilidade de mão de obra especializada na região e necessidade de importação de “know-how” ou ainda na alteração da cultura de construção da empresa. A cerca de dois anos atrás, realizamos um estudo para um pavimento de transição de um empreendimento de quatro pavimentos em alvenaria estrutural. Neste estudo foram contemplados os seguintes sistemas estruturais: Concreto Armado; Metálico e Protendido. Após apresentação das vantagens e desvantagens de cada sistema, a opção do cliente foi para o sistema tradicional, mas adequada às características da sua mão de obra e cultura da construtora.

Eng. 3: Não.

Eng. 4: Não.

4. Se no caso, já lhe foi solicitado um projeto em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas, foi para uma obra em qual cidade?

Eng. 1: Utilizamos na cidade de Campinas em uma residência, laje nervurada protendida.

Eng. 2: Ribeirão Preto.

Eng. 3: Não há.

Eng. 4: Não há.

3.6.1 Análise dos dados obtidos com as entrevistas com os engenheiros de cálculo estrutural

Neste item se avalia as respostas obtidas por meio dos questionários enviados aos autores, engenheiro de cálculo estrutural e empresas que estão envolvidas na construção e desenvolvimento das técnicas de estruturas de edifícios altos com múltiplos pavimentos.

Análise das respostas obtidas com os autores foram:

Resumo geral: Fica claro na resposta da questão de número 1, que para os autores o uso de concreto protendido com cordoalhas engraxadas, atestam para a

estruturas uma grande qualidade e agilidade em sua execução, pelo desenvolvimento de materiais e mão de obra hoje verificada em nosso mercado.

Na resposta da questão número 2 os aspectos relevantes do projeto sempre terá que estar em sintonia com os requerimentos arquitetônicos, dentre eles: Redução do número de pilares com pavimentos mais livres e garagens mais amplas; Maiores vãos com peças mais esbeltas e com deformações controladas (muito importante); Forros livres para tubulações e utilidades sem redução do pé direito dos andares; Redução dos índices de forma e de aço e melhoria do custo/benefício; Possibilidade de redução da altura da construção ou do acréscimo de pavimentos. Nos subsolos com lajes lisas as escavações e contenções serão reduzidas; nas lajes lisas protendidas podem se utilizar concretos de alto desempenho (com módulos maiores), incluindo concretos auto adensáveis;

Na resposta da questão 3 a movimentação de materiais verticalmente está ligada mais e cultura das construtoras. As obras implantadas no Brasil em concreto protendido implantados no Brasil após segunda guerra mundial havia uma grande barreira no que tange às patentes de materiais, o que foi atenuado com o tempo.

A partir da década de 80/90 com o desenvolvimento da engenharia, dos materiais concreto/aço e principalmente da cordoalha engraxada (CP190RB) com ancoragens e macacos individualizados, o concreto protendido em lajes lisas teve um incremento substancial com evolução que continua até os dias atuais.

O paradigma cultural que dificultava a adoção das lajes lisas protendidas foi fortemente reduzido com o aparecimento e popularização da cordoalha engraxada. Os sistemas de protensão, antes controlados por poucas empresas (patentes estrangeiras) perderam exclusividade diante da simplicidade construtiva das lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas. Aqui neste último parágrafo é chancelado pelos autores a facilidade de execução destas estruturas.

Na resposta da questão 4 os autores acreditam que o desenvolvimento e difusão do concreto protendido realmente se faz presente na vanguarda dos projetos, que na verdade já é uma realidade em vários locais, sendo que a simplificação e a padronização deve ser uma das metas para os futuros projetos de concreto protendido.

Na resposta da questão 5 os autores afirmam análise a ser feita para a escolha da solução armado ou protendido deve ser aplicada caso a caso. Neste caso o Prof.

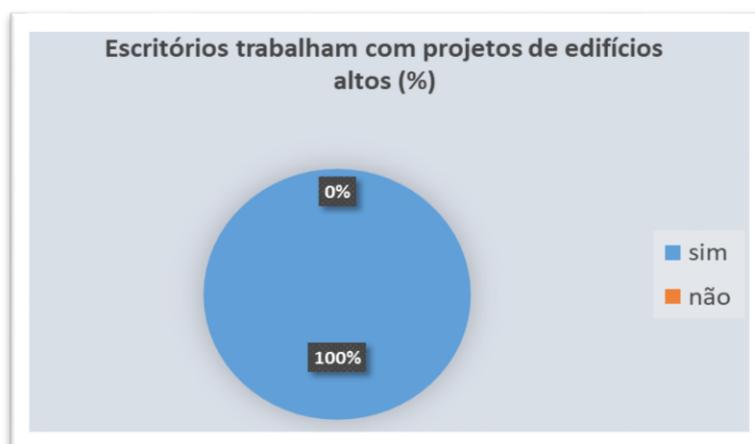
Evandro Porto Duarte salienta a importância do conhecimento e a técnica do engenheiro de cálculo estrutural deste tipo de obra, pois, com a transparência das informações e o correto lançamento estrutural e quantificação de custos levará ao construtor utilizar tal solução. Concomitante a este conhecimento vem a utilização adequada de ferramenta vital que é o “Programa de Cálculo de Prédios em Lajes Lisas Protendidas”, o qual com certeza o mercado bem conhece (TQS).

As facilidades construtivas e o chamado custo/benefício são elementos fundamentais na decisão. Neste caso este trabalho poderá mostrar em que a grande maioria das tipologias dos edifícios aqui elencados poderiam serem executados com tal tecnologia.

Análise das respostas obtidas com os engenheiros de cálculo estrutural:

Questão nº 1). Seu escritório recebe pedidos de projetos estruturais de edifícios de múltiplos pavimentos? Gráfico 3-1

Gráfico 3-1 - Projetos de edifícios altos nos escritórios pesquisados.

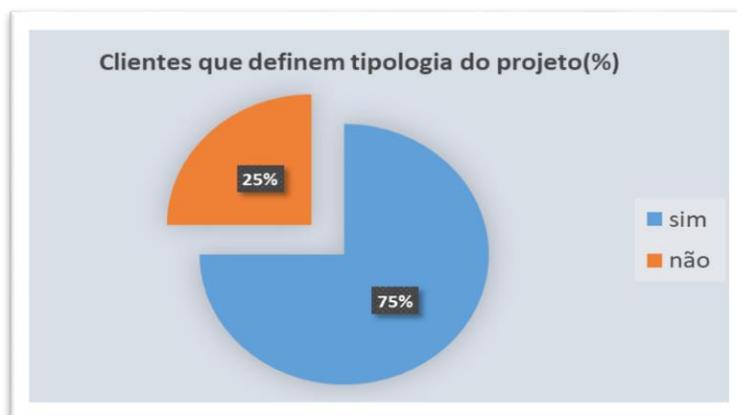


Fonte: próprio autor.

Verifica-se que 100% dos escritórios trabalham com projetos de edifícios altos, porém, também trabalham com projetos térreos, industriais, etc. Os dados mostrados anteriormente servem para formalizar que todos os escritórios pesquisados trabalham na execução de projetos de edifícios altos.

Questão nº 2). Geralmente as construtoras que lhes contratam já definem a tipologia de estrutura que querem usar? (Concreto armado, alvenaria estrutural, metálicas etc). Gráfico 3-2.

Gráfico 3-2 - Clientes que definem tipologia do projeto estrutural (%).

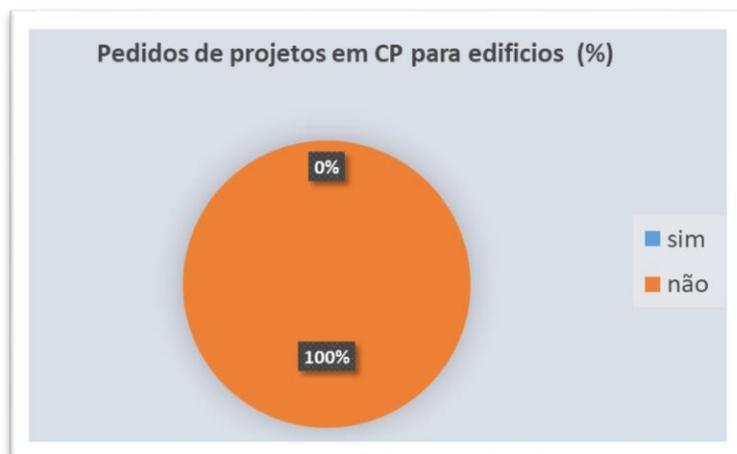


Fonte: próprio autor.

Se verifica que 75% dos escritórios, já recebem de seus clientes (construtoras), a tipologia das estruturas definidas, ou seja, não conseguem quebrar o aspecto cultural das estruturas em concreto armado.

Questão nº 3). Alguma construtora lhes pediu para fazer um projeto estrutural em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas com lajes lisas? Gráfico 3-3.

Gráfico 3-3 - Solicitação de projetos em concreto protendido por clientes (%).



Fonte: próprio autor.

Verifica-se que 100% dos escritórios, não receberam nenhum pedido de clientes para elaborarem projetos para edifícios altos com o uso de concreto armado em cordoalhas engraxadas com lajes lisas, o que corroboram em tese na quebra do paradigma cultural do uso de estruturas em concreto armado.

Questão nº 4). Se no caso, já lhe foi solicitado um projeto em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas, foi para uma obra em qual cidade?

É verificado com as respostas do item 3, que se não houveram pedidos de projetos em concreto protendido, não há cidades em que obras com esta tipologia de estrutura foram executadas.

A partir deste ponto descreve-se a percepção dos engenheiros envolvidos com a construção de prédios de múltiplos andares na região de Ribeirão Preto.

Por motivos de cunho acadêmico, as construtoras são referidas como construtoras A, B, C e D respectivamente, bem como seus representantes e cargos dentro da incorporação.

Todas as quatro construtoras atuam em Ribeirão Preto e região.

1. Construtora A – representada pelo Arq responsável pela área de gerenciamento de projetos. (Graduação em arquitetura e pós-graduado em gerenciamento de projetos).
2. Construtora B – representada pelo Eng. Civil responsável pelo gerenciamento das obras na cidade referida, (Graduação em engenharia civil e pós-graduado em gerenciamento de projetos).
3. Construtora C – representada pela Eng^a Civil responsável pelo departamento de planejamento e orçamento das obras na cidade referida, (Graduação em engenharia civil).
4. Construtora D – representada pelo Eng. Civil responsável pela diretoria técnica, (Graduação em engenharia civil).

As perguntas feitas para as construtoras bem como suas respectivas respostas foram:

1. Qual a altura dos edifícios que mais sua empresa constrói (ou número de pavimentos)?
 - Construtora A: De 4 a 16 pavimentos.
 - Construtora B: De 15 a 30 pavimentos.
 - Construtora C: Edifícios de 6 a 30 pavimentos.
 - Construtora D: Não tem uma regra, varia entre 14 e 28 Pavtos, o limitante é o Comar e o adensamento do local;

2. A maior parte é residencial ou comercial (em que proporção se for o caso)?

- Construtora A: Residencial.
- Construtora B: Exclusivamente residencial.
- Construtora C: Residencial.
- Construtora D: Residencial.

3. Que tipo de sistema estrutural (concreto armado, protendido, alvenaria estrutural ou pré-moldado) a empresa que representa utiliza para construção dos edifícios? O sistema tem relação com a altura do prédio?

- Construtora A: Não tem relação.
- Construtora B: O sistema utilizado é Concreto Armado, e tem relação com a altura do prédio à medida que a armação e as seções dos elementos estruturais vai diminuindo conforme o esforço necessário.
- Construtora C: Sim. Concreto armado com vigas de borda. Sim, tem a ver com a altura da edificação.
- Construtora D: A maior parte é em concreto armado, mas não temos objeção quanto ao sistema, o que tem ocorrido é que para conseguirmos um custo melhor as vezes estudamos a alternativa em alvenaria estrutural, aí nesse caso a altura do prédio fica limitada sim. Quando usamos esse sistema tentamos fazer 17 pavtos, mas, já construímos uma torre de 19 pavtos. Essa decisão acaba envolvendo a área de negócios, pois pode ser que não seja atingido o máximo potencial construtivo da área.

4. Por qual/quais motivos esta empresa utiliza este modelo de estrutura?

- Construtora A: Economia em custo e tempo.
- Construtora B: Modelo consagrado, mão-de-obra farta e com conhecimento adquirido.
- Construtora C: Prazo da obra na maioria dos empreendimentos
- Construtora D: Acho que a resposta acima explica essa

5. O tempo do ciclo de concretagem das lajes tem sido predominante nas construções dos prédios? Em geral de quantos dias é o ciclo?

- Construtora A: Sim, ciclo de dez dias.
- Construtora B: Sim, ciclo de 8 dias trabalhados.

- Construtora C: Sim, ciclos de 8 a 10 dias úteis.
- Construtora D: Para estrutura em concreto armado os ciclos são de seis dias trabalhados para o tipo e para alvenaria em torno de 10 dias, com potencial para chegar em oito, mas a média são de dez dias

6. Numere em ordem crescente (1 menos importante 9 mais importante) qual é a importância, para a empresa, ao seu ver da estrutura do pavimento:

- () sistema com poucas deformações;
- () sistema flexível a mudanças de arquitetura;
- () sistema mais rápido de ser executado;
- () sistema mais simples de ser executado;
- () sistema com pouca mão de obra;
- () sistema com menor possibilidade de erros ou desvios de conformidade;
- () sistema conhecido pela mão de obra;
- () sistema conhecido pelos engenheiro de cálculo estruturais de concreto e

Instalações;

- () sistema que apresenta menor custo final.

Construtora A: (4), (7), (8), (3), (1), (9), (6), (9), (9).

Construtora B: (6), (7), (9), (9), (9), (7), (6), (6), (9).

Construtora C: (9), (2), (9), (9), (9), (9), (9), (9), (9).

Construtora D: (4), (8), (7), (5), (6), (3), (2), (1), (9).

7. Qual o sistema que sua empresa usa para o pavimento (lajes e vigas, lajes nervuradas e vigas, lajes sem vigas (nervuradas ou não, lajes nervuradas)?

- Construtora A: Laje maciça.
- Construtora B: Lajes maciças e vigas.
- Construtora C: Lajes e vigas em concreto armado.
- Construtora D: Lajes e vigas e em alguns projetos um misto entre lajes lisas (laje cogumelo – sem vigas) com lajes e vigas. Para a periferia usamos lajes nervuradas

8. Qual o principal motivo, na sua opinião (ou da empresa) para usar este sistema?

- Construtora A: Economia.
- Construtora B: Engenheiro de cálculo estrutural e mão-de-obra de execução já conhecidos de longa data, com muitas obras entregues, conferindo a segurança necessária nesse item vital da construção do empreendimento.
- Construtora C: Sistema proposto pelo engenheiro de cálculo estrutural.
- Construtora D: É o mais consolidado e que traz melhor custo benefício. Mas, estamos estudando uma nova linha de produto com um sistema estrutural diferente, nesse caso nosso objetivo é tentar industrializar mais a nossas obras

9. A empresa, em algum momento, já sentiu a necessidade de mudar o modelo estrutural usado?

- Construtora A: Não.
- Construtora B: Até o momento não. A mudança enfrentaria alguma dificuldade em decorrência do histórico de sucesso do sistema atual.
- Construtora C: Guadalupe: Sim.
- Construtora D: Sim, conforme resposta anterior.

10. Já propuseram uma mudança do tipo da estrutura aos engenheiros de cálculo estrutural? Se positivo houve concordância por parte do engenheiro de cálculo estrutural? Se não por quais motivos?

- Construtora A: Não, pela experiência com o sistema adotado.
- Construtora B: Nunca foi proposto pela construtora ao projetista estrutural uma mudança no tipo da estrutura. Apenas questionamentos quanto ao tamanho de seções no sentido de economia de recursos. Houveram situações que os questionamentos foram acatados e outras em que foram rejeitados.
- Construtora C: Não, não houve.
- Construtora D: Sim, o tempo todo, sempre discutimos alternativas, mas, ficando apenas nas opções de protendida, concreto armado, cogumelo e alvenaria estrutural. Já estudamos um projeto mais baixo em concreto pré-fabricado, mas não viabilizamos.

11. Os engenheiros de cálculo estrutural já propuseram o uso de outro tipo de estrutura de concreto? (Ex: estrutura pré-moldada; concreto protendido, alvenaria estrutural, etc.?)

- Construtora A: Sim, estrutura em parede de concreto armado.
- Construtora B: Nunca foi proposto.
- Construtora C: Não.
- Construtora D: Sim, eles sempre fazem mais de uma alternativa de projeto para nós.

12. Se houve alguma mudança do tipo de estrutura usada, por qual motivo foi?

- Construtora A: Não houve estudo técnico de viabilidade para o sistema proposto.
- Construtora B: Gil: Não.
- Construtora C: Não houve.
- Construtora D: Com certeza para redução de custo ou ganho de produtividade.

13. Se houvesse outro tipo de estrutura que resultasse em menor custo, maior qualidade, menores deformações e conseqüentemente menos patologias, esta empresa poderia estudar sua viabilidade?

- Construtora A: Sim, com certeza.
- Construtora B: Absolutamente que sim, a empresa sempre busca melhorar as margens de lucro desde que não afete a qualidade dos seus produtos.
- Construtora C: Sim.
- Construtora D: Com certeza!

3.6.2 Análise dos dados obtidos com as construtoras

Neste item avalia-se de forma geral, as respostas obtidas por meio dos questionários enviados aos representantes das construtoras.

Questão 1). Qual a altura dos edifícios que mais sua empresa constrói (ou número de pavimentos)?

R: No geral as empresas trabalham com edificações com média de 25 pavimentos.

Questão 2). A maior parte é residencial ou comercial (em que proporção se for o caso)?

R: Todos representantes das construtoras informaram que os edifícios executados por eles foram residenciais, uma proporção de 100%.

Questão 3). Que tipo de sistema estrutural (concreto armado, protendido, alvenaria estrutural ou pré-moldado) a empresa que representa utiliza para construção dos edifícios? O sistema tem relação com a altura do prédio?

R: Uma das construtoras usa o sistema de alvenaria estrutural, pois, os dados internos informam que este tipo de estrutura é mais barato, as outras três usam concreto armado com lajes maciças e vigas e todas informaram que tem relação com a altura.

Questão 4). Por qual/quais motivos esta empresa utiliza este modelo de estrutura?

R: Uma construtora utiliza alvenaria estrutural pelo menor custo, uma pelo sistema já ser consagrado e outra pelos prazos apertados, ou seja, por uma questão de costume com o sistema.

Questão 5). O tempo do ciclo de concretagem das lajes tem sido predominante nas construções dos prédios? Em geral de quantos dias é o ciclo?

R: Observa-se que o tempo de ciclo é extremamente importante, que hoje giram em torno de 8 a 10 dias trabalhados (úteis).

Questão 6). Numere em ordem crescente (1 menos importante 9 mais importante) qual é a importância, para a empresa, ao seu ver da estrutura do pavimento:

(5, 75) sistema com poucas deformações;

(6, 00) sistema flexível a mudanças de arquitetura;

(8, 25) sistema mais rápido de ser executado;

(6, 50) sistema mais simples de ser executado;

(6, 25) sistema com pouca mão de obra;

(7, 00) sistema com menor possibilidade de erros ou desvios de conformidade;

(5, 75) sistema conhecido pela mão de obra;

(6, 25) sistema conhecido pelos engenheiros de cálculo estruturas de concreto e Instalações;

(9, 00) sistema que apresenta menor custo final.

R: No geral interpreta-se as respostas (média), que as duas maiores preocupações são respectivamente, menor custo final e velocidade da execução;

Questão 7). Qual o sistema que sua empresa usa para o pavimento (lajes e vigas, lajes nervuradas e vigas, lajes sem vigas (nervuradas ou não, lajes nervuradas)?

R: Lajes maciças com vigas.

Questão 8). Qual o principal motivo, na sua opinião (ou da empresa) para usar este sistema?

R: Economia, segurança e sistema proposto pelo engenheiro de cálculo estrutural.

Questão 9) A empresa, em algum momento, já sentiu a necessidade de mudar o modelo estrutural usado?

R: No geral não.

Questão 10). Já propuseram uma mudança do tipo da estrutura aos engenheiros de cálculo? Se positivo houve concordância por parte do engenheiro de cálculo estrutural? Se não por quais motivos?

R: Observa-se que nem as construtoras e os engenheiros de cálculo estrutural propõem mudanças.

Questão 11). Os engenheiros de cálculo já propuseram o uso de outro tipo de estrutura de concreto? (Ex: estrutura pré-moldada; concreto protendido, alvenaria estrutural, etc.?)

R: No geral não foi proposto.

Questão 12). Se houve alguma mudança do tipo de estrutura usada, por qual motivo foi?

R: Não houve mudança nenhuma das estruturas.

Questão 13). Se houvesse outro tipo de estrutura que resultasse em menor custo, maior qualidade, menores deformações e conseqüentemente menos patologias, esta empresa poderia estudar sua viabilidade?

R: Todas as empresas responderam que usariam sim tal sistema.

Observa-se que ao longo da pesquisa com as construtoras, que todas estão preocupadas com a segurança estrutural, facilidade de execução, metodologia usada já consagrada no mercado, economia e que por parte das construtoras e dos engenheiros de cálculo estrutural geralmente não foram propostas diferentes sistemas estruturais.

Nota-se principalmente pelas respostas da décima terceira questão, que se houvesse outro tipo de estrutura que resultasse em menor custo, maior qualidade, menores deformações e conseqüentemente menos patologias, as empresas estudariam sua viabilidade, desta maneira, percebe-se que as construtoras e seus engenheiros de cálculo estrutural não propõem o sistema de concreto protendido, aparentemente pelo paradigma cultural do mercado consumidor.

4 AVALIAÇÃO DO CUSTO DE UM MESMO PAVIMENTO CONVENCIONAL EM CONCRETO ARMADO E COM CORDOALHAS ENGRAXADAS. CRITÉRIOS INICIAIS PARA O USO DO PROGRAMA CAD/TQS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo se verifica, por meio de um exemplo de outro pesquisador a diferença de custo entre um pavimento de um mesmo prédio executado no sistema convencional e em protendido com cordoalha engraxada. Por fim aproveita-se o capítulo para se descrever algumas considerações de ordem geral do programa a ser empregado (CAD TQS) no exemplo apresentado no próximo capítulo

4.2 AVALIAÇÃO DO CUSTO DE UM PAVIMENTO NO SISTEMA CONVENCIONAL E COM PROTENSÃO EM CORDOALHA ENGRAXADA.

Toda a discussão aqui se refere a um trabalho, o de BRÍGIDO (2016), mais amplo do que aqui mostrado, no qual vários sistemas do pavimento em questão foram estudados. Aqui apenas os resultados dos dois sistemas, que importam a esta tese, são considerados. Para os dois tipos de estruturas aqui propostos, tanto de concreto armado quanto de concreto protendido, as metodologias de tarefas e ciclos de trabalho são basicamente as mesmas, diferenciando-se apenas pela própria protensão. A metodologia aqui empregada é similar ao que se realiza no próximo capítulo, sendo que lá a análise é mais profunda.

Assim Brígido fixou o projeto da planta de forma, levou em conta a fabricação e montagem das formas das lajes concomitantemente com a montagem do cimbramento, montagem do aço passivo, concretagem, protensão (apenas do caso de uso de protensão com cordoalhas engraxadas), desforma, reescoramento e ciclos de tempo de tarefas.

Os ciclos são definidos como o tempo necessário para que a equipe de mão de obra inicie a montagem das formas até o momento em que se faz a concretagem,

abrangendo o início da montagem de um andar até o início de montagem do andar superior.

De acordo com BRÍGIDO (2016), o ciclo de uma estrutura puramente de concreto armado com armadura passiva possui uma duração de aproximadamente de 8 a 9 dias, o que de fato também foi observado pelo autor na execução do edifício utilizado como modelo, apresentado no capítulo 5. Já para uma estrutura de concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas, ainda segundo Brígido, o ciclo é de apenas de 5 dias. Isto se dá pela ausência de vigas e consequentemente maior a facilidade de se montar as formas e as armaduras de uma laje. Este fato foi comprovado pelo autor em entrevistas feitas verbalmente com operários em visita a obras em Fortaleza no Ceará e Chapecó em Santa Catarina, pois em Ribeirão Preto não havia este tipo de obra.

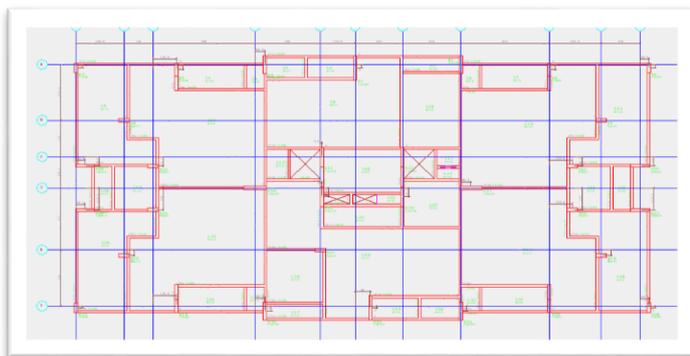
Ainda de acordo com BRÍGIDO (2016), as comparações entre os dois sistemas podem ser facilmente entendidas com o exemplo de uma edificação tendo como referência um mesmo projeto arquitetônico para diferentes arranjos estruturais, neste caso foi utilizado o projeto arquitetônico do Edifício Tancredo Neves, conforme mostrado no próximo item.

4.2.1 Planta de formas

O exemplo empregado situa-se na cidade de Fortaleza Ceará, e denominado Ed. Tancredo Neves cuja planta de forma do andar tipo com o sistema em concreto armado tradicional pode ser visto na figura 4-1.

Alguns dados adicionais: Vigas com altura de 60cm e lajes maciças de 12cm.

Figura 0-1 - Projeto de formas (Vigas e Lajes maciças).



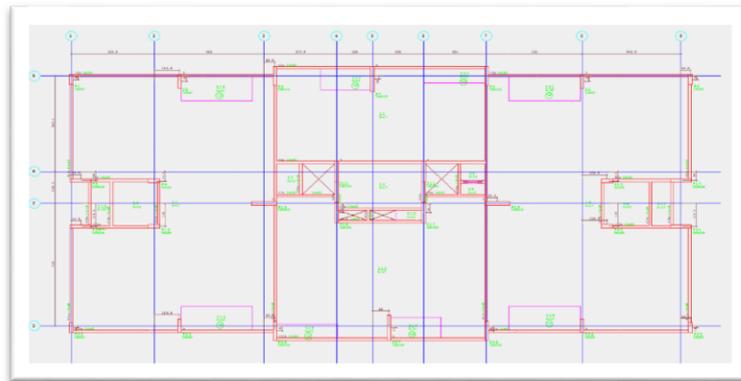
Fonte: BRÍGIDO (2016).

Para o sistema de laje lisa, embora algumas vigas ainda fossem consideradas empregou-se uma solução com a laje com 16 cm de espessura e depois outra em que a laje tem 17 cm de espessura. A planta de forma do mesmo pavimento tipo agora com lajes lisas e usando protensão com altura de 17 cm está indicada na figura 4-2.

Alguns dados adicionais: Laje Maciça Protendida (Retirada de 5 pilares)

Laje maciça protendida com altura de 17 cm.

Figura 0-2 – Laje maciça protendida.

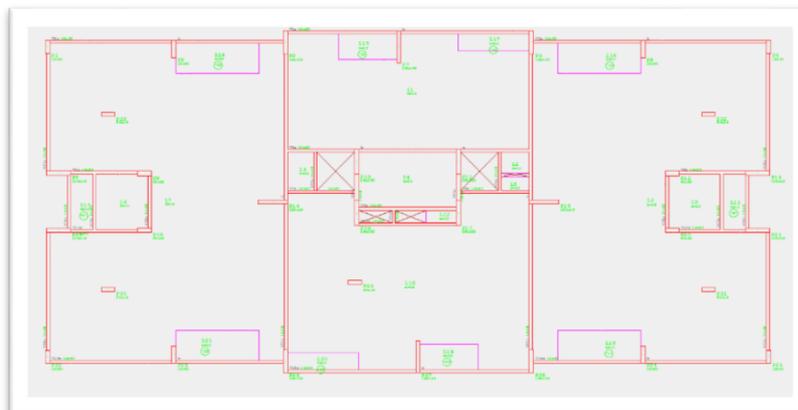


Fonte: BRÍGIDO (2016).

Para o mesmo edifício Tancredo Neves apresenta-se a Forma Concreto Protendido com laje de 16 cm, como está indicado na Figura 4-3.

Laje maciça protendida com altura de 16cm

Figura 0-3 - Laje maciça protendida.



Fonte: BRÍGIDO (2016).

4.2.2 Custos

Os custos das diversas soluções, por item, podem ser vistos nos quadros 4-1, 4-2 e 4-3.

Quadro 0-1 - Planilha de custos CA.

Ed. Tancredo Neves - Laje Maciça Concreto Armado				
Área do Pavimento	482,55	m ²		
OPÇÃO LAJES MACIÇAS H=12cm				
	Vigas	Lajes	Índices	Valor
Fôrmas	-	-	1,76	49,28
Vol. Concreto	-	-	0,155	54,25
CA	-	-	14,19	63,86
CP-190	-	-	0	0
TOTAL (R\$/m ²)				167,39
PREÇOS DE				
Concreto (R\$/m ³)	350			
Formas com Vigas (R\$/m ²)	28			
Formas com Faixas (R\$/m ²)	20			
CP-190 (R\$/Kg)	8,8			
CA 50 (R\$/Kg)	4,5			
Moldes (R\$/un)	1,5			
Tapa nervura (R\$/un)	0,5			

Quadro 0-2 - Planilha de custos CP.

Ed. Tancredo Neves - Laje Maciça Concreto Protendido				
Área do Pavimento	482,55	m ²		
OPÇÃO LAJES MACIÇAS H=17cm				
	Vigas	Lajes	Índices	Valor
Fôrmas	-	-	1,34	26,8
Vol. Concreto	-	-	0,181	63,35
CA	-	-	12,07	54,32
CP-190	-	-	3,59	31,59
TOTAL (R\$/m ²)				176,06
PREÇOS DE				
Concreto (R\$/m ³)	350			
Formas com Vigas (R\$/m ²)	28			
Formas com Faixas (R\$/m ²)	20			
CP-190 (R\$/Kg)	8,8			
CA 50 (R\$/Kg)	4,5			
Moldes (R\$/un)	1,5			
Tapa nervura (R\$/un)	0,5			

***Obs.: Foram retirados 5 pilares.**

Fonte: BRÍGIDO (2016).

Quadro 0-3 - Planilha de custos.

Ed. Tancredo Neves - Laje Maciça Concreto Protendido				
Área do Pavimento	482,55	m ²		
OPÇÃO LAJES MACIÇAS H=16cm				
	Vigas	Lajes	Índices	Valor
Fôrmas	-	-	1,34	26,8
Vol. Concreto	-	-	0,173	60,55
CA	-	-	10,82	48,69
CP-190	-	-	2,4	21,12
TOTAL (R\$/m ²)				157,16
PREÇOS DE				
Concreto (R\$/m ³)	350			
Formas com Vigas (R\$/m ²)	28			
Formas com Faixas (R\$/m ²)	20			
CP-190 (R\$/Kg)	8,8			
CA 50 (R\$/Kg)	4,5			
Moldes (R\$/un)	1,5			
Tapa nervura (R\$/un)	0,5			

Fonte: BRÍGIDO (2016).

Tem-se, portanto um comparativo entre as armaduras passivas e as cordoalhas engraxadas, fica apresentado então o valor reduzido da estrutura, bem como uma diferença no valor total final, sendo em concreto armado R\$ 167,39 m² e em concreto protendido R\$ 157,16 m².

É preciso apenas notar que o estudo feito por Brígido se refere a prédio construído na cidade de Fortaleza na qual a velocidade básica do vento (V_0), dada pela Norma Brasileira de vento, é de 30 m/s enquanto na região de Ribeirão Preto este valor cresce para 40 a 42 m/s, conduzindo a valores de forças de obstrução na

edificação de quase o dobro dos valores de Fortaleza. Obviamente com valores mais altos de ações laterais de vento, o sistema lajes sem viga será mais afetado e arranjos de estruturas de contraventamento poderão ser necessários, para se manter um desempenho adequado, como é visto no capítulo posterior.

4.3 CONCEITOS INICIAIS DO CAD/TQS DE LAJES PROTENDIDAS

O sistema CAD TQS é um conjunto de programas idealizado inicialmente para auxiliar ao engenheiro calcular e detalhar uma estrutura de edifício de múltiplos andares. Ao final do processo obtêm-se todas as plantas executivas estruturais do projeto (forma e armação). A empresa que o desenvolve já conta com 30 anos de idade e atualmente o sistema para prédios está na sua versão 20. Como premissa básica da empresa todos os cálculos e detalhamentos executados pelo sistema visam atender sempre as normas técnicas Brasileiras.

O Sistema se divide inicialmente em um módulo gráfico e outro de cálculo. Muitos acham que dominando a parte gráfica saberá projetar uma edificação. Neste caso trata-se apenas de um aplicativo que permite visualizar entradas e os resultados de cálculos e finalmente montar pranchas executivas. É preciso saber o que o módulo de cálculo faz para que erros grosseiros não ocorram. Por motivos óbvios, neste trabalho não se comentará a parte gráfica do programa.

4.3.1 Cálculo estrutural da edificação com o cad/tqs

Obviamente que no projeto original, a TQS informática projetou o programa para reproduzir o que era feito “manualmente” nos escritórios de projeto estrutural. Claro que usando o sistema convencional de prédios de múltiplos andares (laje maciça, vigas e pilares) definido no início do trabalho, antes mesmo do desenvolvimento da parte gráfica (da forma atual) o programa considerava as ações atuando nas lajes, destas eram transferidas para vigas e finalmente a reações destas para os pilares.

Hoje o programa conta com um modelo de cálculo de pórtico tridimensional no qual todos elementos da estrutura, vigas, pilares e até mesmo a laje (mesmo maciça) são representadas por barras com os seis tipos de esforços solicitantes em suas extremidades (cortante vertical, cortante transversal, normal, momento fletor,

momento fletor transversal e momento torção). No caso das lajes maciças é empregada a técnica da grelha equivalente, inclusive, se preciso considerando a não linearidade física, ver CARVALHO (1994).

Assim o sistema, além do programa gráfico, conta com programas para determinação dos deslocamentos e esforços em elementos de lajes, vigas e pilares que são automaticamente acionados na medida que o procedimento de cálculo vai se desenrolando. Após a determinação dos esforços e deslocamentos, há diversos módulos de cálculo que realizam cálculo da quantidade, verificação e detalhamento de armadura. Todos, no modo padrão, acionados automaticamente ou não se assim determinado. Com estes dados o módulo gráfico pode desenvolver as pranchas finais executivas. Como, historicamente o programa já foi feito em partes, é possível de início determinar se todos elementos serão calculados, se todas as pranchas serão geradas e mesmo se todas verificações serão feitas. Isto é importante porque no caso da protensão o programa precisa parar após cálculo dos esforços para depois que o usuário fornecer algumas instruções específicas calcular e detalhar a armadura de protensão e passiva auxiliar.

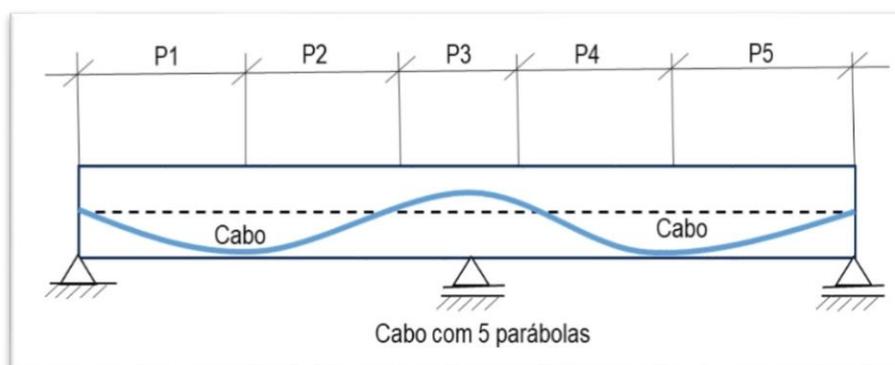
4.3.2 Módulo de laje protendida

Assim como existem no programa gráfico diversos tipos de vigas que podem ser introduzidas no programa (viga normal, invertida, pré-moldada etc), também as lajes apresentam todas as possibilidades descritas no capítulo 2. Exceto a laje protendida que pode funcionar com o sistema, mas deve ser adquirida a parte, ou seja, não está presente na versão padrão. O módulo de laje protendida para efeito de cálculo funciona de forma muito parecida do da laje maciça. Usa o modelo de grelha equivalente para determinação dos esforços permitindo a quem já sabe calcular em concreto armado a mesma facilidade na introdução de dados e análise de esforços e deslocamentos. Para aplicar o efeito da protensão, porém é preciso acrescentar alguns detalhes que são descritos nos itens posteriores.

4.3.3 Aplicação da protensão na laje protendida

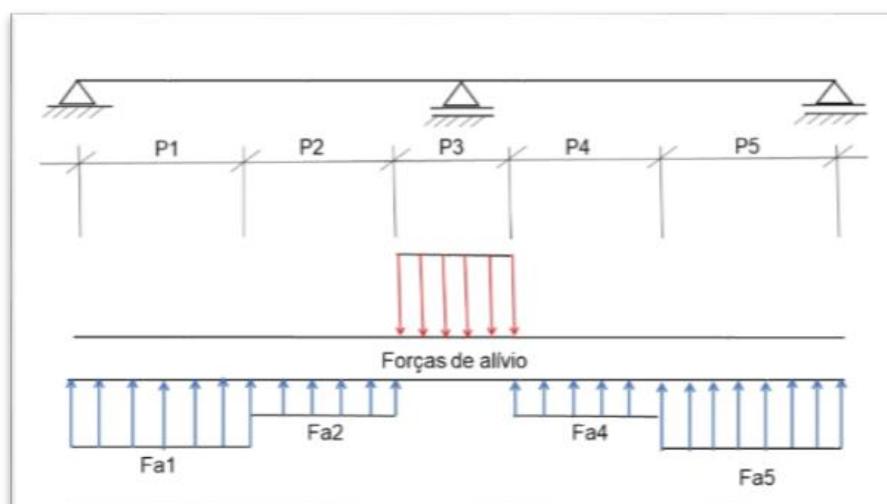
A aplicação do efeito de protensão de um cabo curvo na laje, como o indicado na figura 4-4 é feito por um conjunto de ações equivalentes como o indicado na figura 4-5. Esta forma de aplicação pode ser vista no livro de CARVALHO (2017). É uma maneira bem simples, pois corresponde a introduzir em uma grelha um conjunto de ações uniformemente distribuídas.

Figura 0-4 - Cabo curvo em trecho central de uma laje.



Fonte: Adaptado, TQS INFORMÁTICA (2018).

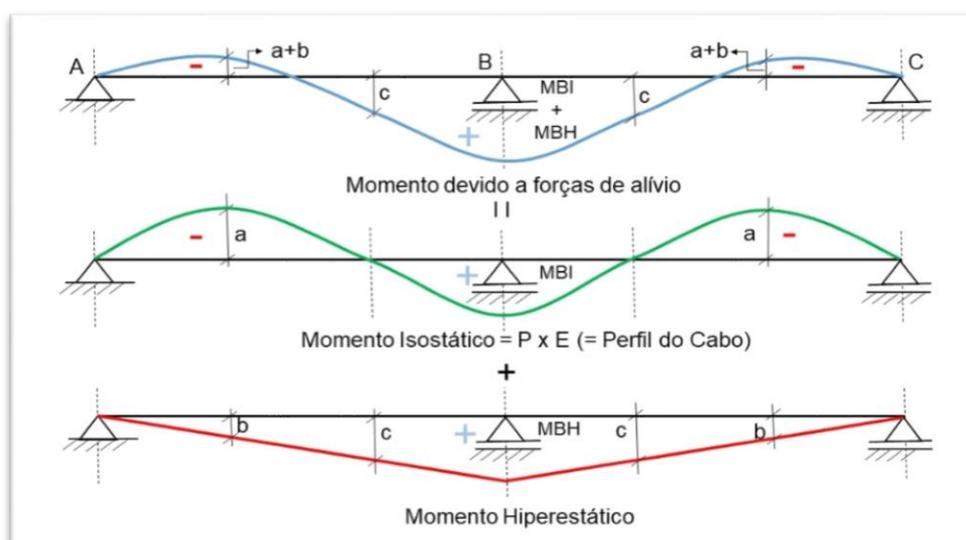
Figura 0-5 - Forças equivalentes do cabo da figura 4-4.



Fonte: Adaptado, TQS INFORMÁTICA (2018)

Outra informação importante é que ao empregar o carregamento equivalente de protensão já se leva em conta o chamado momento isostático e o hiperestático de protensão, a soma dos dois. Nas verificações de ruptura é necessário, inclusive por prescrição normativa, considerar o efeito do Momento hiperestático de protensão com coeficiente de ponderação adequado. O conceito de hiperestático de protensão é fácil de entender como explicado a seguir. Se as barras da figura 4-5 correspondessem a uma viga (ou a um trecho de laje), ao ser submetida as ações de protensão indicadas, por serem hiperestáticas, ficam submetidas ao diagrama de momento fletor como indicado (o mais abaixo) na figura 4-6. Mostra-se ainda nesta figura o momento isostático cujo formato é a análogo ao do cabo pois nada mais é do que o produto da força de protensão pela excentricidade do cabo.

Figura 0-6 - Diagramas de momentos fletores.



Fonte: Adaptado, TQS INFORMÁTICA (2018)

O programa ao realizar os cálculos e verificações de ruptura usa como requerido pela norma o momento hiperestático de protensão na seção analisada.

De forma geral, para o estado limite de serviço, estes dois efeitos não necessitam de nenhuma separação.

Evidentemente que os valores do $M_{\text{hiperestático}}$ dependem do perfil do cabo, da intensidade da protensão, geometria da laje, etc. Certas lajes possuem $M_{\text{hiperestático}}$ consideráveis, outras não.

Para aplicar ainda a protensão, de forma automática, o módulo de laje protendida precisa ainda de três informações: 1) traçado do cabo, 2) força ao longo

do mesmo e ao longo do tempo (perdas), 3) Quantidade de cabos nas diversas regiões da laje.

4.3.3.1 Perdas e traçado do cabo

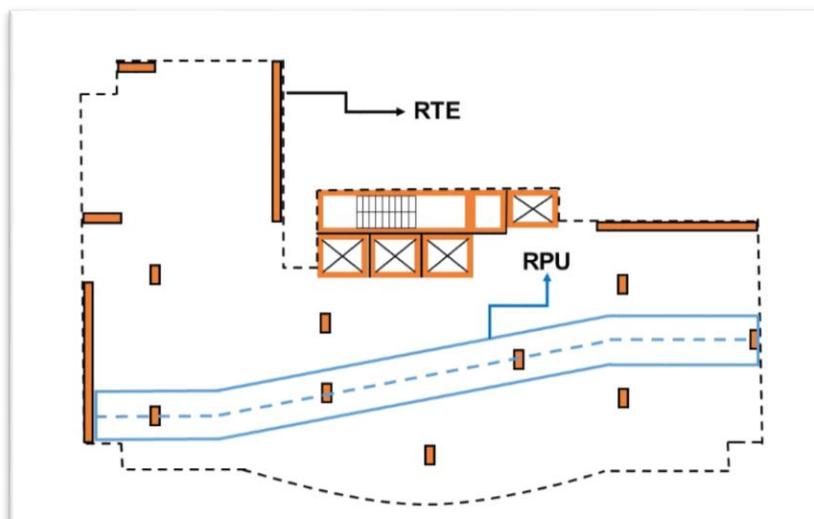
O cálculo das perdas de protensão estão indicadas na própria NBR 6118: 2014, mas de forma mais explícita e particular em MELLO (2005). Também neste trabalho Mello estuda várias trajetórias para cabos em lajes lisas, inclusive a trajetória padrão do programa TQS (que já existia na época) e conclui que não há diferenças significativas entre os diversos traçados propostos. Assim, o usuário, pode inicialmente se valer do traçado padrão que o programa disponibiliza. Também neste momento além do tipo de aço é fornecido o tipo de cordoalha.

4.3.3.2 Definição de regiões de protensão uniforme (RPU) e regiões de transferência de esforços (RTE)

Ainda para chegar no número de cabos necessários na laje é preciso definir no Laje Protendida TQS a região de protensão uniforme (RPU) e região de transferência de esforços (RTE). A segunda pode ser a mesma que a primeira ou conjunto de várias RPUs. De uma maneira bem simplificada a RPU é uma região da laje, determinada pelo usuário do programa em que considera os cabos nela contido com espaçamentos e força iguais. Inicialmente o programa considera a existência de um único cabo na RPU com a trajetória escolhido como previsto no item anterior. Havendo mais que um cabo eles terão todas as características: força, perdas, trajetória e área do anterior, chamado representante. A região RTE, segundo o manual da TQS, trata-se de uma região poligonal da laje, que contém uma ou diversas RPUs e que determinam a região para a extração das solicitações (momentos fletores) para as RPUs e as dimensões da seção transversal que serão empregadas no dimensionamento.

Para o uso adequado destas definições é conveniente que o usuário indique ao programa regiões de RTE em que os valores de momento fletor tem a mesma ordem de grandeza. Na figura 4-7 indica-se uma RPU bem adequada pois os momentos máximos negativos, devem ocorrer nessa região. A RTE indicada na mesma figura, não seria mais adequada pois indicaria que a RPU em questão deveria prover com sua protensão os esforços do pavimento.

Figura 0-7 - Modelo básico de uma RTE e uma RPU no programa TQS.



Fonte: Próprio autor.

4.3.3.3 Número de cabos nas diversas regiões da laje

Fornecidos os dados explicados nos itens anteriores é possível iniciar a solução da laje protendida. Ao usuário pedir que seja feito o cálculo da laje, o programa irá determinar o número de cabos para cada RPU em função da verificação de serviço pertinente e baseado no cabo que se encontra na mesma. A expressão usada é, para o caso de protensão limitada, por exemplo, a correspondente ao estado de formação de fissuras com a protensão no tempo infinito (todas as perdas tendo ocorridas).

Normalmente o programa utiliza a seção mais solicitada da RPU, efetuado o cálculo de todas as RPUs o programa aplica a protensão em toda a laje e retorna com os resultados obtidos para a verificação do estado limite último no tempo infinito e na data da protensão (sem a carga variável) e abertura de fissuras se for o caso (protensão parcial), além da verificação de punção e cálculo de armadura para este fim quando necessário. Neste módulo de laje protendida cabe sempre ao operador do programa indicar o momento do cálculo dos cabos e verificações. A cada mudança este procedimento deve ser refeito.

4.3.3.4 Verificações

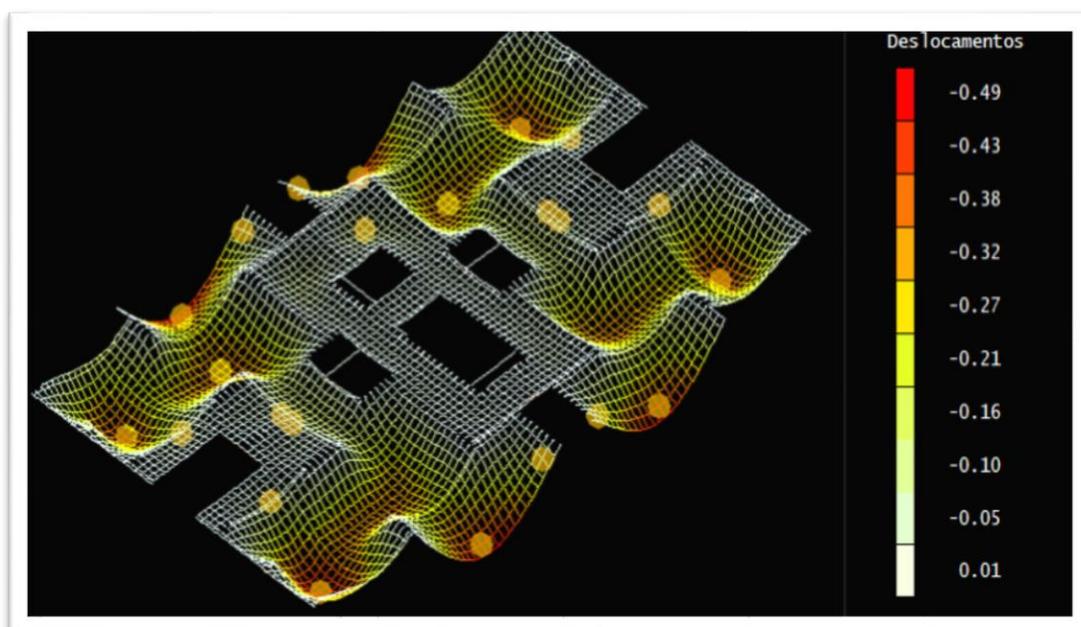
Terminado o cálculo pela leitura do relatório do programa se há a ocorrência ou não de erro grave, haja vista que um tipo de erro grave é aquele que se dá quando

a punção não é atendida (o usuário precisa reformular o pilar ou acrescentar ábacos ou ainda mesmo mudar a resistência do concreto). Outro menos frequente é quando a altura útil da seção (via de regra em cima de um pilar) é menor que a altura limite normativa (linha neutra não pode passar de $0,45d$ para concreto de resistência até 50mpa) que permite ductilidade no Estado limite último.

Mesmo não havendo erros graves é preciso verificar visualmente (através de gráficos e relatórios) se nas diversas RPUs são atendidas as condições de serviço (tensão ou abertura de fissura). Como será visto no próximo capítulo. Algumas vezes é preciso alterar o número de cabos de uma RPU, ou a trajetória dos mesmos e menos frequente a resistência característica do concreto.

A verificação das deformações (muito importante em lajes lisas) também podem ser feitas por gráficos e tabelas. Cabe ao usuário fazê-lo lembrando que o programa pode fornecer as flechas antes da protensão (seria concreto armado) quando da protensão, no tempo infinito e também usar a não linearidade física. Na figura 4-8 é apresentado o modelo em 3D da laje do exemplo do capítulo 5 antes da protensão.

Figura 0-8- Modelo 3D, deformações apresentadas pelo programa (deslocamentos das lajes), laje do edifício estudado no capítulo 5.



Fonte: Próprio autor.

5 EDIFÍCIO EM LAJE LISA TRADICIONAL E PROTENDIDA

No texto anterior a este capítulo vários aspectos foram discutidos para comparar o sistema tradicional com o sistema da laje lisa com cordoalhas engraxadas. Neste capítulo é feita uma simulação de custos comparando-se o de um prédio executado com o sistema convencional, realmente executado na cidade de Ribeirão Preto, no qual o autor participou da construção, com o do custo de outro, neste caso fictício, com o projeto completo estrutural (também desenvolvido pelo autor) apenas sem incluir as fundações, O Custo é sempre uma variável que influencia na decisão do sistema a ser empregado (ver questionário feito) pelos empreendedores das edificações. Por se tratar de um tema muito amplo que proporciona diversas discussões, para efeito de simplificação, considerou-se a mesma aparência e disposição arquitetônica para o prédio fictício que a do existente. Para considerar uma performance similar considerou-se que prédio com cordoalha engraxada, além de atender as prescrições normativas, tenha um coeficiente de instabilidade global (γ_z) aproximadamente igual ao do existente. Por este motivo foi preciso fazer adequações aos pilares que fazem parte do projeto original como será descrito.

Finalmente faz-se uma comparação quantitativa de materiais e de mão-de-obra para a execução do edifício em concreto armado tradicional e para execução hipotética do mesmo edifício em concreto protendido.

5.1 COEFICIENTE GAMA Z

Um dos parâmetros para verificar a estabilidade global é o gamaz (γ_z), embora o processo de cálculo efetuado pelo caso do TQS (2018) de segunda ordem seja mais sofisticado (mudança da matriz de rigidez no processo de verificação da instabilidade), e ainda considerar a própria excentricidade que ocorre devido a própria geometria do prédio considerando para esta parcela um coeficiente F_{avt} , apresenta os valores de (γ_z) equivalente no final de cada cálculo.

O objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações em uma estrutura, que em neste modelo foi limitado ao valor do γ_z , entre 1,0 a 1,3 como ponto de convergência para os projetos, com a finalidade de efetuar verificações dos

estados limites últimos e de serviço. De acordo com a NBR 6118:2014, os efeitos de 2º ordem são aqueles que se somam aos obtidos em uma análise de primeira ordem (em que o equilíbrio da estrutura é estudado na configuração geométrica inicial), quando a análise do equilíbrio passa a ser efetuada considerando a configuração deformada.

Conforme TAKATA (2017), os efeitos de segunda ordem considerados no programa são feitos através de um processo iterativo, o P- Δ , em que as ações de primeira ordem (P) provocam deformações (Δ) que originam esforços provocando novas deformações de maneira sucessiva.

Já outro fator a ser levado em consideração é a restrição do deslocamento lateral máximo permitido (no estado limite de serviço) previstos em normas conforme mostrado nos quadros 5-1 e 5-2 a seguir.

Quadro 5-1 - Limite para deslocamento pela NBR 6118:2014.

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H/850^e$ entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400^g$ e 15 mm

Fonte: NBR 6118:2014.

Quadro 5-2 - Deslocamentos máximos pela NBR 9062.

Caso	Tipo de edificação	Deslocamentos horizontais globais máximos (Combinação frequente)
A	Edifício térreo	$H/600^{(1)}$
B	Edifício com um pavimento (mezanino)	$H/600$ ou $H_i/750^{(2)}$
C	Edifício com múltiplos pavimentos	$H/1200$ ou $H_i/750^{(2)}$ ou $H_2/600^{(3)}$

onde:
 (1) H corresponde a altura total do edifício;
 (2) H_i corresponde ao desnível entre dois pisos consecutivos;
 (3) H_2 corresponde ao desnível entre o último piso e face inferior da laje da cobertura.

Fonte - NBR 9062:2006.

5.2 COEFICIENTE FAVT

Neste item é abordado detalhes do critério usado pelo programa de computador TQS (2018) utilizado em nos modelos em relação aos deslocamentos estruturais.

Conforme elencado em MONCAYO (2011), o coeficiente FAVt (fator de amplificação de esforços horizontais ou de vento) também pode ser considerado um parâmetro que avalia a estabilidade global. Observa-se que em BUENO (2009) se estudou esse parâmetro, porém chamando-o de γ_z . Comparou seus resultados com os do processo P- Δ e encontrou valores satisfatórios, mas concluiu que para esse parâmetro ser consolidado como parâmetro de estabilidade são necessários mais estudos. Além dessa função ele pode ser utilizado como estimador dos esforços de segunda ordem, similar ao γ_z . Esse coeficiente FAVt é exclusivo do sistema TQS (2018).

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO EM ESTUDO

Seguem informações importantes sobre as características do empreendimento estudado:

- 01 torre com 25 pavimentos tipo, compostos por 04 unidades por andar;
- Área das unidades: 50 unidades de 124,42m² e 50 unidades de 123,23m², totalizando 100 unidades;
- 02 halls com 01 elevador social cada - 01 hall para cada 02 apartamentos;
- Hall de serviço com elevador;
- Escada de emergência com acesso aos demais pavimentos (superiores e inferiores);
- Depósitos para lixo;

- 03 Tipos de plantas, sendo: 03 suítes com varanda gourmet; 02 suítes – sendo 01 ampliada e 01 suíte e 02 dormitórios. Todos com varanda gourmet e lavabo.

Dados gerais sobre o edifício:

- Engenheiro responsável pela execução: Harlen Nunes;
- Área total do terreno 3.762,15m²;
- Área construída: 23.540,35 m²;
- Habite-se: Emitido pela Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto SP, pela Secretaria de Planejamento e Gestão Pública (Departamento de Análise e Controle de Projetos), na data de 19 de maio de 2016.

O projeto arquitetônico de planta de um apartamento do modelo usado como base comparativa, pode ser observado na figura 5-1 a seguir.

Figura 5-1 - Arquitetura de um apartamento dos modelos estudad



Fonte: <https://stefaninogueira.com/apartamento/ribeirao-preto/acropole-sul-residencial/#plantas-1>

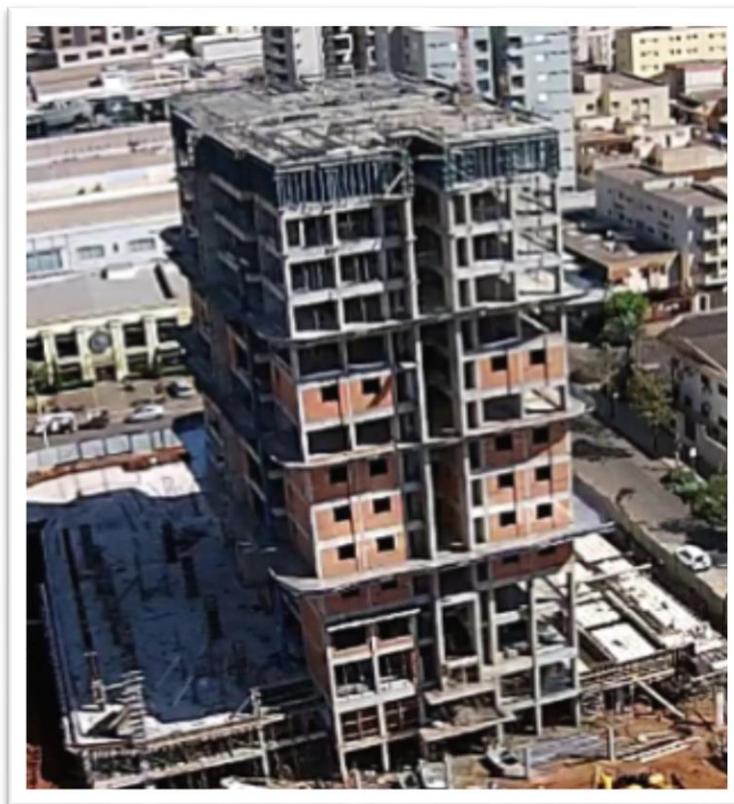
Para este estudo o edifício é calculado em três situações estruturais:

- Situação 1:** estrutura com 25 andares, sistema construtivo tradicional;

- b) Situação 2:** estrutura com 25 andares, sistema construtivo em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas, com lajes lisas e mesmo número de pilares da situação 1;
- c) Situação 3:** estrutura com 25 andares, sistema construtivo em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas, com lajes lisas, número de pilares diminuídos e aumento da seção de alguns pilares bem como seus núcleos rígidos;

Na figura 5-2, se observa a execução da estrutura do edifício, atentando-se na sequência para a figura 5-3 a fôrma executada do pavimento tipo, em que são montadas as vigas da estrutura.

Figura 5-2 – Execução da estrutura do edifício estudado.



Fonte: próprio autor.

Figura 5-3 - Execução do edifício estudado, formas lajes e vigas.

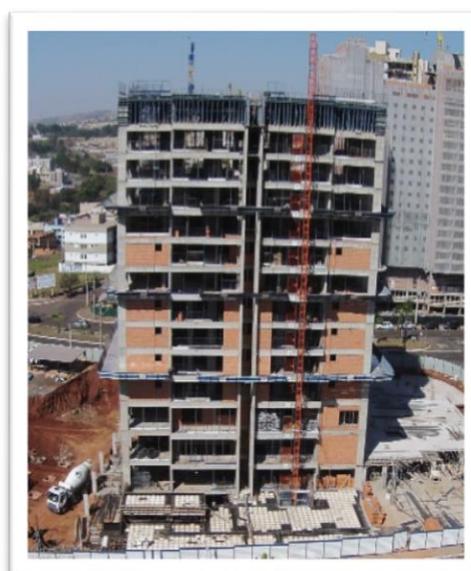


Fonte: próprio autor.

5.4 PROCEDIMENTO GERAL

Primeiramente a estrutura foi lançada via TQS (2018) com os dados gerais do modelo em concreto tradicional. As dimensões das seções de vigas, pilares e lajes foram introduzidas inicialmente com os dados da forma original, na figura 5-4 que segue, é mostrada a execução da estrutura da fachada.

Figura 5-4 - Execução da estrutura da fachada.



Fonte: próprio autor.

Os valores obtidos pelo TQS (2018) são analisados e confrontados com os parâmetros da norma NBR 6118:2014. É necessário frisar que os valores dos deslocamentos laterais apresentados nos modelos são os mais críticos da estrutura.

Seguem descritos na figura 5-5, os valores do coeficiente de vento utilizado para o cálculo estrutural do modelo estudado.

Figura 5-5 - Valores do coeficiente de vento utilizado.

Ângulo	C.A.	Def Cot	Cot ini
1	90	1 Não	0
2	270	1 Não	0
3	0	1 Não	0
4	180	1 Não	0

Fonte: próprio autor.

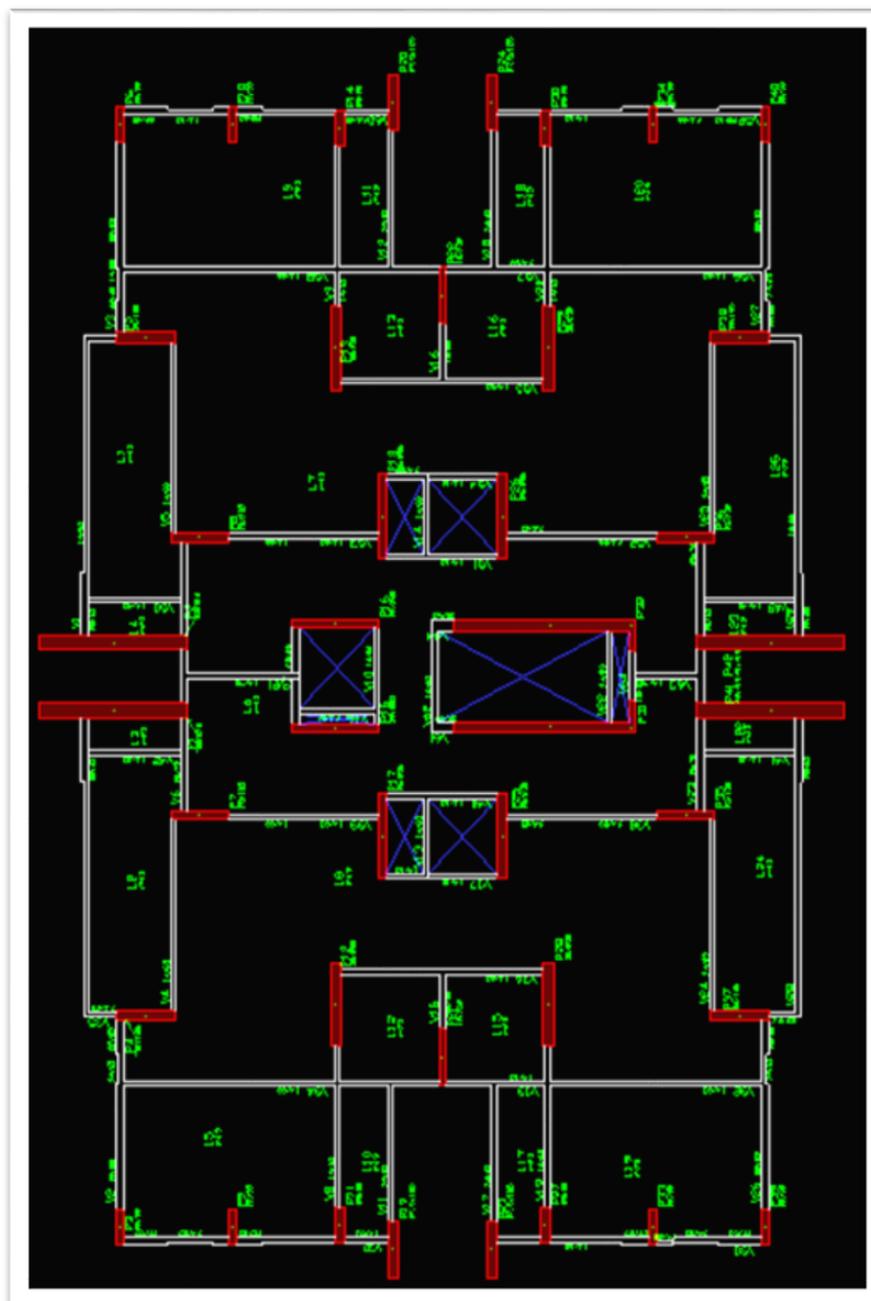
Utilizando a mesma analogia de comparações que podem ser melhor observadas em TAKATA (2017), o cálculo estrutural neste trabalho se deu da seguinte maneira: foram introduzidos os carregamentos na estrutura e o vento atuante, posteriormente se fez uma redução para 30% de ação de vento (previsto na norma) atuante e se calculou a estrutura. A partir desta combinação se chegou aos valores dos deslocamentos laterais, que estão atuando no estado limite de serviço. As análises comparativas dos dados obtidos no programa e da norma 6118:2014 são realizadas. Posteriormente, voltou-se aos valores totais de ação de vento para o cálculo da estrutura no estado limite último, onde se obtém os quantitativos dos elementos da estrutura como vigas, lajes e pilares, além do γ_z e FAVt. Há alguns casos em que foram necessários aumentar a seção do pilar para suportar o aumento

do carregamento, bem como a diminuição do número dos pilares após análise das deformações visualizadas em grelhas equivalentes dos pavimentos.

Os valores finais das dimensões dos pilares, calculados no estado limite último, são representados ao longo dos exemplos.

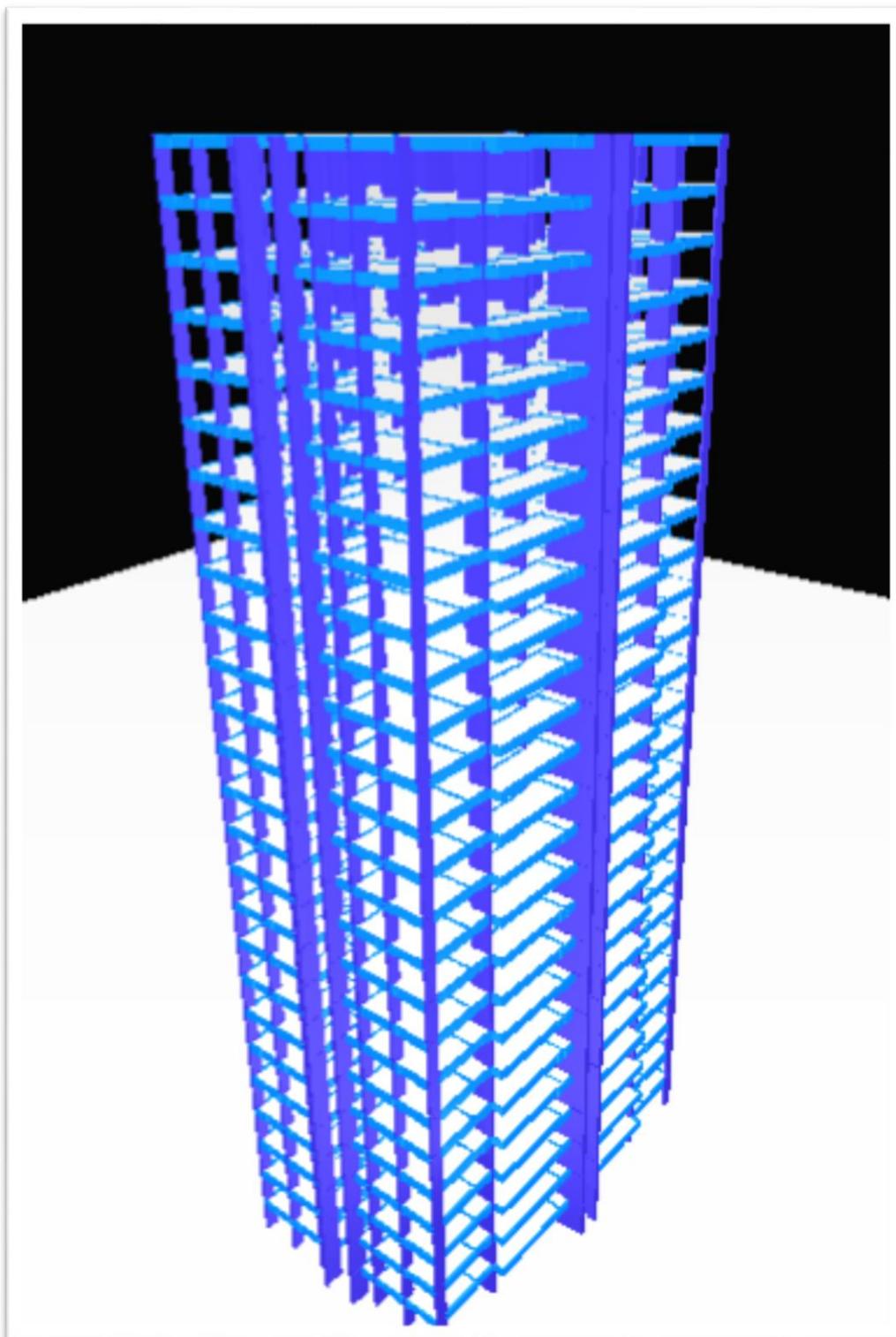
Na figura 5-6, é mostrada a geometria original em que foi executado o cálculo estrutural do edifício (situação 1), na figura 5-7 imagem 3D da estrutura concebida.

Figura 5-6 - Planta de formas situação 1, concreto armado, lajes, vigas na configuração original.



Fonte: próprio autor.

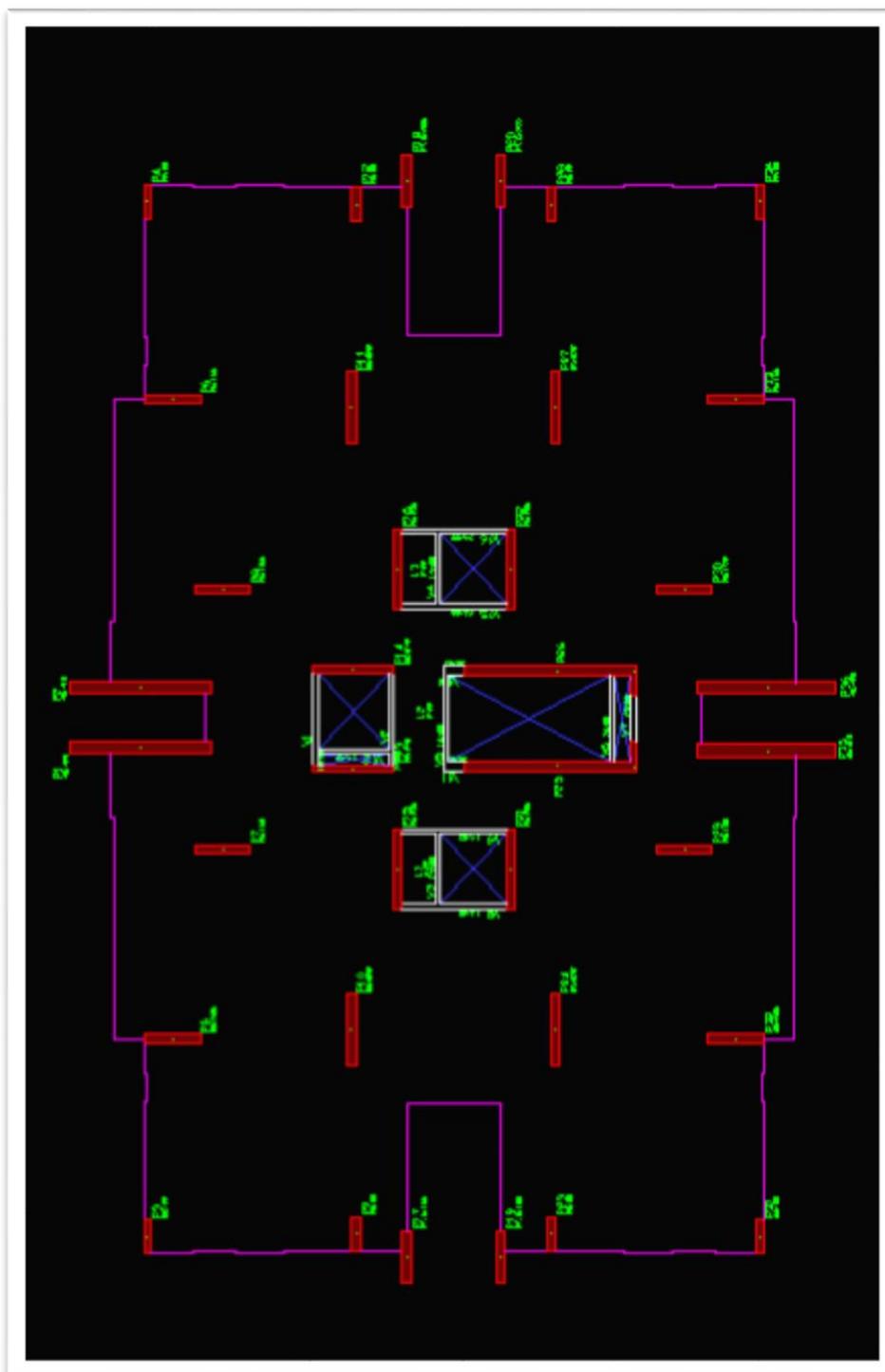
Figura 5-7 - Imagem 3D da estrutura com as geometrias conforme o projeto original.



Fonte: próprio autor.

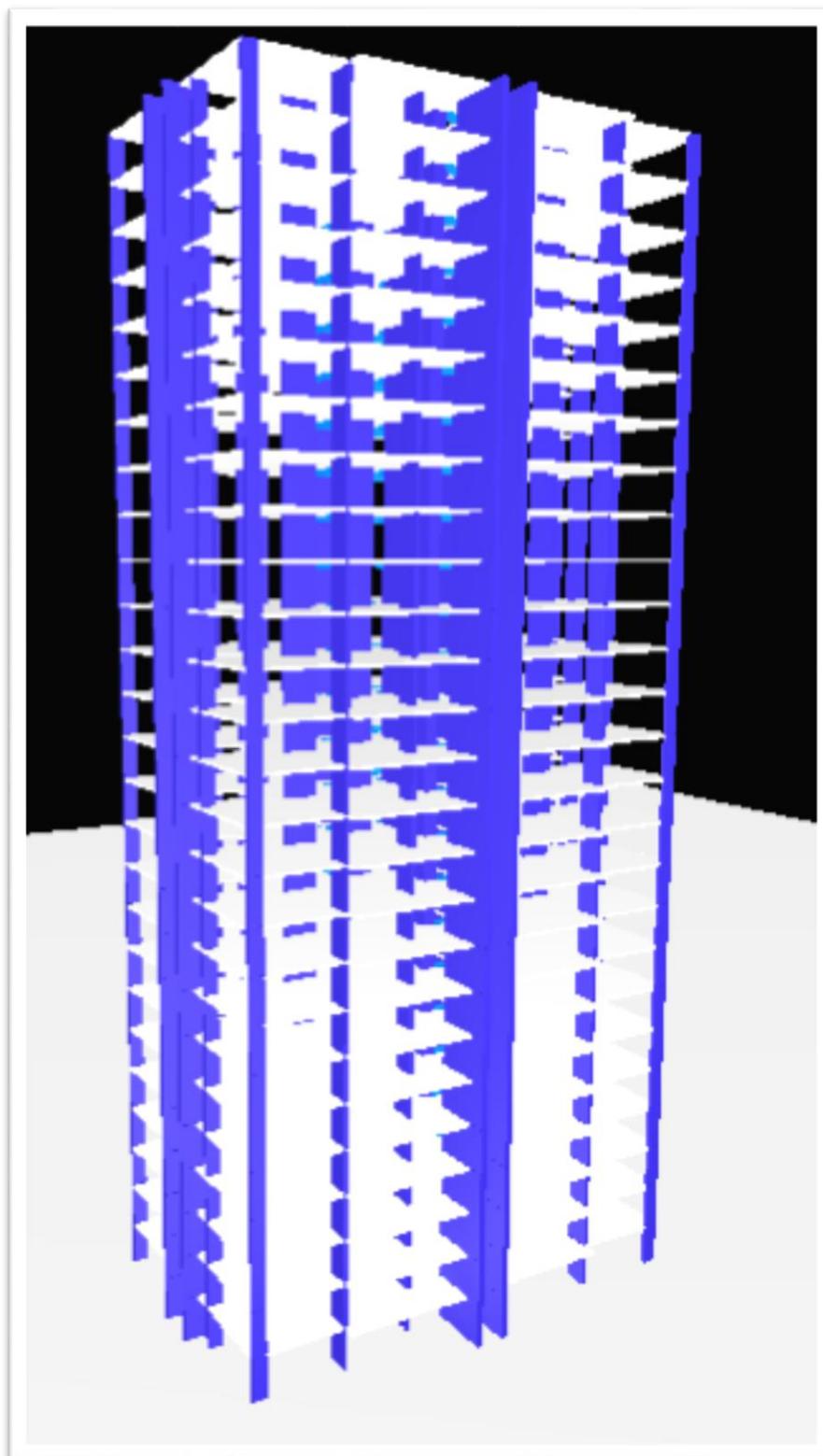
Na figura 5-8 se mostra a mesma geometria dos pilares, porém com uso de concreto protendido e lajes lisas (situação 2), na figura 5-9 imagem 3D da estrutura concebida.

Figura 5-8 - Planta de forma situação 2, concreto protendido, lajes lisas, geometria e número de pilares conforme projeto original.



Fonte: próprio autor.

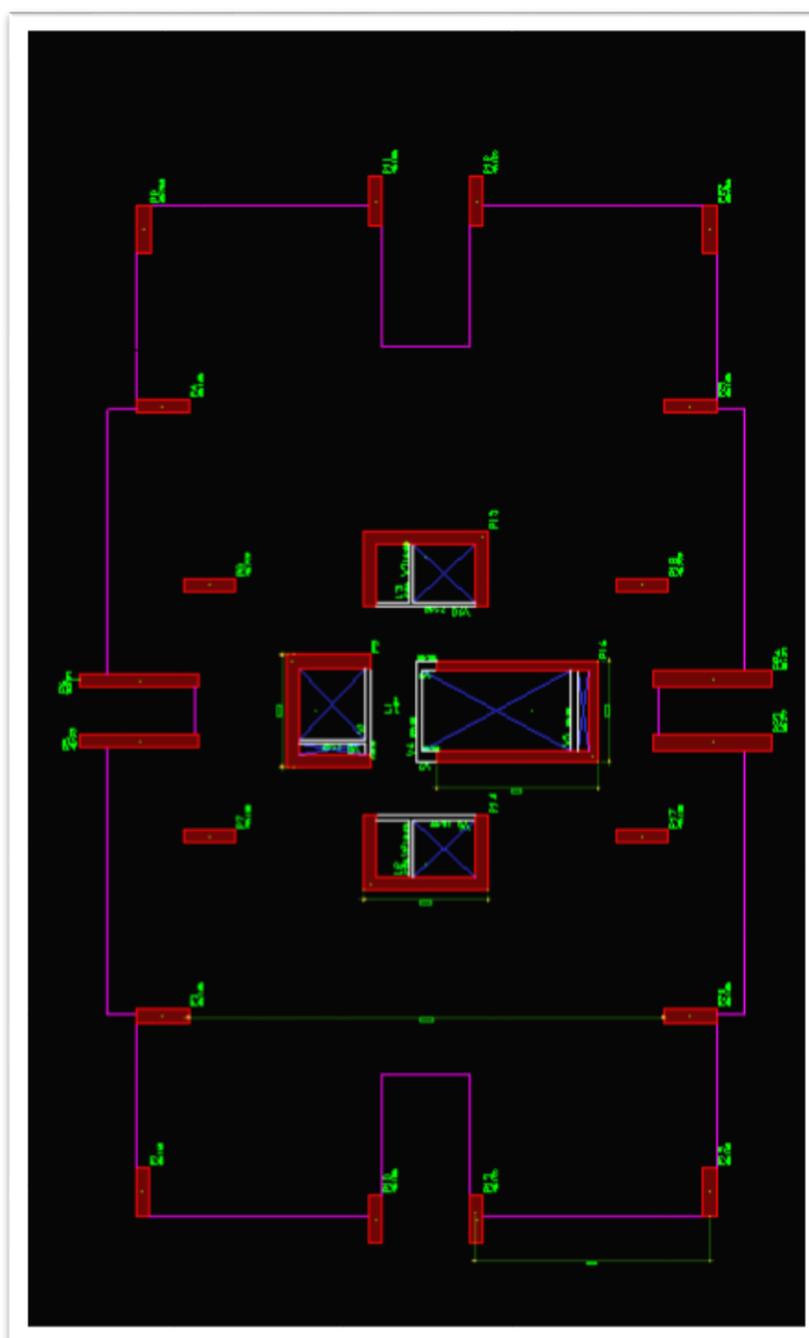
Figura 5-9 - Imagem 3D da estrutura com as geometrias conforme o projeto original com lajes lisas protendidas.



Fonte: próprio autor.

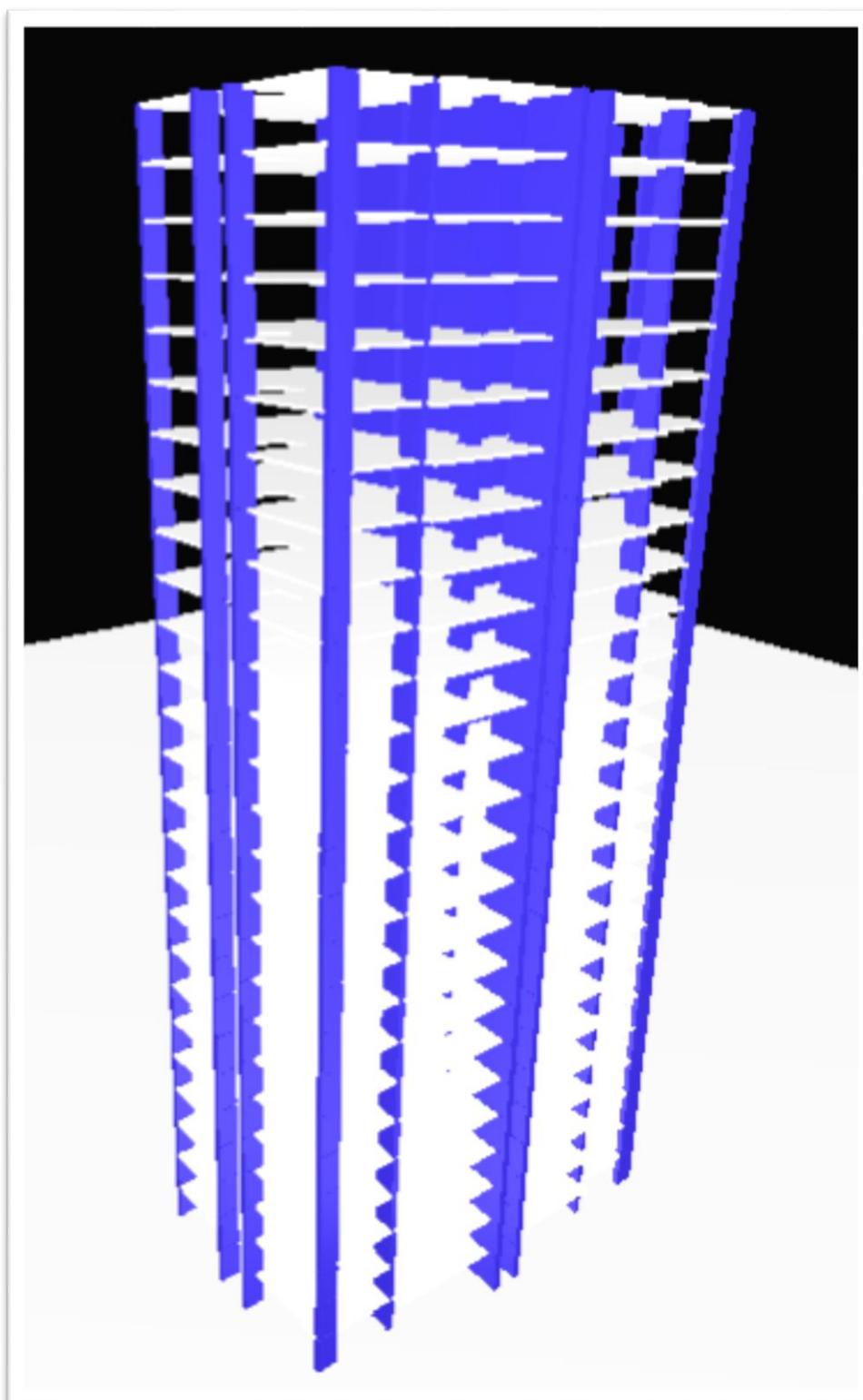
Na figura 5-10 se mostra a retirada de alguns pilares, as lajes lisas protendidas e o aumento das seções de outros pilares para que se obtenha uma melhor resistência às deformações (situação 3), na figura 5-11 na imagem 3D, é vista a estrutura concebida. As informações dos pilares retirados bem como o aumento das seções de outros pilares são detalhadas no próximo item.

Figura 5-10 - Planta de formas situação 3, concreto protendido, lajes lisas, geometria e número de pilares reduzidos.



Fonte: próprio autor.

Figura 5-11 - Imagem 3D da estrutura com as geometrias em concreto protendido, lajes lisas, geometria e número de pilares diferentes do projeto original.



Fonte: próprio autor.

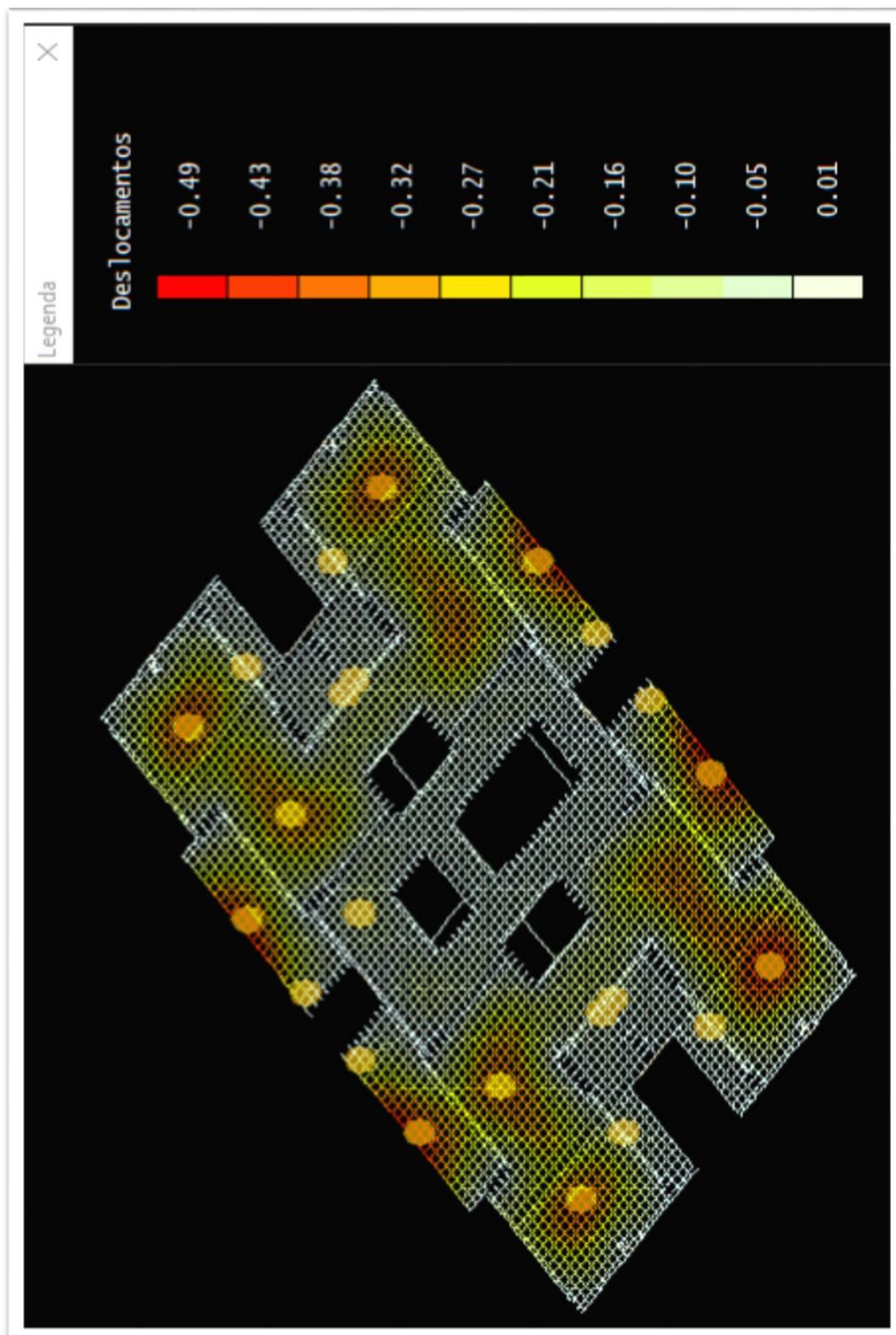
5.4.1 Resultados obtidos com o cálculo estrutural parametrizado pelos deslocamentos

Se observa a seguir, os resultados obtidos com o cálculo da estrutura sob a perspectiva de três situações. É de extrema importância elencar os aspectos fundamentais que se baseiam esta pesquisa, que é de demonstrar que a tecnologia de concreto protendido possui boas características técnicas e econômicas conforme demonstradas ao longo deste trabalho.

- a) **Situação 1:** estrutura com 25 andares, sistema construtivo tradicional, com lajes maciças $h=13$ cm e $f_{ck}= 35$ Mpa.

Observa-se na figura 5-12, que os deslocamentos da grelha no ELU estão dentro do estabelecido pela NBR 6118:2014 que é $L/250$, considerando os pilares como apoios fixos. Os deslocamentos mostrados estão em torno de $-0,49$ cm (vão neste caso é de 429 cm), o deslocamento aceitável então é de até $1,29$ cm, ou seja, a estrutura está dentro da prescrição da respectiva norma.

Figura 5-12 - Grelha com os deslocamentos no ELU, situação 1.



Fonte: próprio autor.

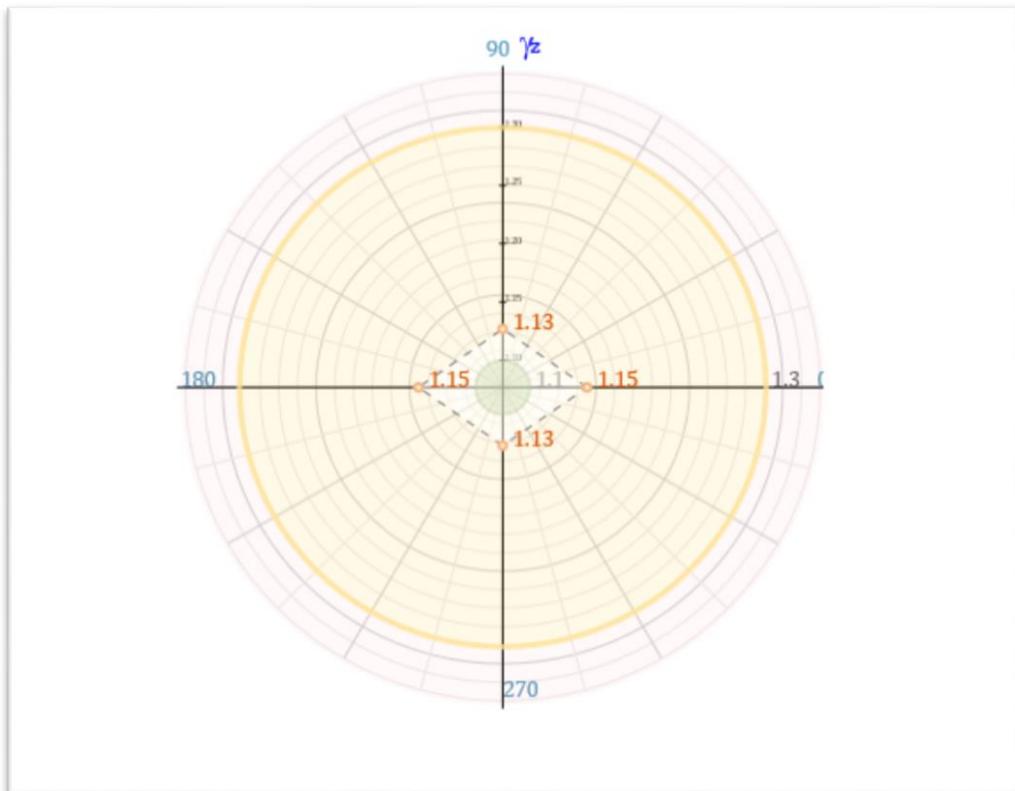
A seguir são apresentados os principais parâmetros de estabilidade obtidos da análise estrutural do edifício, de acordo com o quadro 5-3 que mostra os parâmetros gerais de estabilidade, e na figura 5-13 se mostra graficamente os dados da estabilidade global para combinações ELU dos pilares.

Quadro 5-3 - Parâmetros de estabilidade situação 01.

Parâmetro	Valor
GamaZ	1,15
FAVt	1,15
Alfa	0,88

Fonte: próprio autor.

Figura 5-13 - Parâmetros de estabilidade global ELU de pilares situação 1.



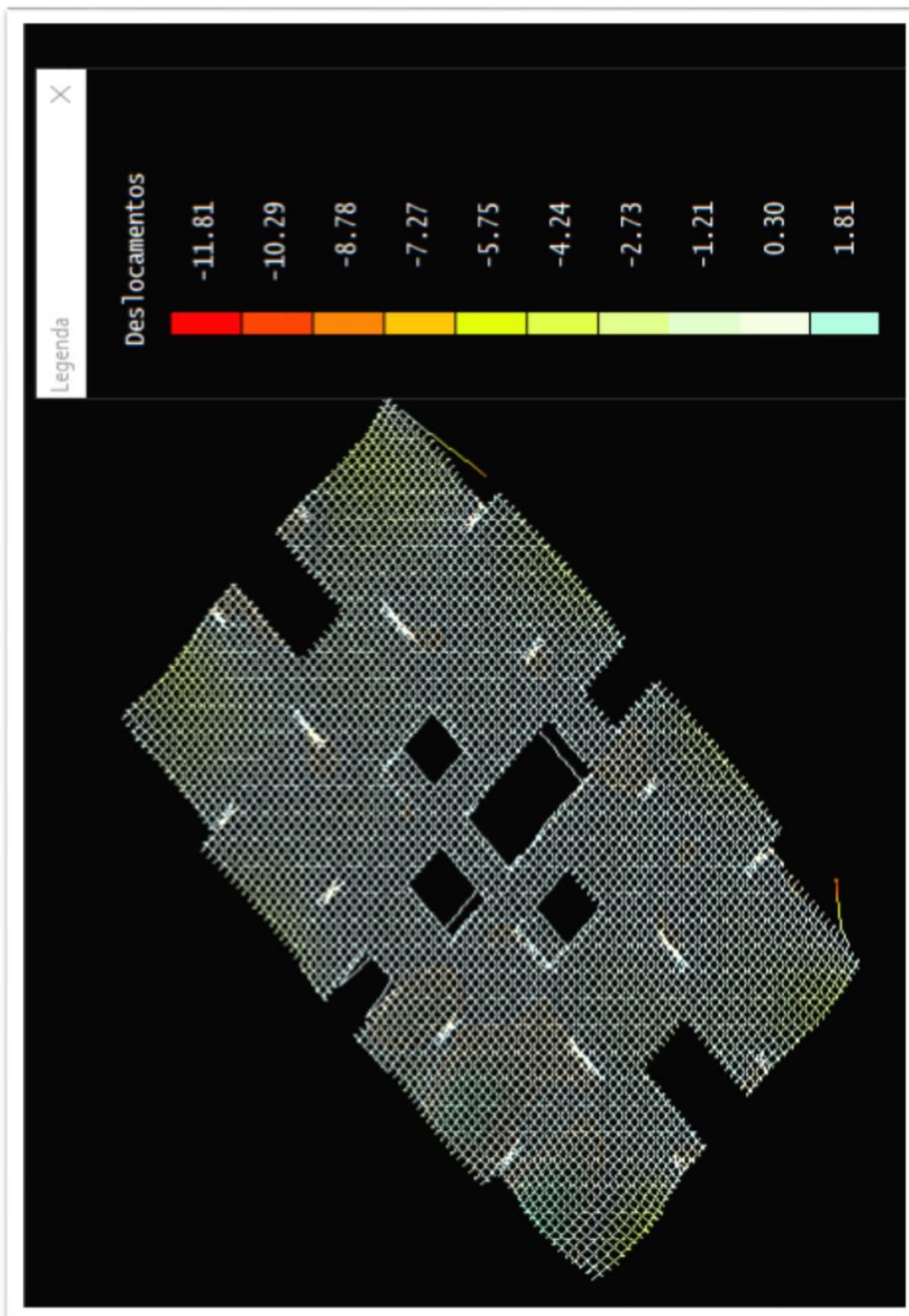
Fonte: próprio autor.

- b) Situação 2:** estrutura com 25 andares, sistema construtivo em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas, com lajes lisas maciças $h=22$ cm, $F_{ck} = 70\text{Mpa}$ (obs. foram feitos cálculos com vários F_{ck} 's, porém, a meta estabelecida deveria chegar a uma resistência compatível com o mercado, mas, foi observado que o projeto necessitava de uma melhora na geometria dos pilares), mantendo-se o mesmo número e geometria de pilares da situação 1;

É visto na figura 5-14, que os deslocamentos da grelha no ELU estão fora do estabelecido pela NBR 6118:2014 (L/250), considerando os pilares como apoios fixos. Os deslocamentos mostrados estão em torno de $-5,75\text{cm}$ (vão de 583cm), então poderia haver um deslocamento de até $2,33\text{cm}$, ou seja, a estrutura está com os deslocamentos acima do permitido pela norma.

Vale lembrar que os deslocamentos obtidos já estão com consideração de concreto protendido com lajes lisas e cordoalhas engraxadas e seu devido hiperestático aplicado, porém, neste exemplo não se modifica nenhuma geometria de pilares, o que mostra que para cada definição arquitetônica o processo de definição estrutural precisa ser alinhado com os parâmetros regidos pela NBR 6118:2014.

Figura 5-14 - Grelha com os deslocamentos no ELU, situação 2.



Fonte: próprio autor.

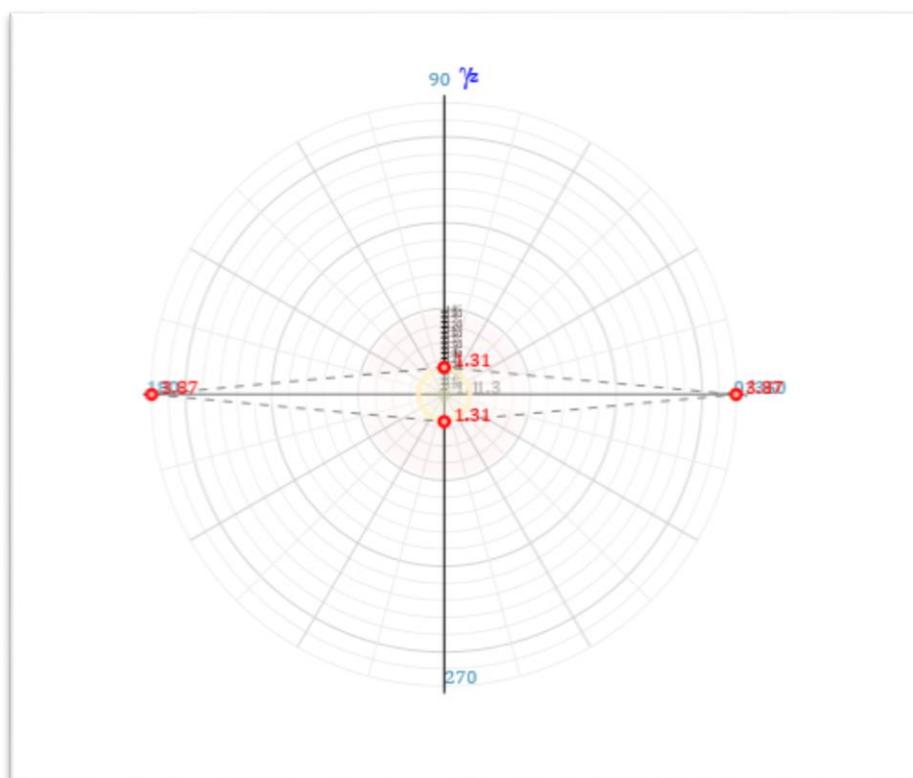
A seguir se apresentam os principais parâmetros de estabilidade obtidos da análise estrutural do edifício, de acordo com o quadro 5-4 que mostram os parâmetros gerais, e na figura 5-15 se mostra graficamente os dados da estabilidade global para combinações ELU dos pilares. É importante notar que o alto coeficiente de instabilidade (3,87) indica a necessidade de considerar contraventamentos (núcleos rígidos).

Quadro 5-4 - Parâmetros de estabilidade situação 02.

Parâmetro	Valor
GamaZ	3,87
FAVt	3,93
Alfa	2,27

Fonte: próprio autor.

Figura 5-15 - Parâmetros de estabilidade global ELU de pilares situação 2.



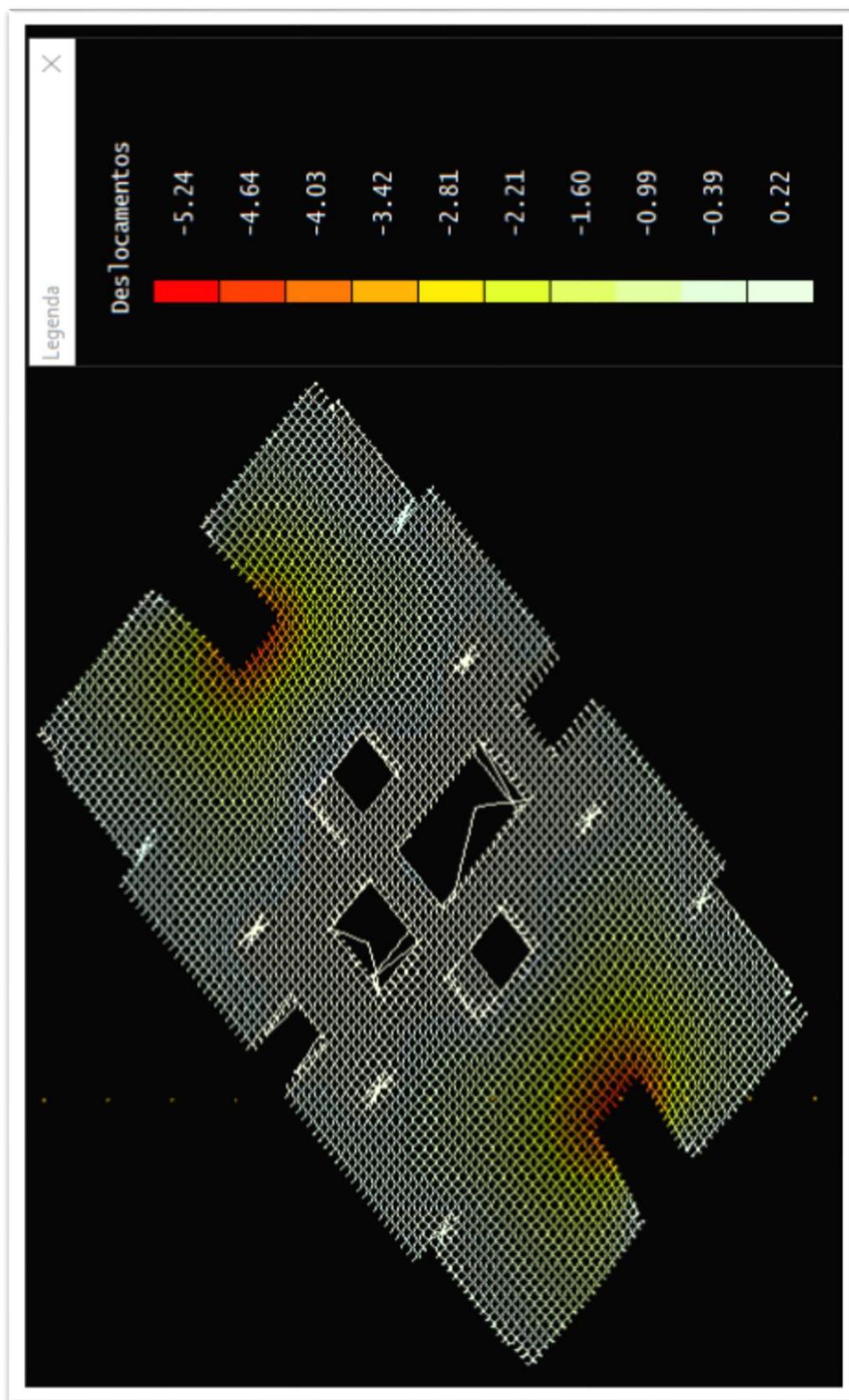
Fonte: próprio autor.

- c) **Situação 3:** estrutura com 25 andares, sistema construtivo em concreto protendido com uso de cordoalhas engraxadas, com lajes lisas maciças $h=24$ cm com diminuição do número de pilares e aumento da seção de alguns pilares bem como seus núcleos rígidos, utilização de $f_{ck}=50$ Mpa.

Observar na figura 5-16, que os deslocamentos da grelha no ELU estão dentro do estabelecido pela NBR 6118:2014 (L/250), considerando os pilares como apoios fixos. Os deslocamentos mostrados estão em torno de -4,64cm (vão de 1476 cm), a estrutura poderia ter um deslocamento de até 5,90cm, desta maneira a estrutura está com os deslocamentos dentro do permitido pela norma.

Os deslocamentos foram obtidos já com consideração de concreto protendido com lajes lisas e cordoalhas engraxadas, porém, neste exemplo são modificadas as geometrias de alguns pilares e diminuídos o número de pilares e fazendo com que os núcleos rígidos absorvam os respectivos deslocamentos laterais, assim é necessário adequar a estrutura ao projeto arquitetônico, porém somente houveram benefícios, a arquitetura se mostra mais limpa e execução mais ágil, então foram alinhados os parâmetros rígidos pela NBR 6118:2014.

Figura 5-16 - Grelha com os deslocamentos no ELU, situação 3.



Fonte: próprio autor.

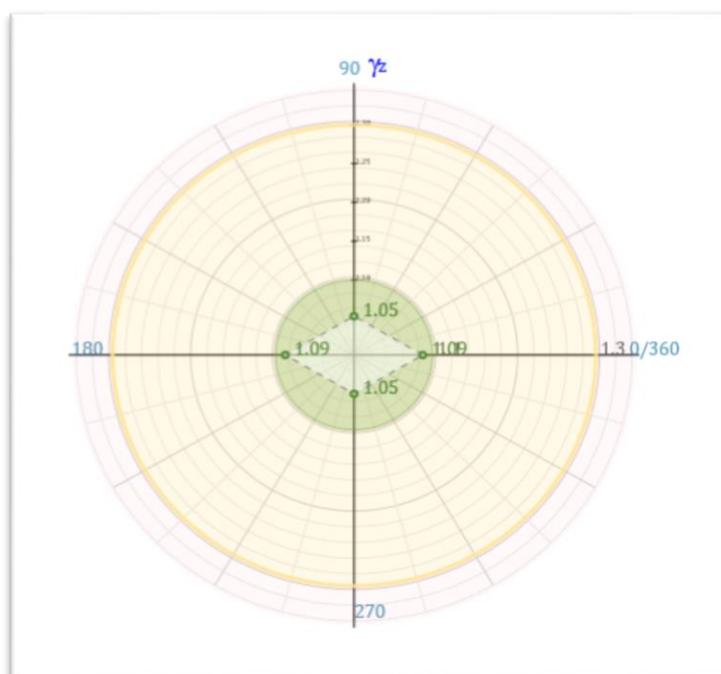
A seguir apresenta-se os principais parâmetros de estabilidade obtidos da análise estrutural do edifício, conforme demonstra o quadro 5-5 os parâmetros gerais, e na figura 5-17 mostra graficamente a estabilidade global para combinações ELU dos pilares. O que se pode ser visto agora coeficientes de instabilidade numericamente próximos aos do prédio tradicional, mostrando que este arranjo de pilares permite que o prédio protendido tenha uma performance similar ao tradicional quanto às ações laterais.

Quadro 5-5 - Parâmetros de estabilidade situação 03.

Parâmetro	Valor
GamaZ	1,09
FAVt	1,09
Alfa	0,73

Fonte: próprio autor.

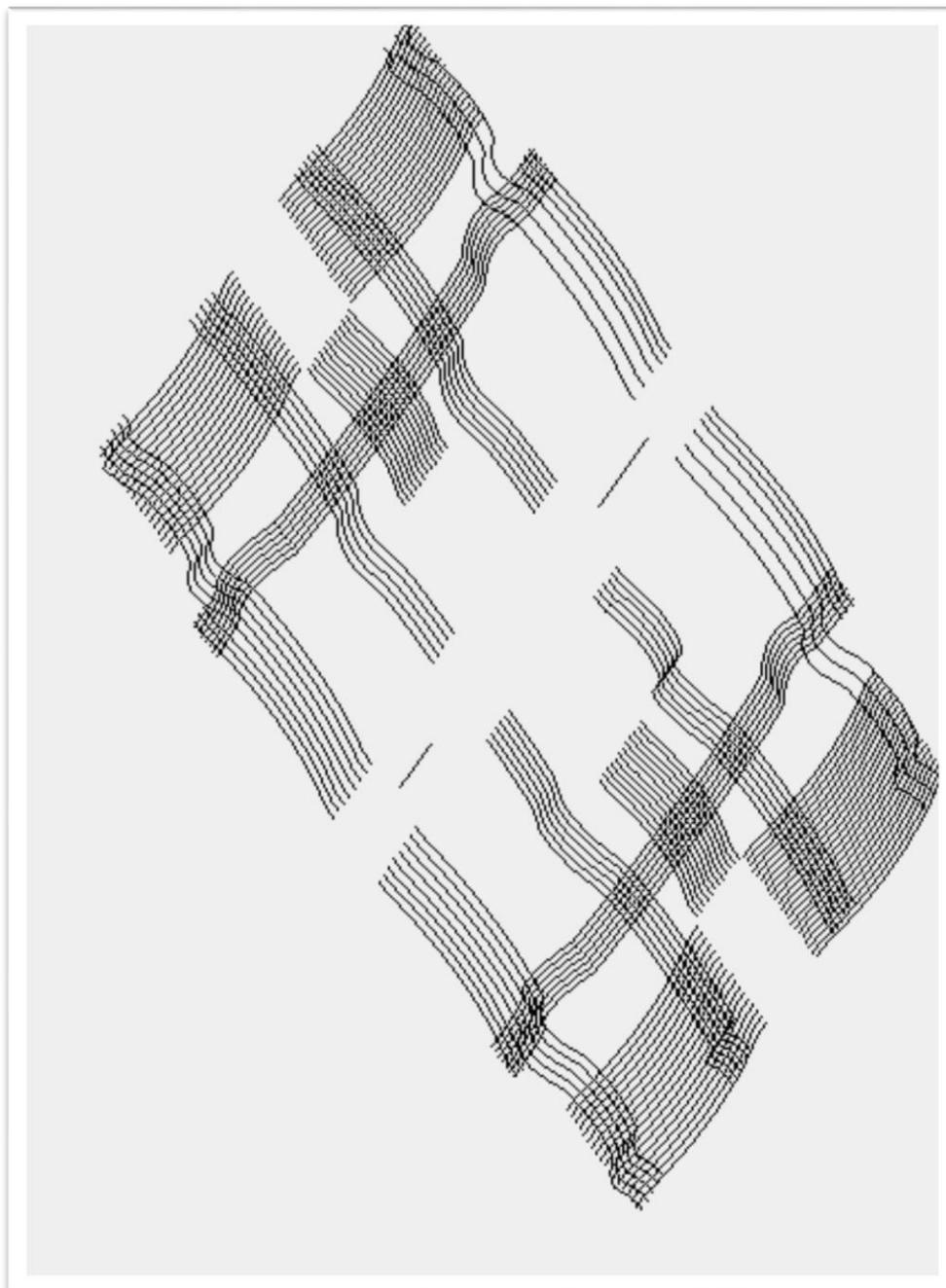
Figura 5-17 - Parâmetros de estabilidade global ELU de pilares situação 3.



Fonte – Próprio autor.

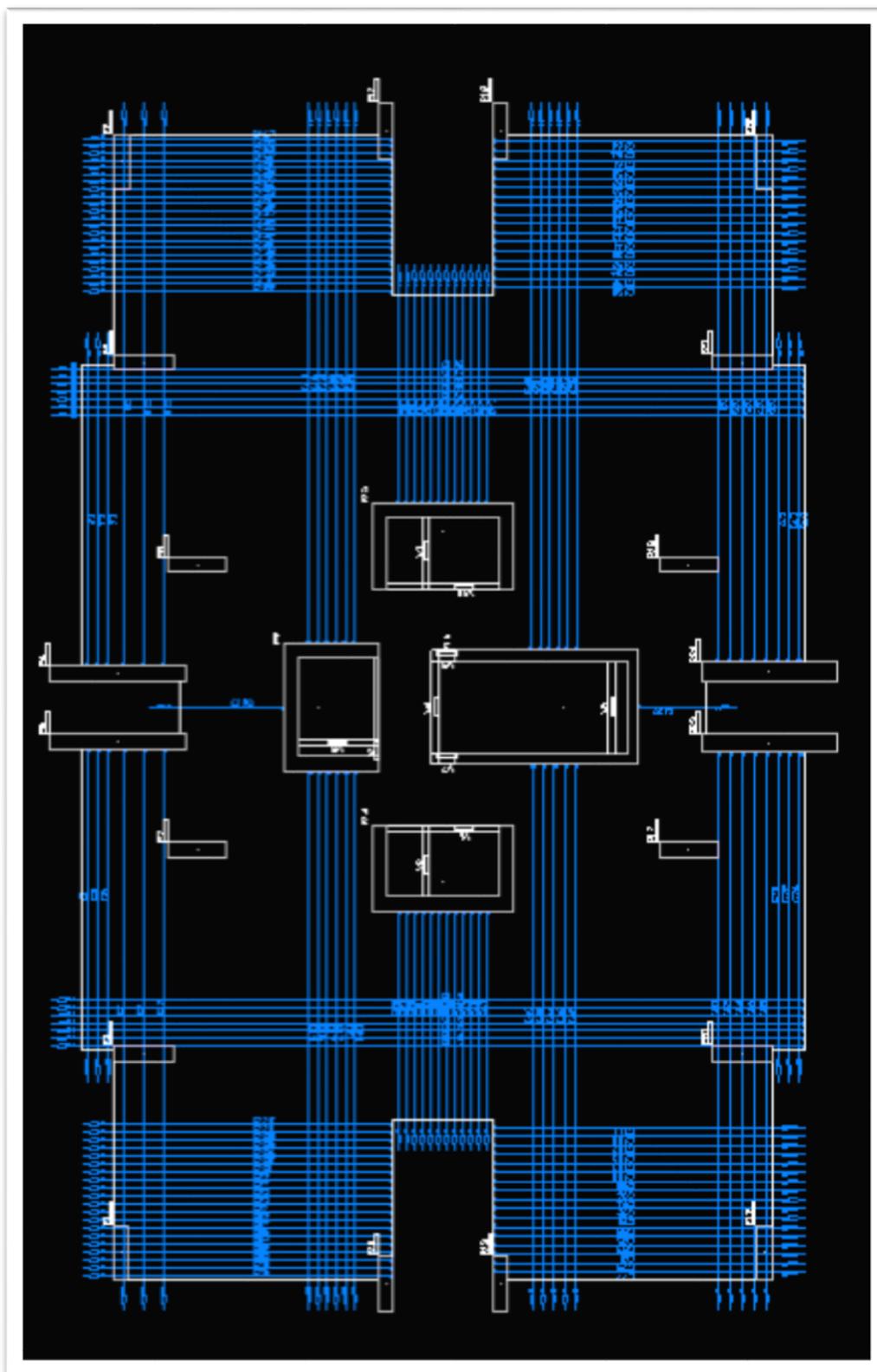
Nas Figuras 5-18 e 5-19 observa-se a disposição dos cabos em 3D e em planta, nas figuras 5-20, 5-21 e 5-22, mostra-se os momentos fletores, tensões e neste caso o controle total das fissurações de uma RPU após o cálculo do hiperestático, bem como o perfil de cabos.

Figura 5-18 - Disposição das cordoalhas no pavimento tipo situação 3 em 3D.



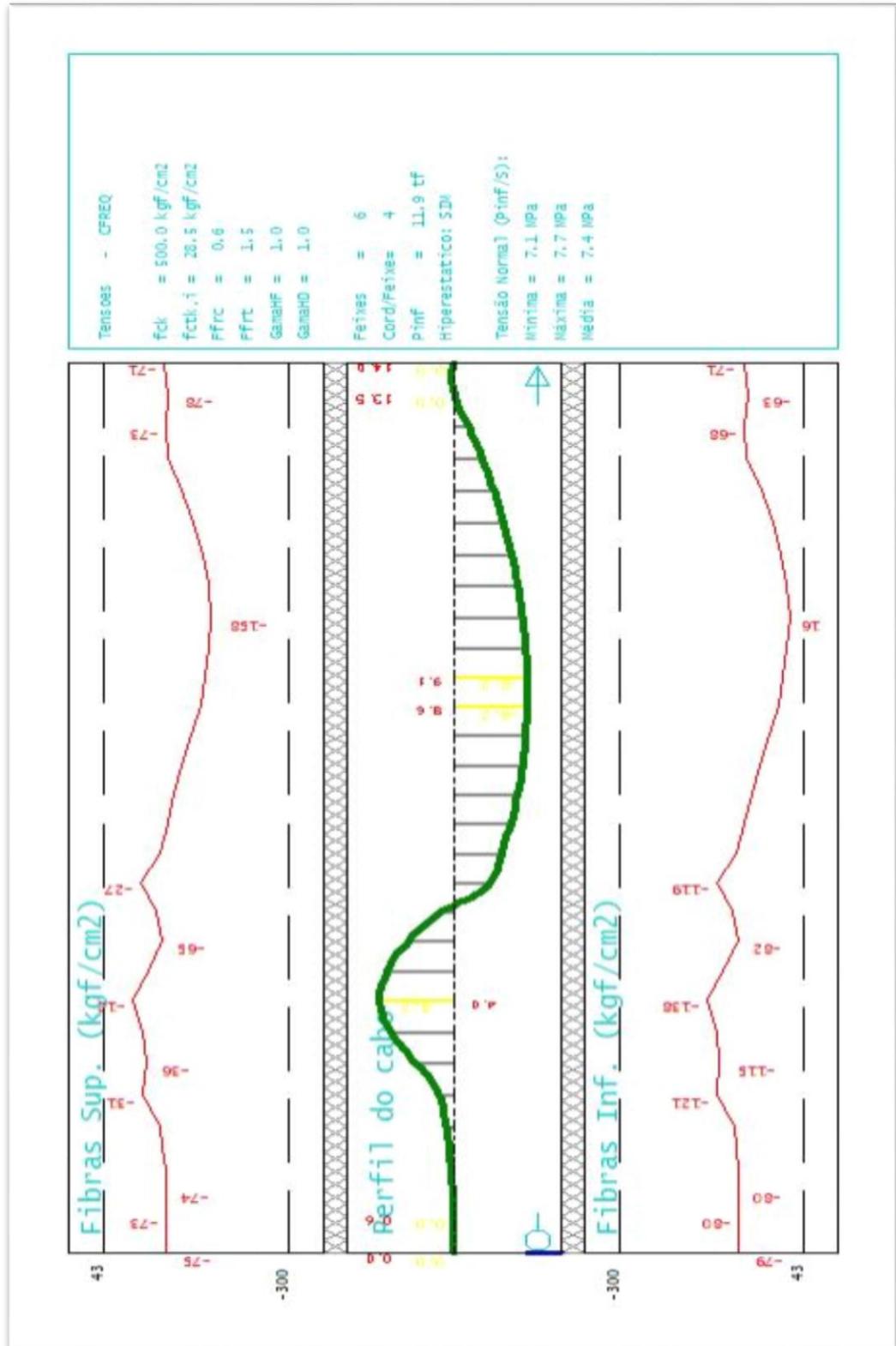
Fonte: próprio autor.

Figura 5-19 - Disposição das cordoalhas no pavimento tipo situação 3 em planta.



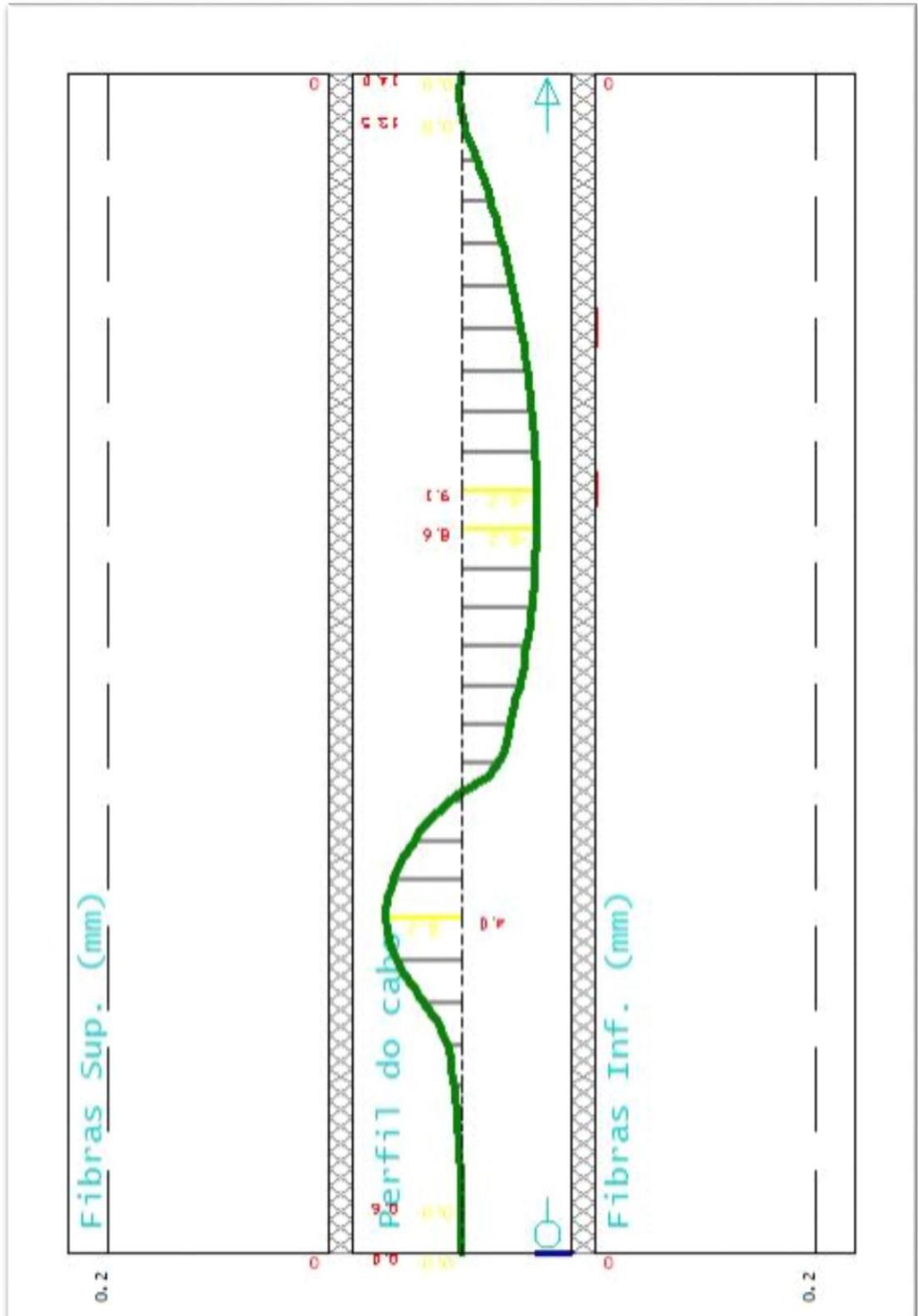
Fonte: próprio autor.

Figura 5-21 - Disposição das tensões e cabos na RPU 34.



Fonte: próprio autor.

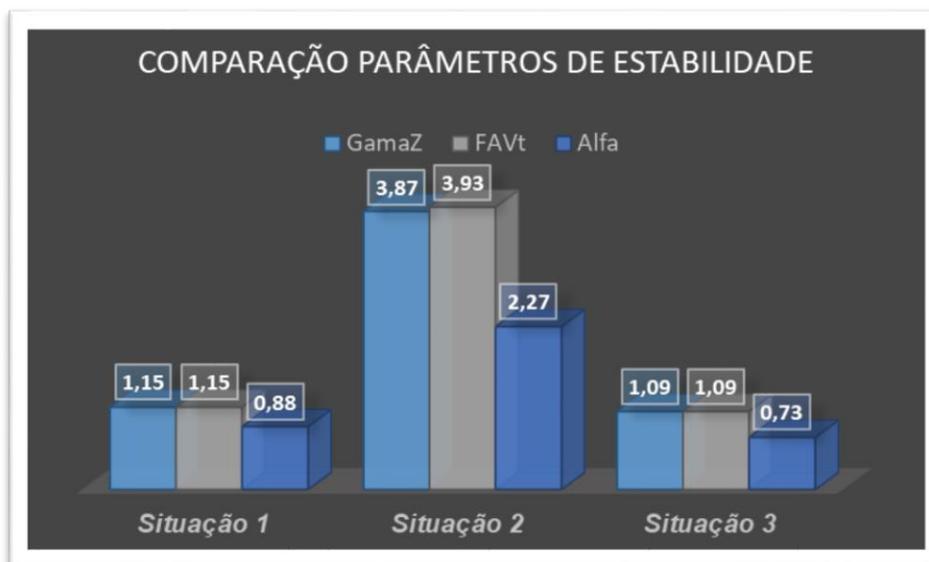
Figura 5-22 - Disposição do controle total das fissurações na RPU 34.



Fonte: próprio autor.

Na figura 5-23 mostra-se graficamente as diferenças dos parâmetros de estabilidade global, GamaZ, FAVt e Alfa para os três tipos de estruturas utilizadas no desenvolvimento do trabalho (situação 1,2 e 3) para comparação.

Figura 5-23 - Comparação dos parâmetros de estabilidade global para as situações 1,2 e 3.



Fonte: próprio autor.

Demonstra-se que foram necessárias as alterações dos pilares para compará-los com a estrutura tradicional e a estrutura em concreto protendido, atendendo a norma NBR 6118:2014 e possuindo assim um comportamento similar. Nas figuras 5-24 e 5-25 são mostrados os respectivos dados e as diferenças encontradas na área de pilares.

Figura 5-24 - Dados das geometrias dos pilares e sua área para a situação 1 e 2.

SITUAÇÃO 1 E 2				
Pilares	Largura (m)	Comp (m)	Altura (m)	Área (m ²)
P1	0,40	4,10	2,75	24,75
P2	0,40	4,10	2,75	24,75
P3	0,22	0,99	2,75	6,66
P4	0,30	1,65	2,75	10,73
P5	0,30	1,65	2,75	10,73
P6	0,22	0,99	2,75	6,66
P7	0,25	0,59	2,75	4,62
P8	0,25	0,59	2,75	4,62
P9	0,22	0,99	2,75	6,66
P10	0,22	0,99	2,75	6,66
P11	0,28	0,99	2,75	6,99
P12	0,30	2,30	2,75	14,30
P13	0,30	2,30	2,75	14,30
P14	0,28	0,99	2,75	6,99
P15	0,22	2,40	2,75	14,41
P16	0,22	2,40	2,75	14,41
P17	0,25	2,35	2,75	14,30
P18	0,25	2,35	2,75	14,30
P19	0,28	1,55	2,75	10,04
P20	0,28	1,55	2,75	10,04
P21	0,19	1,59	2,75	9,79
P22	0,19	1,59	2,75	9,79
P23	0,28	1,55	2,75	10,04
P24	0,28	1,55	2,75	10,04
P25	0,25	2,35	2,75	14,30
P26	0,25	2,35	2,75	14,30
P27	0,28	0,99	2,75	6,99
P28	0,30	2,30	2,75	14,30
P29	0,30	2,30	2,75	14,30
P30	0,28	0,99	2,75	6,99
P31	5,01	0,30	2,75	29,21
P32	2,01	0,30	2,75	12,71
P33	0,22	0,99	2,75	6,66
P34	0,22	0,99	2,75	6,66
P35	0,25	1,59	2,75	10,12
P36	0,25	1,59	2,75	10,12
P37	0,30	1,65	2,75	10,73
P38	0,30	1,65	2,75	10,73
P39	0,22	0,99	2,75	6,66
P40	0,22	0,99	2,75	6,66
P41	0,40	4,10	2,75	24,75
P42	0,40	4,10	2,75	24,75
				497,42

OBS: P15-16-17-18-25-26-31 e 32 NR = Núcleo Rígido Elevador e Escada

Fonte: próprio autor.

Figura 5-25- Dados das geometrias dos pilares e sua área para a situação 3.

SITUAÇÃO 3				
Pilares	Largura (m)	Comp (m)	Altura (m)	Área (m ²)
P1	0,40	1,50	2,64	10,03
P2	0,40	1,50	2,64	10,03
P3	0,45	1,65	2,64	11,09
P4	0,40	1,65	2,64	10,82
P5	0,40	3,71	2,64	21,70
P6	0,40	3,71	2,64	21,70
P7	1,40	1,59	2,64	15,79
P8	0,40	1,59	2,64	10,51
P9	NR ELEV			16,68
P10	1,40	1,55	2,64	15,58
P11	0,40	1,55	2,64	10,30
P12	0,40	1,55	2,64	10,30
P13	0,40	1,55	2,64	10,30
P14	NR ELEV			32,73
P15	NR ELEV			32,73
P16	NR ESC			7,52
P17	0,40	1,59	2,64	10,51
P18	0,40	1,59	2,64	10,51
P19	0,40	1,50	2,64	10,03
P20	0,45	1,65	2,64	11,09
P21	0,40	1,65	2,64	10,82
P22	0,45	1,50	2,64	10,30
P23	0,50	3,71	2,64	22,23
P24	0,50	3,71	2,64	22,23
				355,51

OBS: NR = Núcleo Rígido Elevador e Escada

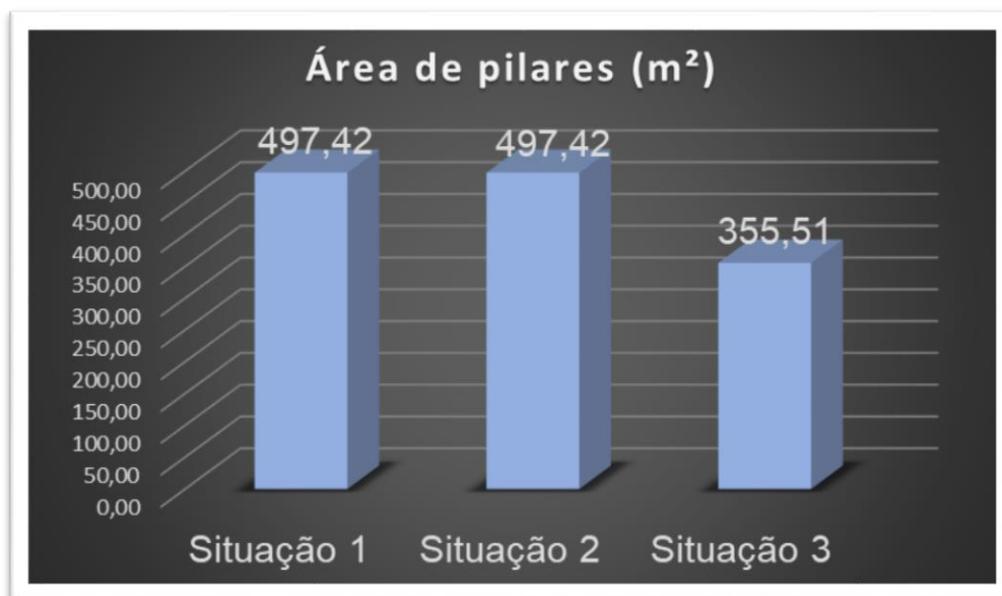
Fonte: próprio autor.

Com a análise de quantitativo de pilares, comparando estrutura de concreto tradicional, com a metodologia de estruturas protendidas com cordoalhas engraxadas e lajes lisas, houve uma diminuição de 18 pilares, o que contabilizam uma diminuição

de 141,91 m² de área deste elemento, perfazendo uma diminuição de 28,53% de redução de área de formas de pilares, sem mencionar a área de vigas.

A área total de pilares da situação 1 e 2 é de 497,42 m² de forma de pilares, contra 355,51 m² de forma para situação 3. Segue figura 5-26 que se demonstra graficamente esta diferença:

Figura 5-26 - Comparação de área de forma de pilares nas situações 1,2, e 3.



Fonte: próprio autor.

É visto que na situação 3, se mantém uma economia de forma direta em relação ao material de fôrmas e conseqüentemente de mão-de-obra.

Neste trabalho, os valores de corte e montagem dos cabos de protensão foram elaborados por uma empresa de protensão com filial na cidade de São Paulo com os custos elaborados especificamente para esta obra hipotética na cidade de Ribeirão Preto.

É de relevante importância descrever que até pouco tempo as ancoragens passivas para protensão tinham que ser adquiridas em empresas de outras cidades, porém hoje existe uma empresa na cidade de Ribeirão Preto.

5.5 VALOR DA EDIFICAÇÃO EM CONCRETO ARMADO TRADICIONAL

Nas próximas etapas são mostrados os resultados dos quantitativos para o exemplo da edificação estudada. Os dados obtidos para a estrutura tradicional são

realistas, por se tratar de uma obra já executada pelo autor que possui acesso a todo seu planejamento e custos.

Se observa a seguir o custo total da edificação em sua concepção de viabilidade, atualizada pelo INCC (Índice Nacional da Construção Civil – Sinduscon-PR), (quadro 5-6).

Quadro 5-6 - Tabela orçamentária do edifício estudado.

CUSTO TOTAL DA EDIFICAÇÃO			
	INCC		
Orçamento inicial	jan./12	maio/18	Orçamento corrigido
R\$35.396.843,55	492,106	726,923	R\$52.287.067,63

Fonte: próprio autor.

Como informado usa-se como modelo um edifício já executado na cidade de Ribeirão Preto. Este edifício está localizado na região sul desta cidade, tendo sido entregue aos seus moradores no ano de 2016. Na figura 5-27 é mostrada a perspectiva do modelo utilizado.

Figura 5-27 – Foto do edifício em perspectiva.



Fonte: próprio autor.

De acordo com o informado no decorrer do trabalho, este edifício foi executado em estrutura de concreto tradicional, ao longo do desenvolvimento deste estudo se realiza os cálculos da mesma tipologia em que foi construído, obedecendo a NBR: 6118:2014, porém, em concreto protendido.

A modelagem do edifício foi realizada pelos parâmetros da NBR: 6118:2014, desta maneira garante-se a parametrização para estudo realizado. Tanto as cargas de peso próprio, carga accidental e ventos obedecem aos critérios já informados.

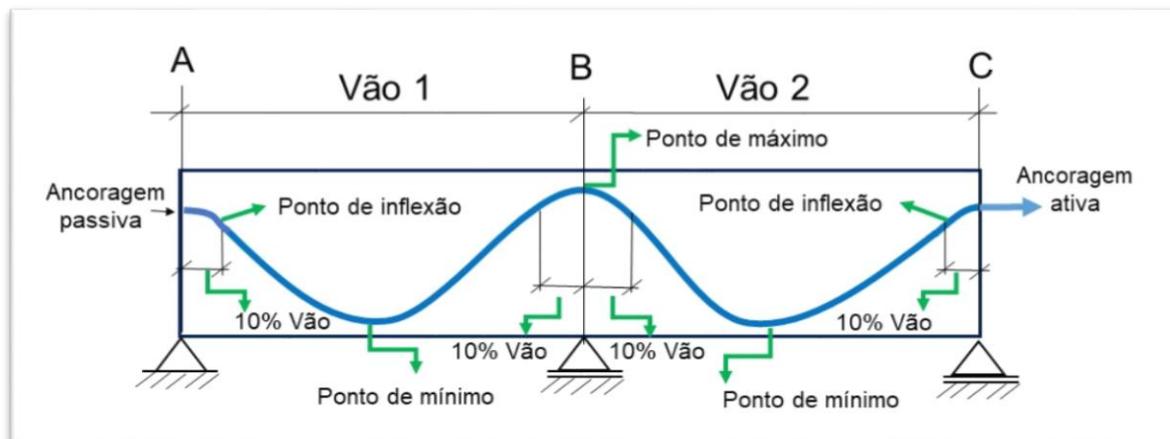
5.6 TRAÇADO DOS CABOS

A principal finalidade da protensão numa estrutura é a diminuição ou a total remoção de deformações causadas pelos carregamentos em elementos flexionados. No caso do edifício estudado, a linha de lançamento dos cabos que definem a RPU, foi concebida com base na análise das deformações das lajes, já os perfis dos cabos são definidos pelo próprio programa.

De acordo com SANTOS (2017), para que esse efeito seja obtido, o cabo precisa descrever um traçado curvo ou mesmo poligonal. O mais comum é que ele descreva um traçado parabólico, como exibido a seguir nas figuras 5-28 e 5-29.

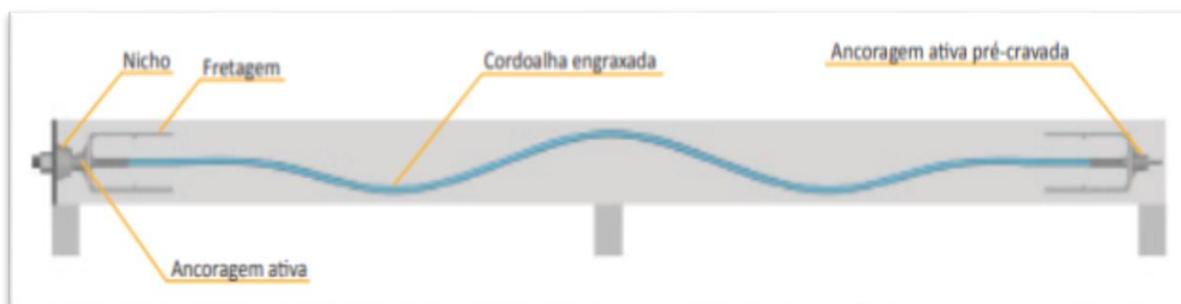
Para facilidade de execução da montagem dos cabos na laje e protensão, os cabos são colocados exatamente no centro de gravidade da seção transversal da laje e após conforme se distancia da borda da laje são formadas uma sucessão de parábolas até que chegue na outra extremidade da laje, também em seu respectivo centro de gravidade da seção transversal. Deve-se distribuir e montar os cabos conforme descrito em SANTOS (2017), onde os pontos de inflexão ficam posicionados a uma distância de 10% dos apoios. Já os pontos de mínimo geralmente ficam no meio do vão, mas, podem ser encontrados numa faixa que vão de 30% a 70% dos apoios. Os pontos de máximo ficam localizados nos apoios intermediários do elemento.

Figura 5-28 - Traçado típico de um cabo de protensão vista de perfil.



Fonte: Adaptado, SANTOS (2017).

Figura 5-29 - Traçado típico de um cabo de protensão vista longitudinal.



Fonte: RUDLOLFF (2018).

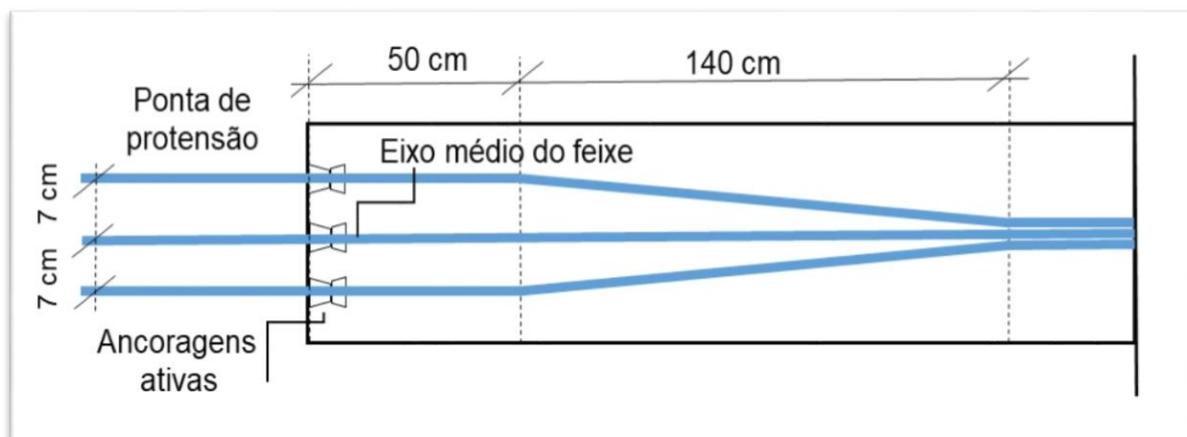
5.7 PROTENSÃO DE LAJES

As lajes denominadas lisas apoiam-se diretamente nos pilares, eliminando a necessidade de vigas que é o foco de nosso estudo nesta fase.

A norma brasileira permite que se projete esse tipo de laje, desde que sua altura seja no mínimo 20cm, mas, em nosso caso é de 24cm. Um dos problemas desse tipo de estrutura é sua flexibilidade, requerendo do engenheiro cuidados para que a estrutura não deforme excessivamente. No caso de nosso exemplo se combate esta flexibilidade por meio e aumento das seções dos núcleos rígidos.

Como afirma SANTOS (2017), nas lajes maciças com protensão nas duas direções, é comum que o engenheiro de cálculo estrutural distribua cabos numa direção e concentre-os na outra. Isso é feito para que não haja interferência de cabos em direções ortogonais tentando ocupar a mesma ordenada. Os cabos distribuídos geralmente são agrupados em feixes de duas a quatro cordoalhas, que serão demonstradas a seguir pela figura 5-30.

Figura 5-30 - Feixe de três cordoalhas.



Fonte: Adaptado, SANTOS (2017).

5.8 MODIFICAÇÕES DAS SEÇÕES DO EDIFÍCIO EM CP

Para manter a arquitetura do edifício estudado, é necessário o uso de uma laje de $h=24$ cm, com concreto F_{ck} 50 mpa. Também é imprescindível a eliminação de dezoito pilares, o que representa uma redução de 28,53% em formas, passando de 497,42 m² de forma do modelo em concreto tradicional para 355,51m² em concreto protendido, uma redução de 141,91 m².

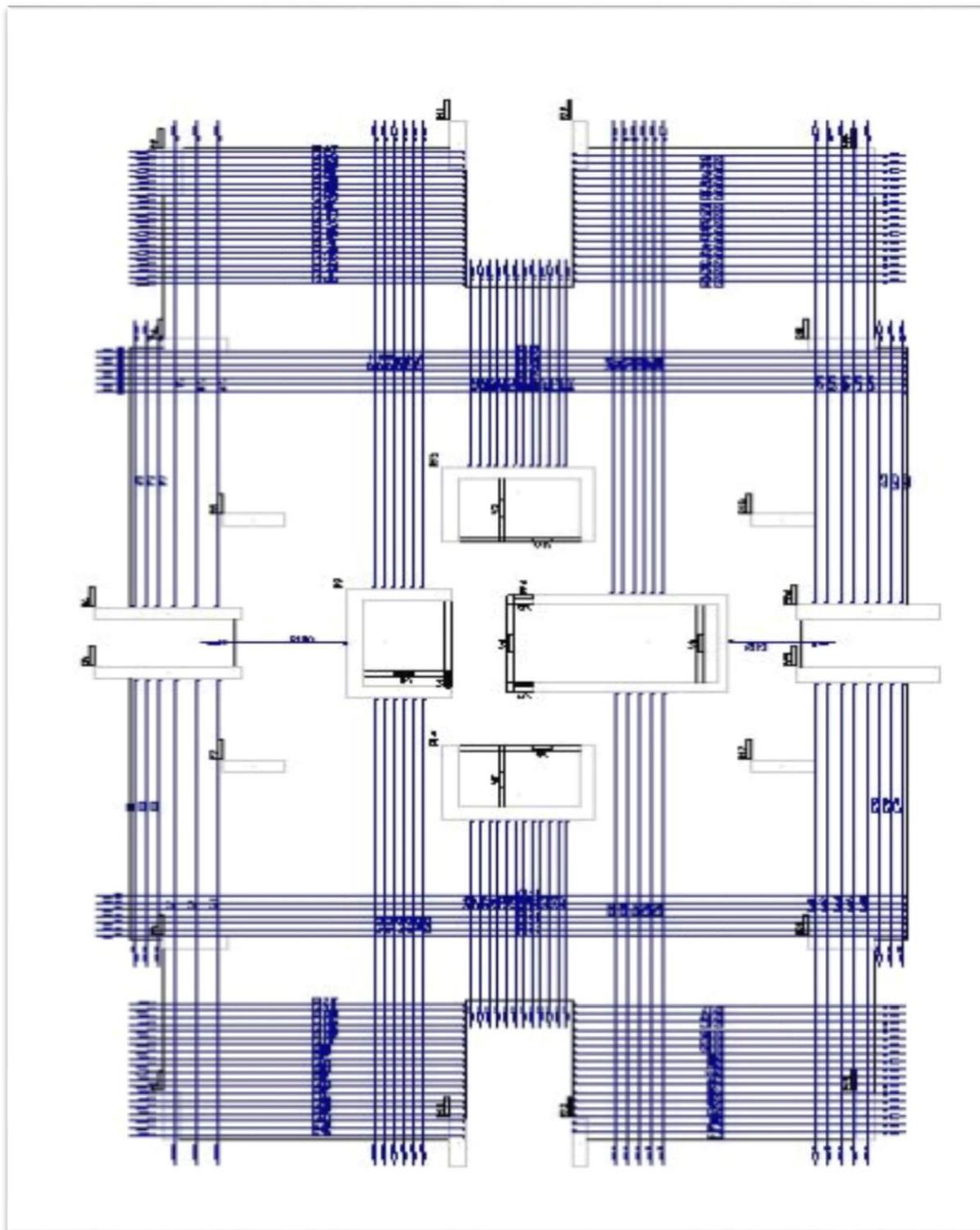
O projeto foi parametrizado com o modelo em lajes lisas em concreto protendido e atende as diretrizes da NBR 6118:2014. As deformações presentes na laje estão abaixo do preconizado em norma, cujo valor é obtido por $L/250$, ou seja, teoricamente sem fissurações.

5.9 DISTRIBUIÇÃO DAS CORDOALHAS

Seguida a metodologia de RPU e RTE já descrita, foi definida uma distribuição das cordoalhas que atende os quesitos de norma. Mesmo com a arquitetura já estabelecida, foi obtido um bom controle de deformações e atingida uma boa economia de materiais e mão-de-obra, mostradas nos próximos itens.

Segue na figura 5-31, a disposição dos cabos do modelo hipotético, esta distribuição de cordoalhas é apenas uma das poucas maneiras de fazer, não significa afirmar que não existam melhores formas de distribuição, mas, que havendo possibilidade do engenheiro de cálculo estrutural participar desde o início da concepção estrutural acredita-se que muitas outras maneiras possam ser sugeridas, haja vista que haverá grandes possibilidades de se fazer ajustes na arquitetura sem perder sua essência, e tornar o projeto estrutural mais eficiente, no que tange a qualidade e economia.

Figura 5-31 - Distribuição cordoalhas modelo hipotético.



Fonte: próprio autor.

5.10 COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE OS SISTEMAS PROPOSTOS

Com a elaboração do projeto em concreto protendido de um edifício hipotético, são obtidas as informações necessárias para que se faça uma comparação econômica entre os sistemas.

É usada como parâmetro de comparação, uma planilha orçamentária do edifício em concreto armado executado pelo autor, em que cada item é explicado a seguir.

- a) Administração/custo indireto: São os gastos de rateio de todos os custos da administração central da empresa, como pró-labore dos diretores, gerentes, coordenadores, salários dos funcionários dos diversos departamentos, como qualidade, RH, planejamento, contas a pagar, financeiro, compras, despesas para manutenção do escritório central, etc. Despesas administrativas do canteiros de obras, como sua execução, salários dos engenheiros, estagiários, mestres-de-obras, encarregados, almoxarife, auxiliar de almoxarife, vigia diurno e noturno, porteiro, taxas, seguros, despesas para manutenção do canteiro (água, luz, telefone, internet, alimentação, despesas com viagens, consultorias) entre outros. Estes custos são contabilizados a partir do momento do início da execução do canteiro de obras até o final da execução da estrutura, portanto há um hiato de aproximadamente três a quatro meses até o início da execução da estrutura, porém é preciso contabilizá-los. No caso deste edifício os ciclos das lajes em concreto tradicional giram em torno de 9,5 dias corridos (obtidos na obra durante a execução supervisionada pelo autor);
- b) Concreto: Se trata do concreto que será utilizado para execução da estrutura, sendo que as características são definidas pelo engenheiro de cálculo estrutural;
- c) Mão-de-obra forma: O valor que deve ser pago em m² à empresa que faz a fabricação, montagem e desmontagem da forma de madeira;
- d) Material forma: O valor dos materiais utilizados para a execução da forma, como madeira compensada resinada plastificada com onze lâminas e vinte usos, caibros, pontaletes, pregos, tinta, desmoldante, rolo de lã, etc.
- e) Escoramento: Sistema de escoramento metálico para as formas;
- f) Aço CA-50: Aço usado para execução da estrutura;

- g) Mão-de-obra montagem: Valor da mão-de-obra para montagem do aço;
- h) Corte e dobra aço CA-50: Valor pago para o corte e montagem do aço utilizado para execução da estrutura.

No caso do edifício hipotético em concreto protendido são inclusos alguns itens inerentes ao sistema e que geram custos, conforme descrito a seguir:

- a) Administração/custo indireto: São os gastos de rateio de todos os custos da administração central da empresa, como pró-labore dos diretores, gerentes, coordenadores, salários dos funcionários dos diversos departamentos, como qualidade, RH, planejamento, contas a pagar, financeiro, compras, despesas para manutenção do escritório central, etc. Despesas administrativas do canteiros de obras, como sua execução, salários dos engenheiros, estagiários, mestres-de-obras, encarregados, almoxarife, auxiliar de almoxarife, vigia diurno e noturno, porteiro, taxas, seguros, despesas para manutenção do canteiro (água, luz, telefone, internet, alimentação, despesas com viagens, consultorias), entre outros. Estes custos são iniciados a partir do momento do início da execução do canteiro de obras até o final da execução da estrutura, portanto há um hiato de aproximadamente três a quatro meses até o início da execução da estrutura, porém é preciso contabilizá-los. No caso do edifício hipotético, em estrutura de concreto protendido, os ciclos das lajes foram obtidos por entrevistas verbais feitas pelo autor em obras visitadas na cidade de Fortaleza e Chapecó, onde este sistema é utilizado amplamente, os ciclos giram em torno de 6,7 dias corridos;
- b) Concreto: Se trata do concreto que será utilizado para execução da estrutura, sendo que as características são definidas pelo engenheiro de cálculo estrutural;
- c) Mão-de-obra forma: O valor que deve ser pago em m² à empresa que faz a fabricação, montagem e desmontagem da forma de madeira;
- d) Material forma: O valor dos materiais utilizados para a execução da forma, como madeira compensada resinada plastificada com onze lâminas e vinte usos, caibros, pontaletes, pregos, tinta, desmoldante, rolo de lã, etc.
- e) Escoramento: Sistema de escoramento metálico para as formas;

- f) Aço CA-50: Aço usado para execução da estrutura;
- g) Aço CP 190-RB - 12,7mm: Cordoalhas engraxadas para execução da estrutura;
- h) Mão-de-obra montagem: Valor da mão-de-obra para montagem do aço;
- i) Ancoragens ativa mais cunha: Valor das ancoragens ativas e a cunha para fixação da cordoalha;
- j) Ancoragens passiva mais cunha: Valor das ancoragens ativas e a cunha para fixação da cordoalha;
- k) Materiais e acessórios: Valor dos materiais e acessórios necessário para o sistema de protensão, como: tintas, macacos hidráulicos, compressores, fitas isolantes, papel pardo betuminoso, bainhas etc;
- l) Apoio para cordoalha: Apoios para cordoalhas, do tipo cadeirinhas;
- m) Assessoria e consultoria: Custos com a empresa de protensão para assessoria e consultoria na execução da protensão;
- n) Corte e enrolação: Corte, preparação e enrolação das cordoalhas para transporte até a obra;
- o) Corte e dobra aço CA-50: Valor pago para o corte e montagem do aço utilizado para execução da estrutura.

As informações quantitativas e econômicas da execução da estrutura do edifício em concreto armado tradicional (CA), são apresentadas do quadro 5-7, na sequência são apresentadas no quadro 5-8 os custos do sistema em concreto com uso de lajes lisas em cordoalhas engraxadas e no quadro 5-19 faz-se a comparação econômica entre os dois sistemas.

Quadro 5-7 - Quadro de custos Concreto Armado (CA).

Tipo Área/m ² 522,02		Nº Pavtos 25		
LAJE ARMADA - CA				
ESPECIFICAÇÃO	UNID.	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
ADMINISTRAÇÃO/CUSTO INDIRETO	mês	12,5	R\$130.000,00	R\$1.625.000,00
CONCRETO f _{ck} 30 MPa	m ³	2218,55263	R\$265,00	R\$587.916,45
MÃO DE OBRA FORMA	m ²	20880,7895	R\$50,00	R\$1.044.039,47
MATERIAL FORMA	m ²	1545,39474	R\$30,00	R\$46.361,84
ESCORAMENTO	m ³	686,842105	R\$12,00	R\$8.242,11
AÇO CA 50	Kg	326262,5	R\$3,20	R\$1.044.040,00
MÃO DE OBRA MONTAGEM	Kg	326262,5	R\$2,00	R\$652.525,00
CORTE E DOBRA CA50	Kg	326262,5	R\$0,40	R\$130.505,00
			TOTAL	R\$5.138.629,87

Fonte: próprio autor.

Como informado no quadro anterior, se observa que os custos da edificação com uso de estruturas de concreto armado tradicional, apresenta um custo de R\$ 5.138.629,87 (Cinco milhões, cento e trinta e oito mil, seiscentos e sessenta e nove reais e oitenta e sete reais), que perfaz quase 10% do valor total da edificação.

Quadro 5-8 - Quadro de custos Concreto Protendido (CP).

Tipo Área/m ² 522,02		Nº Pavtos 25		
LAJE LISA PROTENDIDA - CP				
ESPECIFICAÇÃO	UNID.	QTD	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
ADMINISTRAÇÃO/CUSTO INDIRETO	mês	8,82	R\$130.000,00	R\$1.146.052,63
CONCRETO f_{ck} 45 Mpa*	m ³	3396,05	R\$265,00	R\$899.953,95
MÃO DE OBRA FORMA	m ²	17108,29	R\$25,00	R\$427.707,24
MATERIAL FORMA	m ²	1035,53	R\$30,00	R\$31.065,79
ESCORAMENTO	m ³	4567,63	R\$12,00	R\$54.811,58
AÇO CA 50	Kg	120375,00	R\$3,20	R\$385.200,00
AÇO CP 190-RB - 12,7mm	Kg	54876,71	R\$5,46	R\$299.626,84
MÃO DE OBRA MONTAGEM	Kg	175251,71	R\$2,00	R\$350.503,42
ANCORAGENS ATIVA + CUNHA	Unid.	4150,00	R\$12,57	R\$52.165,50
ANCORAGENS PASSIVA + CUNHA	Unid.	4150,00	R\$12,57	R\$52.165,50
MATERIAIS E ACESSÓRIOS	Unid.	54876,71	R\$0,10	R\$5.487,67
APOIO PARA CORDOALHA	Kg	54876,71	R\$1,80	R\$98.778,08
ASSESSORIA E CONSULTORIA	Kg	54876,71	R\$3,33	R\$182.739,45
CORTE E ENROLAÇÃO	Kg	54876,71	R\$0,90	R\$49.389,04
CORTE E DOBRA CA-50	Kg	120375,00	R\$0,40	R\$48.150,00
			TOTAL	R\$4.083.796,68

*Alteração da resistência do concreto para atender mais facilmente a punção
Fonte: próprio autor.

Com o uso do sistema estrutural em concreto protendido com lajes lisas utilizando-se de cordoalhas não aderentes, chega-se a um valor de R\$ 4.083.796,68 (Quatro milhões, oitenta e três mil, setecentos e noventa e seis reais e sessenta e oito centavos).

Na sequência é mostrada no quadro 5-10, as diferenças econômicas entre o sistema de concreto armado tradicional do edifício executado, e o sistema de concreto protendido com cordoalhas não aderentes em um edifício hipotético.

Quadro 5-9 - Quadro de custos CP x CA.

Tipo Área/m ² 522,02		Nº Pavtos = 25		
LAJE LISA PROTENDIDA - CP				
ESPECIFICAÇÃO	UNID.	QTD	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
ADMINISTRAÇÃO/CUSTO INDIRETO	mês	8,82	R\$130.000,00	R\$1.146.052,63
CONCRETO f _{ck} 45 MPa	m ³	3396,05	R\$265,00	R\$899.953,95
MÃO DE OBRA FORMA	m ²	17108,29	R\$25,00	R\$427.707,24
MATERIAL FORMA	m ²	1035,53	R\$30,00	R\$31.065,79
ESCORAMENTO	m ³	4567,63	R\$12,00	R\$54.811,58
AÇO CA 50	Kg	120375,00	R\$3,20	R\$385.200,00
AÇO CP 190-RB - 12,7mm	Kg	54876,71	R\$5,46	R\$299.626,84
MÃO DE OBRA MONTAGEM	Kg	175251,71	R\$2,00	R\$350.503,42
ANCORAGENS ATIVA + CUNHA	Unid.	4150,00	R\$12,57	R\$52.165,50
ANCORAGENS PASSIVA + CUNHA	Unid.	4150,00	R\$12,57	R\$52.165,50
MATERIAIS E ACESSÓRIOS	Unid.	54876,71	R\$0,10	R\$5.487,67
APOIO PARA CORDOALHA	Kg	54876,71	R\$1,80	R\$98.778,08
ASSESSORIA E CONSULTORIA	Kg	54876,71	R\$3,33	R\$182.739,45
CORTE E ENROLAÇÃO	Kg	54876,71	R\$0,90	R\$49.389,04
CORTE E DOBRA CA-50	Kg	120375,00	R\$0,40	R\$48.150,00
			TOTAL	R\$4.083.796,68

Tipo Área/m ² 522,02		Nº Pavtos = 25		
LAJE ARMADA - CA				
ESPECIFICAÇÃO	UNID.	QTD	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
ADMINISTRAÇÃO/CUSTO INDIRETO	mês	12,5	R\$130.000,00	R\$1.625.000,00
CONCRETO f _{ck} 30 MPa	m ³	2218,553	R\$265,00	R\$587.916,45
MÃO DE OBRA FORMA	m ²	20880,79	R\$50,00	R\$1.044.039,47
MATERIAL FORMA	m ²	1545,395	R\$30,00	R\$46.361,84
ESCORAMENTO	m ³	686,8421	R\$12,00	R\$8.242,11
AÇO CA 50	Kg	326262,5	R\$3,20	R\$1.044.040,00
MÃO DE OBRA MONTAGEM	Kg	326262,5	R\$2,00	R\$652.525,00
CORTE E DOBRA CA50	Kg	326262,5	R\$0,40	R\$130.505,00
DIFERENÇA ENTRE CONCRETO PROTENDIDO X CONCRETO ARMADO			TOTAL	R\$5.138.629,87
			R\$1.054.833,19	

Fonte: próprio autor.

Conforme mostrada no quadro anterior, a diferença hipotética entre o uso do sistema estrutural de concreto protendido e o uso do sistema de concreto armado tradicional para a edificação estudada é de R\$ 1.084.833,19 (Um milhão, oitenta e quatro mil, oitocentos e oitenta e três reais e dezenove centavos).

O orçamento confirma algumas das hipóteses já destacadas ao longo do texto. De forma geral em relação a estrutura protendida tem-se menor custo de montagem e quantidade e custo de aço, porém um maior custo de concreto.

Observa-se o que gera maior diferença em termos econômicos é o tempo de ciclo de concretagens, que chega até 6,7 dias, o que no final da execução de um edifício alto representa monetariamente um valor expressivo, pois, os custos da administração e custos indiretos de uma obra destas proporções giram em torno de R\$ 130.000,00/mês. A questão dos valores empregados no tempo gasto do ciclo destes dois exemplos fora obtida na prática com o prédio real feito em concreto armado e com a constatação nas visitas feitas em obras protendidas e comentários feitos no capítulo 4

Observa-se também, que mesmo que a empresa de protensão não seja de Ribeirão Preto, mas de São Paulo capital, não inviabiliza o uso deste sistema, pois o custo de mão-de-obra de montagem e protensão foi feito baseado em dados fornecidos por empresa da capital paulista deslocando mão-de-obra para a cidade.

Na pior das hipóteses se o tempo de execução fosse próximo para um sistema e outro o custo também teriam valores parecidos, mantendo-se para o segundo caso todas as vantagens já descritas no texto anteriormente

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro objetivo considerado deste trabalho era “se o sistema de lajes lisas com cordoalhas engraxadas pode ser usado em pavimentos de edificações de múltiplos andares comparado aos tradicionais”, foi respondido de forma positiva, em relação ao custo da estrutura. Isto está detalhado no capítulo 5, onde se apresenta um prédio real executado com o sistema tradicional, feito em Ribeirão Preto e comparado com um de mesma disposição arquitetônica com lajes lisas protendidas. O cálculo de ambos foi realizado pelo autor nas duas situações, embora a de concreto armado já houvesse um projeto feito por um outro autor, cuja disposição estrutural foi tomada como base. O resultado da estrutura em lajes lisas resultou em valor de custo final menor, principalmente pela possibilidade de se diminuir os custos indiretos da execução da estrutura. Ainda que este item não se confirme em outras situações, da forma aqui apresentada (a composição de custo indireto seja diferente) o valor do restante de custos (sem o custo indireto) tem valores próximos, considerando-se assim que a solução em lajes lisas é pertinente quanto levada em conta o custo da estrutura (sem contar a fundação que não foi compilada neste trabalho).

Na questão de desempenho tomou-se como variável principal a ser usada a da “rigidez equivalente” das estruturas quanto às ações laterais, ou seja, os valores de coeficientes de instabilidade (γ_z). O projeto do modelo em laje protendida foi feito para ter um valor de coeficiente similar ao da estrutura em concreto armado, sendo neste caso necessário o aumento da espessura de alguns pilares e núcleos de contraventamento, mas ainda respeitando os espaços previstos na arquitetura, reduzindo-se até a quantidade dos pilares. Os valores (γ_z) resultaram em 1,15 e 1,09 respectivamente para o projeto em concreto armado e concreto protendido. As demais condições de desempenho são explicadas ao longo do texto e tendem a concluir que a estrutura com lajes protendidas devem ter um melhor desempenho por questões inerentes ao uso da protensão. Necessário destacar também o emprego de um concreto mais resistente C45 (considerado no custo) no projeto com protensão o que melhora as condições de durabilidade. Lembra-se também que ambas estruturas, a de protendido assim como a de concreto armado, atendem a todas prescrições da norma NBR6118:2014.

Quanto à questão de alguns objetivos secundários tais como “Analisar a velocidade de execução dos pavimentos” e “Estudar se há diminuição do trabalho a ser realizado na execução;” estes tópicos são comentados a partir de dados levantados na bibliografia, em entrevistas e visitas que confirmam que há uma tendência disto ocorrer, embora se trate de assunto que poderia ser estudado considerando um universo mais amplo e com variáveis controladas (os prédios com estruturas tradicionais são mais comuns em algumas partes do país enquanto em outras os de laje lisa como visto na introdução).

Foram apresentadas ao longo do texto do trabalho, decorrente do observado na revisão bibliográfica, entrevistas e visitas que as principais vantagens do uso de laje protendidas (sempre comparadas ao sistema convencional) são principalmente:

- a) Diminuição de materiais e mão de obra;
- b) Rapidez na montagem;
- c) Diminuição nos custos, diretos e indiretos;
- d) Entrega mais rápida;
- e) Diminuição das deformações da estrutura, propiciando provavelmente número menor de patologias, conseqüentemente menores intervenções de manutenção e custos respectivos reduzidos;
- f) Maior liberdade arquitetônica.
- g) Menor custo global.

Em contrapartida, em relação as estruturas de concreto armado tradicional com vigas, pode-se notar que apesar de serem intensamente utilizadas tem algumas desvantagens:

- a) A obra de concreto armado requer mais emprego de mão-de-obra (montagem de vigas) e formas com maior e complexidade geométrica;
- b) Maior tempo de execução, maior quantidade de salários, conseqüentemente maior custo indireto.
- c) Maiores deformações da estrutura comparada com a de protendido, podendo ocasionar ao longo do tempo maior número de patologias, maior número de intervenções e custos crescentes respectivamente;

- d) Maiores interferências das vigas o que impede que a arquitetura seja mais limpa;
- e) Pode ter um custo final mais alto.

Constata-se para o sistema de laje protendida pontos positivos no que tange à qualidade e economia, o que numa sociedade atual estes dois adjetivos são tão necessários, conclui-se que o concreto protendido é uma opção viável. Inclusive, tomando também como parâmetros declarações de autores, engenheiros de cálculo estrutural da região de Ribeirão Preto.

Quanto aos objetivos secundários de “criar um texto que reúna informações atuais sobre o sistema e possa possibilitar que um empreendedor se decida com mais segurança sobre o sistema considerado”; “Confrontar as informações acadêmicas com dados do mercado”; e “Perscrutar quais são as razões da pouca utilização de edificações de múltiplos andares com laje lisa e cordoalha engraxada na região de Ribeirão Preto” eles estão apresentados ao longo do capítulo 3, resumindo alguns tópicos a seguir.

Os profissionais acadêmicos, como esperado, na maioria das vezes relatam que o uso da protensão sempre traz vantagens. Nas pesquisas feitas pelo autor com os engenheiros de cálculo estrutural e principalmente com as construtoras, houve convergência para o que se defende nesta tese. No caso das construtoras foi afirmado que se conhecessem um sistema que resultasse em menor custo, maior qualidade, menores deformações e, conseqüentemente menos patologias, suas respectivas empresas estudariam sua viabilidade. Conclui-se então (as respostas as perguntas mostram isso), que nem as construtoras nem seus engenheiros de cálculo estrutural propõem o sistema estudado neste trabalho.

O capítulo 4, de forma resumida, mostra que há pelo menos um programa similar (na verdade de uma mesma empresa a TQS informática que muitos escritórios usam) ao usado no projeto convencional, que permite calcular e detalhar as estruturas com lajes protendidas de forma similar aos projetos realizados atualmente.

Ao analisar as respostas dos questionários respondidos pelos representantes das construtoras e engenheiros de cálculo estrutural pode-se intuir que, aparentemente, o que impede o uso do sistema em concreto protendido na região estudada é mais de ordem de uma barreira cultural, alicerçada pelo costume de se

usar durante muitos anos o sistema estrutural de concreto armado com uso de lajes maciças com vigas. Pois como foi visto em nenhuma das respostas se verificou a iniciativa de se empregar outro processo que não o convencional. As dificuldades se dão, aparentemente, por parte dos profissionais de projeto, na necessidade de ter o conhecimento do cálculo com a protensão e nas empresas o hábito de trabalhar com a protensão. Concomitante, nota-se a falta de estudos estatísticos, mensurações numéricas para fazer uma comparação mais precisa entre os dois sistemas. O mérito deste trabalho foi tentar usar um mesmo objeto para a análise controlando-se desta forma grande parte das variáveis envolvidas no problema. Lembrando, portanto que as conclusões aqui obtidas se referem ao exemplo do modelo estudado. Outros estudos e a consideração de outras variáveis, tal como exemplo tamanho menores dos vãos, podem conduzir a outras conclusões.

Cita-se ainda que todos envolvidos nos questionários (exceto os acadêmicos a que não se perguntou isto) responderam que se houvesse um sistema mais barato que o tradicional, hoje usado, que estariam dispostos a emprega-lo.

Ao final do trabalho conclui-se assim, que nesta tipologia de edificação é viável de ser executada na região de Ribeirão Preto. Ao longo do trabalho muito dados positivos foram obtidos, principalmente na resolução do exemplo, como também constatados índices qualitativos e de relevância para que este processo possa se levado em conta nas tomadas de decisões pelos engenheiros de cálculo estrutural e pelas construtoras no uso de prédios de múltiplos pavimentos com lajes lisas e com cordoalha engraxada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALAMI, B. O. **Post-Tensioned Manual**. 1ª. ed. California: ADAPT, v. 1, 2014. 500 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT p. 256. 2014.

_____. **NBR 12655:2015**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 14860:2002**: Laje pré-fabricada - Pré-laje – Requisitos. Parte 2: Lajes bidirecionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____. **NBR 14931:2003**: Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 15575:2013**: Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 15696:2009**: Fôrmas e Escoramentos para Estruturas de Concreto — Projeto, Dimensionamento e Procedimentos Executivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 6118:2014**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 256p.

_____. **NBR 6120:2017**: Cargas Para Cálculo de Estruturas de Edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 7480:2008**: Aços Destinados à Armaduras de Concreto Armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 7482:2008**: Fios de Aços Para Concreto Protendido. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 7483:2008**: Cordoalhas de Aço Para Concreto Protendido. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 7484:2009**: Barras, Cordoalhas e fios de Aço Destinados a Armaduras de Protensão - Método de ensaio de Relaxação Isotérmica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 8681:2004**: Ações e Segurança nas Estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ADAPT-PT/RC. **Post-Tensioned and Reinforced Concrete Slab and Beam Design** STRUCTURAL CONCRETE SOFTWARE. Redwood City, Califórnia, USA:2018.

ADAPT-Floor. Pro. **Integrated Reinforced and Post-Tensioned Concrete Slab Design** STRUCTURAL CONCRETE SOFTWARE. Redwood City, Califórnia, USA:2018.

ADÃO, F. X.; HEMERLY, A. C. **Concreto Armado Novo Milênio Cálculo Prático e Econômico**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, 2010. 224 p.

ALBUQUERQUE, A. T. D. **Análise de Alternativas Estruturais para Edifícios de Concreto**. 1999. 100fl. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999

ALMEIDA FILHO, F. M. D. **Contribuição ao Estudo da Aderência entre Barras de Aço e Concretos Auto-adensáveis**. 2006. 310 fl. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

ARAÚJO, J. M. D. **Curso de Concreto Armado**. 4ª. ed. Rio Grande: Dunas, v. 2, 2014. 432 p.

AUTOCAD. **Programa de Projeto e Documentação AUTODESK**. São Rafael, Califórnia, USA:2018.

AVILLA JUNIOR, J.; FIGUEREDO FILHO, J.R. **Contribuição ao projeto e execução de lajes lisas nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 2010. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFSCar, São Carlos, 2010.

BARES, R. **Tablas para el cálculo de placas y vigas parede**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S/A, 1972.

BRANSON, D. E. **Procedures for computing deflections**. 65. New York: ACI Journal, 1968.

BRÍGIDO, J. R. **Palestra Concreto Protendido**. Impacto Protensão. Fortaleza: 2016.

CAMARGO, R.E.M. **Contribuição ao Estudo da Estabilidade de Edifícios de Andares Múltiplos em Aço**. 2012. 328 fl. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, São Carlos, 2012.

CARMO, R. M. S. **Efeitos de Segunda Ordem em Edifícios Usuais de Concreto Armado**. 112p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

CARVALHO, R. C. **Análise Não-Linear de Pavimentos de Edifícios de Concreto Através da Analogia de Grelha**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 208. 1994.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 1ª. ed. São Paulo: Pini, v. 2, 2009. 589 p.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. D. F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 4ª. ed. São Carlos: Edufscar, v. 1, 2014.

CARVALHO, R.C. **Estruturas em Concreto Protendido**. São Paulo: Pini, 2017. 447p.

CHING, F.D.K.; ONOUYE, B.S.; ZUBERBUHLER, D.; **Buildings Structures Illustrated**. Hoboken N.J.: John Wiley & Sons, 2009.

CHOLFE, L. **Apostila de Concreto Protendido**. Escola de Engenharia Mackenzie. São Paulo. 1991.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. A. S. **Concreto Protendido Teoria e Prática**. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de textos, v. 1, 2018. 346 p.

CONCRETE SOCIETY. **Technical Report nº 43 Post-tensioned Concrete Floors**. Califórnia: Concrete Society, p. 124. 2003.

COSTA T. **Engenharia de Transparência: A vida e a Obra de Lobo Carneiro**. 1ª. Ed. Rio de Janeiro: Coope UFRJ, v. 1, 2004. 240 p.

FACHINI, A. C. **Subsídios para a Programação de Estruturas de Concreto Armado no Nível Operacional**. 1999. 215fl. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Sistemas Estruturais de Lajes Sem Vigas: subsídios para o projeto e execução**. 1989. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos, 1989.

FRANCO, M.; VASCONCELOS, A. C. **Practical Assessment of Second Order Effects in Tall Buildings**. Colloquium on the CEB-FIP MC 90. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1991.

FREIRE, T. M. **Produção de Estruturas de Concreto Armado, Moldadas no local, para Edificações: Caracterização das Principais Tecnologias e Formas de Gestão Adotadas em São Paulo**. 2001. 325 fl. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

<http://www.acma.eng.br/blog/construcao-civil-e-importante-para-o-pib-brasileiro/> - Acesso em 12 de outubro de 2018.

<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa> - Acesso em 07 de novembro de 2018.

<http://www.cbicdados.com.br/home/>- Acesso em 07 de novembro de 2018.

<http://www.hugoengenharia.com.br/empreendimento/fiusa-one> - Acesso em 25 de maio de 2019.

HANAI, J. B. D. **Fundamentos do Concreto Protendido**. E-Book de Apoio para o Curso de Engenharia Civil - Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 116. 2005.

LIGHTFOOT, E.; SAWKO, F. Structural frame analysis by electronic computer: gride frameworks resolved by generalised slope deflection. **Engineering**, v.187, n.1, p.18-20, 1959.

LIMA, J. S. **Verificações da punção e da estabilidade global de edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas**. 2001. 225fl. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LOUREIRO, G.J. **Projeto de lajes protendidas com cordoalhas engraxadas**. Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. Trabalho SIMP0216. 2006, p. 1734-1755.

MAGLIORI JÚNIOR, A.R. **Palestra Técnica Concreto Protendido e suas Vantagens**. Impacto Protensão. Ribeirão Preto – SP, 2016.

MARTINELLI, D. A. O.; MONTANARI, I.; SAVASSI, W. **Placas Elásticas**. 026/86. São Carlos: Publicação EESC-USP, 1986.

MARTINS, P.C.R. **Concreto Protendido**. Notas de Aula, Brasília: Universidade de Brasília 2001.

MELLO, A. L. V. **Cálculo de Lajes Lisas com Protensão Parcial e Limitada**. 2005. 138 fl. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos,2005.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de Segunda Ordem Global em Edifícios com Estrutura de Concreto Armado**. 2011. 221fl. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

MOREIRA, A.C.L. **Manual do Concreto Protendido**. Ed.1. São Paulo: Impacto, 2017.

MOURA, M. W.; MARCELINO, N. A. **Avaliação da deformação em lajes bidirecionais de concreto armado**. V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo, SP: 2003.

NUNES, H. **Análise Crítica da ISO 9001:2000 x NBR 6118:2003 para Aprovação de Execução de Estruturas de Concreto Armado**. 2011. 151 fl. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2011.

PINHEIRO, L.M. **Fundamentos do Concreto e Projetos de Edifícios**. Departamento de Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

PINTO, R. S. **Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado**. 1997. 108fl. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

PINTO, R. S., CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Utilização do Parâmetro GamaZ para estimar esforços de segunda ordem em edifícios de concreto armado. **Revista IBRACON de Estruturas**, v.1, n.2, 2005.

PORTO, T. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso Básico de Concreto Armado Conforme NBR 6118/2014**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 2015. 208 p.

PRADO, J. F. M. A. **Estruturas de Edifícios em Concreto Armado Submetidas a Ações de Construção**. 1999. 184 fl. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

RABELLO F. T. **Estudo de Lajes Lisas de Concreto com Visão Integrada de Flexão e Punção**. 2016. 195fl. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016

SANTOS, J. S. D. **Desconstruindo o Projeto Estrutural de Edifícios: Concreto Armado e Protendido**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 2017. 127 p.

SGARBI, M. **Curso Presencial Hands-on - Lajes Protendidas/TQS**. TQS. Chapecó: 2018.

TAKATA, L. T. **Tecnologia e Concepção de Sistemas Estruturais Híbridos de Concreto para Edifícios de Múltiplos Pavimentos no Brasil**. 2017. 290 fl. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2017.

TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY, K. **Theory of plates and shells**. New York: McGraw Hill, 1959.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Manual de Lajes Protendidas**. São Paulo: TQS, p. 266. 2018.

TQS. **Sistemas Computacionais de Engenharia Estrutural V.20 Full**, Concreto Armado e Concreto Protendido TQS INFORMÁTICA LTDA. São Paulo, SP: 2018.

VALENTI, R.L. **Lajes lisas com uso de cordoalhas engraxadas e plastificadas**. 2005. 68 fl. Graduação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Anhembí Morumbi. São Paulo: 2005.

VICENTE, C. M. D. S.; ALBINO, J. P. D. C. **Lajes em Concreto Armado e Protendido**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: da Universidade Federal Fluminense, 1994.