

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MATEUS DE OLIVEIRA SÁ

**SISTEMA DE PROTENSÃO DE LAJES E VIGAS: ESTUDO DE
CASO DA OBRA DA CÂMARA MUNICIPAL DE ANÁPOLIS**

ANÁPOLIS / GO

2015

MATEUS DE OLIVEIRA SÁ

**SISTEMA DE PROTENSÃO DE LAJES E VIGAS: ESTUDO DE
CASO DA OBRA DA CÂMARA MUNICIPAL DE ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA.**

ORIENTADORA: ANA LÚCIA CARRIJO ADORNO

ANÁPOLIS / GO: 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

SÁ, MATEUS DE OLIVEIRA.

Sistema de Protensão de Lajes e Vigas: Estudo de Caso da Obra da Câmara Municipal de Anápolis.

63 P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2015).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Viga

2. Laje

3. Protensão

4. Execução

I. ENC/UNI

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SÁ, M. O. Sistema de Protensão de Lajes e Vigas: Estudo de Caso da Obra da Câmara Municipal de Anápolis. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 63p. 2015.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Mateus de Oliveira Sá

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Sistema de Protensão de Lajes e Vigas: Estudo de Caso da Obra da Câmara Municipal de Anápolis.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2015

É concedida à Unievangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Mateus de Oliveira Sá

E-mail: mateus_mos@hotmail.com

MATEUS DE OLIVEIRA SÁ

**SISTEMA DE PROTENSÃO DE LAJES E VIGAS: ESTUDO DE
CASO DA CÂMARA MUNICIPAL DE ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

APROVADO POR:

ANA LÚCIA CARRIJO ADORNO, Doutora (ORIENTADORA)

**NOME DO MEMBRO DA BANCA, titulação (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**NOME DO MEMBRO DA BANCA, titulação (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 23 de novembro de 2015.

DEDICATÓRIA

Venho aqui, de uma forma muito singela, e com a simplicidade de um rapaz perseverante que sou, dedicar este trabalho a todas as pessoas que acreditaram na minha vitória, me apoiaram e me deram forças para chegar onde estou. Não me esquecerei de ninguém e espero retribuir a todos um dia. Espero ainda dar muito orgulho àqueles que depositaram sua confiança em mim, sobretudo aos meus pais, Ademar e Francisca, que foram meu alicerce. A meus avós que com a graça de Deus alcançaram a conclusão deste trabalho e foram inspiração para esta escolha significativa. A todos vocês, fontes da minha luta, dedico essa conquista.

AGRADECIMENTOS

A Ele, merecedor dos meus agradecimentos, a quem recorri tantas vezes com orações e pedidos, e que sempre esteve do meu lado me mostrando a luz para todas as dificuldades, obrigado meu Deus.

Em especial, aos meus pais, primordiais nessa conquista, os quais me apoiaram tanto e acreditaram em mim, são mais do que merecedores desse simples agradecimento.

A toda minha família que me apoiou e me acompanhou de perto durante essa caminhada árdua que está chegando ao fim.

Aos professores, a quem me apeguei e sentirei muita falta. Eles, detentores do saber, que não mediram esforços para transmitir conhecimento e ensinar a arte da Engenharia Civil.

Aos meus amigos e colegas, que incentivaram e estiveram do meu lado por toda essa caminhada acadêmica.

A minha namorada Ana Flávia, que enfrentou todas as dificuldades do meu lado e me deu forças para dar o melhor de mim neste trabalho.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para essa conquista.

A todos vocês, os meus agradecimentos.

“Se enxerguei mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes.”

(Isaac Newton)

RESUMO

A técnica da protensão vem ganhando força do mercado brasileiro nos últimos anos. A redução de fissuras nas lajes e vigas é o fator principal que tornou o concreto protendido conhecido, tecnicamente dizendo, o aumento da resistência à tração. O estudo de outras vantagens que façam com que o lado econômico seja deixado de lado, visando a viabilidade executiva é de extrema importância para que a técnica seja escolhida e não cause prejuízos e nem danos para a obra.

Ambientes internos com grandes vãos, vigas com redução de sua seção, aumento do pé-direito, redução do tempo de escoramento. Trata-se de uma inovação que substitui o tradicional concreto armado simples, e agrega qualidade e eficiência para a obra. Apesar de chegar no Brasil em 1948, o concreto protendido ainda é pouco estudado no país, possuindo poucos estudos sobre a sua eficácia.

O presente trabalho tem o objetivo de evidenciar todo o processo executivo de lajes e vigas protendidas, mostrando desde o armazenamento do material no canteiro de obra até a execução da protensão por meio do macaco hidráulico. A norma foi a base desse processo executivo.

Palavras-chave: Protensão. Laje. Viga. Norma. Resistência à tração. Concreto.

ABSTRACT

The prestressing technique is gaining strength in the Brazilian market in the last few years. The fissure reduction in the slabs and beams is the main factor that made prestressed concrete become known, technically saying, the increase of tensile strength. The study of other advantages that make the economic side be left aside, aiming executive viability is extremely important so that the chosen technique will not cause any harms or damages to the construction.

Indoor environments with large spans, slabs with session reduction, increase of the right foot, reduction of the time shoring. It is about an innovation that replaced the traditional simple reinforced concrete, and aggregates quality and efficiency to the construction. Despite Its arrival in Brazil was in 1948, the prestressed concrete is still not very used in the country, having only a few studies about its efficiency.

This present work has the objective of point out all the executive process of slabs and prestressed beams, showing since the material storage in the construction site until the execution of prestressing with the hydraulic jack. The standard was the base of this executive process.

Keywords: Prestressing. Slab. Beam. Standard. Tensile Strength. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1 – Barril de madeira com cintas metálicas.....	16
Figura 2 – Fila de livros.....	16
Figura 3 – Hangar protendido.....	17
Figura 4 – Ponte do Galeão.....	18
Figura 5 – Ponte de Juazeiro.....	19
Figura 6 – Museu Nacional de Arte Contemporânea.....	20
Figura 7 – Gráfico comparativo Carga-Deformação de um tirante.....	24
Figura 8 – Carga deslocamento em peças fletidas de CA e CP.....	25
Figura 9 – Massa aproximada em função do diâmetro nominal da capa.....	26
Figura 10 – Ancoragem Passiva em laço com armadura de fretagem e em bulbo.....	29
Figura 11 – Bainha metálica com purgador.....	30
Figura 12 – Seção da monocordoalha engraxada com 7 fios.....	31
Figura 13 – Laje Lisa.....	33
Figura 14 – Laje com engrossamento na região dos pilares.....	33
Figura 15 – Laje nervurada com faixas protendidas.....	34
Figura 16 – Laje nervurada com engrossamento na região dos pilares.....	34
Figura 17 – Viga de concreto armado sofrendo solicitação de flexão simples.....	35
Figura 18 – Distribuição dos cabos concentrando na faixa dos pilares.....	36
Figura 19 – Separação dos feixes de cabos na região das ancoragens.....	37
Figura 20 – Laje com vigas faixa.....	38
Figura 21 – Rolos de cordoalhas sem tensão.....	39
Figura 22 – Macaco Hidráulico e Bomba com manômetro.....	41
Figura 23 – Protensão realizada pelo macaco hidráulico.....	41
Figura 24 – Montagem e desmontagem do escoramento de lajes protendidas.....	42
Figura 25 – Arquitetura Planta Baixa – Subsolo.....	45
Figura 26 – Protensão da Laje do Térreo no sentido longitudinal hidráulica.....	46
Figura 27 – Protensão da Laje do Térreo no sentido transversal.....	47
Figura 28 – Protensão da Laje do 2º Pavimento no sentido transversal.....	48
Figura 29 – Protensão da laje do 2º pavimento no sentido longitudinal.....	49
Figura 30 – Protensão das vigas VP209 e VP215 do térreo.....	51
Figura 31 – Protensão das vigas V220 e V224 do térreo.....	51
Figura 32 – Vista das vigas do térreo.....	52
Figura 33 – Detalhamento das ancoragens em vigas.....	53
Figura 34 – Detalhamento das ancoragens ativa e passiva.....	53
Figura 35 – Viga protendida da laje do térreo.....	54

Figura 36 – Pé direito de 10 metros de altura.....	55
Figura 37 – Colocação das ancoragens nos cabos.....	56
Figura 38 – Concretagem da laje térreo.....	56
Figura 39 – Protensão através do macaco hidráulico.....	57
Figura 40 – Encontro de viga e pilar, com grande área de aço.....	58
Figura 41 – Primeira etapa concretada, aguardando andamento da segunda etapa.....	59
Figura 42 – Laje escorada durante processo de protensão dos cabos.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
Quadro1 - Características básicas dos sistemas de protensão aderente e não-aderente.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 1 – Propriedades das corcoalthas de 7 fios – CP190-RB.....	28
Tabela 2 – Dimensões dos nichos das ancoragens ativas – protensão aderente.....	29
Tabela 3 – Dimensões para ancoragens passivas em laço e em bulbo.....	29

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI 423	Recomendações para elementos de concreto protendido não-aderente
CA	Concreto Armado
CEB	Comité Euro-Internacional du Béton
CP	Concreto Protendido
ELU	Estado Limite Último
EP	Excentricidade de Protensão
FIP	Federation Internationale de la Precontrainte
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
RB	Relaxação Baixa
RN	Relaxação Normal
VP	Viga Protendida

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro, unidade de medida linear
kg/km	Quilograma por quilômetro, unidade de medida de área
m	Metro, unidade de medida linear
mm	Milímetro, unidade de medida linear
m ²	Metro quadrado, unidade de medida de área
MPa	Megapascal, unidade de medida de tensão
Mr''	Momento de fissuração
M _u	Capacidade última
tf	Tonelada força

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	20
1.1.1 Objetivo Principal.....	21
1.1.2 Objetivos Específicos.....	21
1.2 METODOLOGIA.....	21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1 PROTENSÃO APLICADA AO CONCRETO.....	23
2.2 PROTENSÃO SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA.....	25
2.3 SISTEMAS DE PROTENSÃO.....	28
2.3.1 Sistema de Protensão Com Aderência.....	28
2.3.2 Sistema de Protensão Não-Aderente.....	30
2.4 ESQUEMAS ESTRUTURAIS.....	32
2.4.1 Esquemas Estruturais Adotados em Laje Protendida.....	32
2.4.2 Esquemas Estruturais Adotados em Viga Protendida.....	35
2.5 DISTRIBUIÇÃO DOS CABOS EM PLANTA.....	36
2.6 PUNIONAMENTO.....	38
2.7 RECOMENDAÇÃO DE EXECUÇÃO.....	38
2.8 DESVANTAGENS DA PROTENSÃO.....	42
3 ESTUDO DE CASO.....	44
3.1 INTRODUÇÃO.....	44
3.2 PROJETOS DE PROTENSÃO.....	45
3.2.1 Protensão das Lajes do Térreo e Segundo Pavimento.....	45
3.2.2 Projeto de Protensão das Vigas.....	50
3.3 ANCORAGEM ATIVA E PASSIVA.....	52
3.4 PROCESSOS EXECUTIVOS.....	54
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A partir da criação do cimento Portland, em 1824, deu-se início ao desenvolvimento do concreto armado e protendido. Com o passar do tempo, alemães e franceses promoveram diversas melhorias na capacidade portante do concreto (Veríssimo & Lenz, 1998).

No século 19, já se conhecia a possibilidade de reforçar estruturas de concreto por meio da utilização de armaduras de aço. O desenvolvimento das construções de concreto armado nessa época eram basicamente empíricas, pois não se conhecia nitidamente a importância do concreto armado na função estrutural. Em 1886, aconteceu a primeira idéia de pré-tensionar o concreto, pelo americano P. H. Jackson (Veríssimo & Lenz, 1998).

Protender uma estrutura, transmite a idéia de instalar um estado prévio de tensões, pode ser definida como uma maneira artificial de se criar reações permanentes às ações que sejam adversas ao uso de uma estrutura (Hanai, 2005).

Tensões prévias de compressão podem ser criadas através da protensão, nas regiões onde o concreto seria tracionado por consequência das ações sobre a estrutura. Tal sistema pode ser empregado também, como meio de solidarização de estruturas menores de concreto armado, para compor componentes e sistemas estruturais (Hanai, 2005).

Na Figura 1 está um clássico exemplo que evidencia o que ocorre no método da protensão. Um barril de madeira possui gomos laterais, tampa e fundo de madeira, que devem ser encaixadas e solidarizadas. A pressão realizada pelo líquido que está dentro do barril provoca esforços anulares de tração, que tenderiam a abrir as juntas entre os gomos, fazendo com que o líquido vaze. Cintas metálicas são colocadas ao redor do barril, onde são forçadas a uma posição correspondente a um diâmetro maior, ficando assim tracionadas e comprimindo transversalmente os gomos do barril, deixando o conjunto solidarizado e as juntas entre os gomos ficam pré-comprimidas (Hanai, 2005).

Figura 1 – Barril de madeira com cintas metálicas



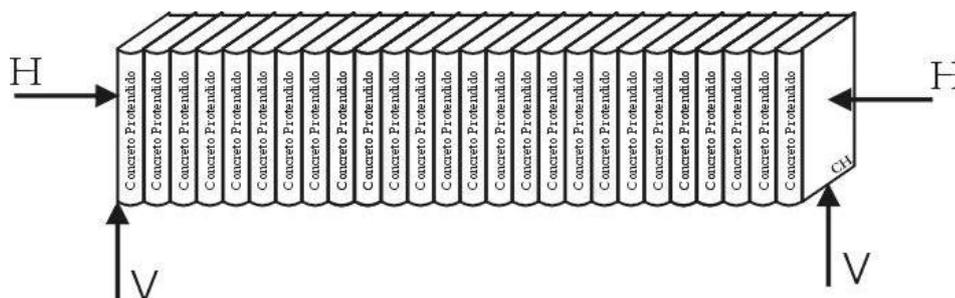
Fonte: <<http://pt.donkey-kong.wikia.com/wiki/Barril>>

Acesso em: 03 de novembro, 2015

Tecnicamente, o concreto protendido é uma forma de concreto armado na qual a armadura ativa tem um pré-alongamento, originando um composto auto-equilibrado de esforços (compressão no concreto e tração no aço). Dessa maneira, perante as cargas externas de serviço, o concreto protendido possui melhor desempenho (ISHITANI & SILVA, 2002).

Outro clássico exemplo, mostrado pelos autores acima, de como funciona a protensão, é mostrado na Figura 2. Quando se deseja colocar uma pilha de livros em uma estante, são aplicadas forças horizontais comprimindo-os uns contra os outros a fim de que as forças de atrito existentes entre eles sejam mobilizadas e forças verticais nas extremidades da pilha, e assim, conseguirmos colocá-los na posição desejada (ISHITANI & SILVA, 2002).

Figura 2 – Fila de livros

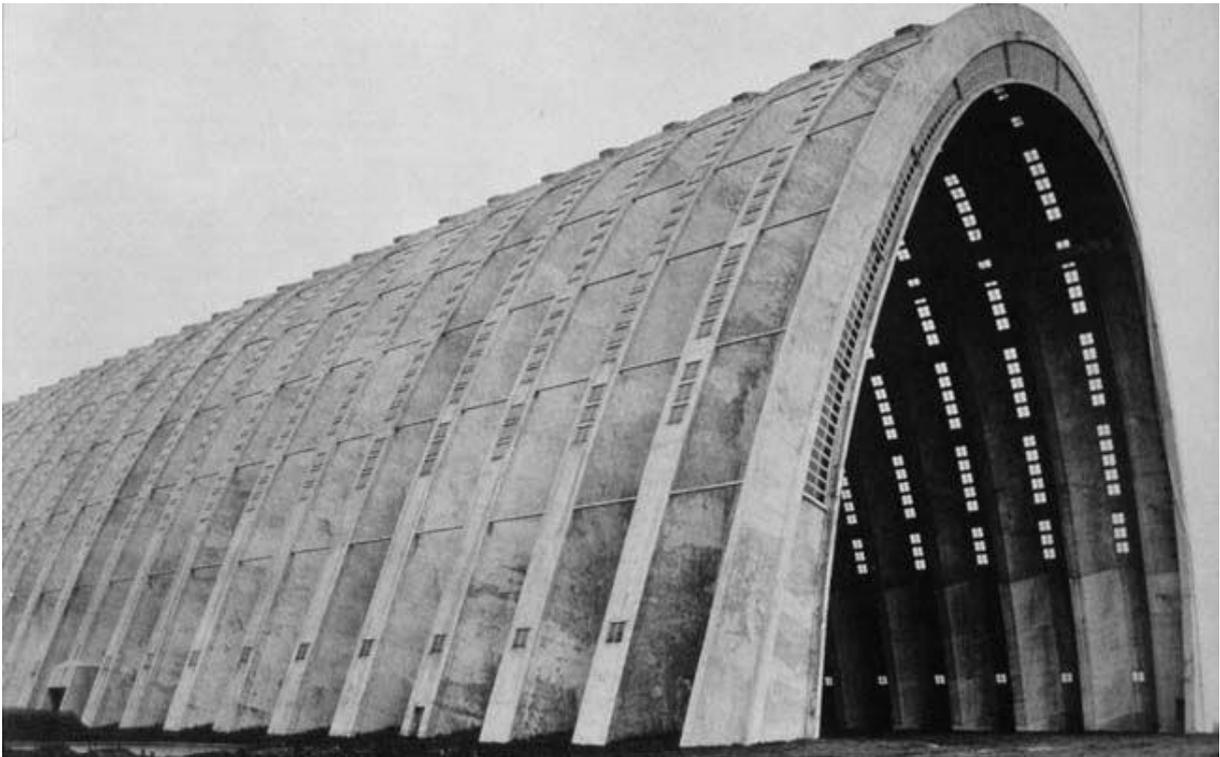


Fonte: ISHITANI & SILVA, 2002

No fim do século 19, diversos métodos de protensão foram patenteados, porém, sem êxito, pois esse sistema se perdia devido à retração e fluência do concreto, que naquela época eram desconhecidos. Por meio de inúmeros ensaios, Morsch desenvolveu os fundamentos da teoria do concreto armado e, juntamente com Koenen mostraram que o efeito de uma protensão reduzida devido à retração e deformação lenta do concreto, era perdido no decorrer do tempo. A partir daí houve o desenvolvimento da técnica da protensão em diversos países do mundo, onde aconteceu o seu desenvolvimento e aprimoramento, com o intuito de obter melhorias estruturais e econômicas (Veríssimo & Lenz, 1998).

Na França, em 1924, a técnica já foi utilizada por Eugene Freyssinet para reduzir o alongamento de tirantes em hangares com grandes vãos (Figura 3). Freyssinet determinou que só é possível assegurar um efeito duradouro da protensão através da utilização de elevadas tensões no aço, sendo um dos grandes responsáveis pelo desenvolvimento da tecnologia do concreto protendido (Veríssimo e Lenz, 1998).

Figura 3 – Hangar protendido



Fonte: <<https://www.pinterest.com>> Acesso em: 3 de novembro, 2015

A primeira conferência sobre concreto protendido foi realizada na França, no ano de 1950. Houve o surgimento da FIP (Federation Internationale de la Precontrainte). Na mesma época houve o surgimento das cordoalhas de fios. O método se espalhou por todo o mundo. A

ponte do Galeão, no Rio de Janeiro (Figura 4), foi a primeira obra em concreto protendido realizada no Brasil, em 1948, onde todo o material foi importado da França: ancoragens, equipamentos, aço e até mesmo o projeto. A Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, iniciou em 1952 a fabricação de aço de protensão no Brasil, e a segunda obra executada no país com a técnica da protensão, já foi feita com aço brasileiro, a ponte de Juazeiro (Figura 5) (Veríssimo e Lenz, 1998).

Figura 4 – Ponte do Galeão



Fonte: <<http://www.fotolog.com/ilhaantiga/193000000000028993/>>

Acesso em: 25 de Agosto, 2015

Figura 5 – Ponte de Juazeiro



Fonte: <<http://trip-suggest.com/brazil/bahia/juazeiro/>>

Acesso em: 25 de Agosto, 2015.

O Código Modelo para Estruturas de Concreto Armado e Concreto Protendido foi publicado em 1978, pelo Comité Euro-Internacional du Betón (CEB/FIP) e foi utilizado como base para a elaboração das normas técnicas de diversos países (Veríssimo & Lenz, 1998).

Atualmente, o concreto protendido vem sendo muito utilizado no Brasil. No Rio de Janeiro, o Museu Nacional de Arte Contemporânea (Figura 6), foi uma obra cujo a estrutura aplicada foi de concreto protendido (Veríssimo & Lenz, 1998). Em Anápolis o sistema está ganhando força e já é utilizado desde o ano 2013, onde chegou à cidade com a obra Belvedere Du Parc, na qual a protensão foi utilizada para vencer um grande vão existente na sala de jantar/estar dos apartamentos. No ano de 2015, já é utilizado em mais duas obras, sendo uma delas o London Hotel & Offices, e a outra, a Câmara Municipal de Anápolis, onde foi realizado um estudo de caso do sistema de protensão nas vigas e lajes dessa obra.

Figura 6 – Museu Nacional de Arte Contemporânea



Fonte: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABv4EAA/trabalho-concreto-protendido>> Acesso em: 25 de Agosto, 2015

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a crescente da técnica de concreto protendido em Anápolis, sua importância faz com que novos empreendimentos abram os olhos para as vantagens de sua utilização. Devido ao crescimento da cidade, Anápolis investe em grandes obras, sendo necessário se preocupar com as inovações no mundo da engenharia.

O pioneiro a utilizar o sistema de protensão em Anápolis, foi o Residencial Belvedere Du Parc, que possuía um grande vão no ambiente da sala de estar/jantar de cada um dos três apartamentos da laje, sendo viável a utilização da protensão para reduzir o volume de concreto, diminuindo a quantidade de pilares e deixando assim, arquitetonicamente dizendo, o ambiente mais amplo e bonito.

Com o êxito da técnica, mais duas obras desenvolveram seus projetos estruturais utilizando o sistema da protensão. O London Hotel & Offices, e a Câmara Municipal de Anápolis, onde lajes e vigas são protendidas.

O sistema de protensão possui peculiaridades, que deixam o concreto protendido a frente do concreto armado convencional, onde se vence grandes vãos, reduz consideravelmente as fissuras, permite uma maior utilização do espaço arquitetônico, reduz o volume de concreto utilizado e pode reduzir pela metade o tempo de escoramento da estrutura, que com o uso da protensão, pode ser retirado em 14 dias.

1.1.1 Objetivo Principal

O objetivo deste trabalho é mostrar de forma clara, as técnicas da aplicação do concreto protendido e suas vantagens, quando comparado ao concreto convencional.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- mostrar todo o processo de execução de uma laje e viga protendida, deixando claro as exigências da norma.
- explicar como é realizado o processo de ancoragem, posicionamento dos cabos na laje a ser concretada, protensão dos cabos, tempo de espera para a realização dessa protensão e os cuidados necessários.
- economias provocadas pela técnica, mostrando a resolução dos conflitos de descontinuidade vertical, arquitetônicas e estruturais.

1.2 METODOLOGIA

Foi realizado um estudo de caso na obra da Câmara Municipal de Anápolis, segundo a norma regulamentadora NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento (ABNT, 2014) e a norma regulamentadora NBR 14931 – Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento (ABNT, 2004).

Houve o acompanhamento desde o processo inicial da obra, a qual foi realizada em duas etapas, fazendo com que uma de suas lajes ficasse escorada por um período de 8 meses por ainda não ter protendido a estrutura, devido à ausência da segunda etapa da obra. Após finalizar a segunda etapa, pôde-se realizar a protensão das vigas e das lajes, onde teve de seguir todo o procedimento executivo exigido por norma.

Os resultados do estudo de caso foram evidenciados pelas vantagens obtidas por meio do concreto protendido, apesar dos pontos negativos, como o extenso tempo de escoramento, neste caso.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1, há uma introdução sobre o sistema de protensão e seu histórico em um contexto geral, justificativa, objetivos do estudo e a metodologia adotada.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica apresenta a protensão segundo a norma, mostrando um pouco da história do desenvolvimento do concreto protendido, os sistemas de protensão, uso do concreto protendido, esquemas estruturais e recomendação de execução.

No capítulo 3 é realizado o estudo de caso da obra da Câmara Municipal de Anápolis, detalhando toda a execução da protensão de vigas e lajes.

No capítulo 4 são realizadas as considerações finais com o fechamento do trabalho, trazendo os pontos principais apanhados como resultado do estudo de caso realizado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PROTENSÃO APLICADA AO CONCRETO

Segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), concreto protendido é aquele no qual parte das armaduras são previamente alongadas por equipamentos especiais de protensão com a finalidade de impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, proporcionando o melhor aproveitamento de aços com alta resistência no estado limite último (ELU), visando amenizar ou zerar os efeitos das cargas externas que incidem sobre a estrutura.

A partir de 1824, com a criação do cimento Portland, na Inglaterra, deu-se o desenvolvimento do concreto. Com o passar dos anos, franceses e alemães passaram a produzir cimento e desenvolver várias formas de melhorar a capacidade portante do concreto. Em meados do século 19, já era conhecida mundialmente a possibilidade de reforço da estrutura de concreto por meio de armaduras de aço (VERÍSSIMO & LENZ, 1998).

A resistência do concreto à tração é várias vezes inferior à resistência à compressão, tendo de se tomar medidas para controlar a fissuração. Sendo assim, a protensão terá a função de criar tensões de compressão prévias na região, onde o concreto iria sofrer tração, em consequência das ações sobre a estrutura, podendo também ter a função de solidarizar partes menores de concreto armado para compor sistemas estruturais (HANAI, 2005).

A utilização conjunta de aço e concreto permite que o concreto resista a compressão e que o aço resista aos esforços de tração, como nas vigas mistas e no concreto armado. Porém, no concreto armado, a parte tracionada da seção não trabalha, ocorrendo um desperdício de material. Ao protender, são introduzidos na peça de concreto, esforços prévios, reduzindo ou anulando as tensões de tração provocadas pelas solicitações em serviço, fazendo com que exista uma redução na fissuração da peça (VERÍSSIMO & LENZ, 1998).

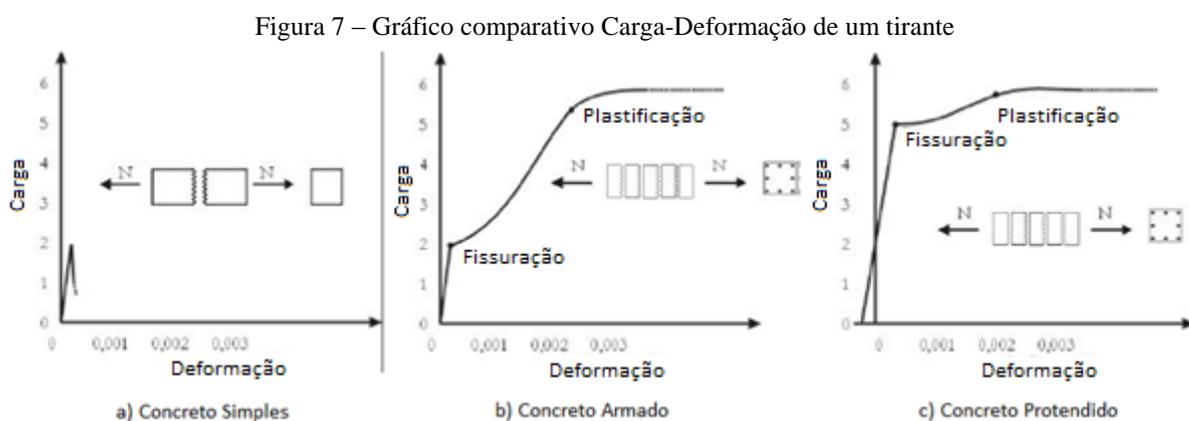
Walter Pfeil (1984) cita em um de seus livros a importância do artifício da protensão no caso do concreto pelas seguintes razões:

- a) o concreto é um dos materiais de construção mais importantes. Os ingredientes necessários à confecção do concreto (cimento, pedra, areia, água) são disponíveis a baixo custo em todas as regiões habitadas da Terra.
- b) o concreto tem boa resistência à compressão.
- c) o concreto tem pequena resistência à tração, da ordem de 10% de resistência à compressão. Além de pequena, a resistência à tração do concreto é pouco confiável.

De fato, quando o concreto não é bem executado, a retração do mesmo pode provocar fissuras, que eliminam a resistência à tração do concreto, antes mesmo de atuar qualquer sollicitação. Devido a essa natureza aleatória da resistência à tração do concreto, ela é geralmente desprezada nos cálculos.

Pfeil (1984) afirma que, sendo o concreto um material de propriedades tão diferentes à compressão e à tração, o seu comportamento pode ser melhorado aplicando-se uma compressão prévia (isto é, protensão) nas regiões onde as sollicitações produzem tensões de tração (Pfeil, 1984).

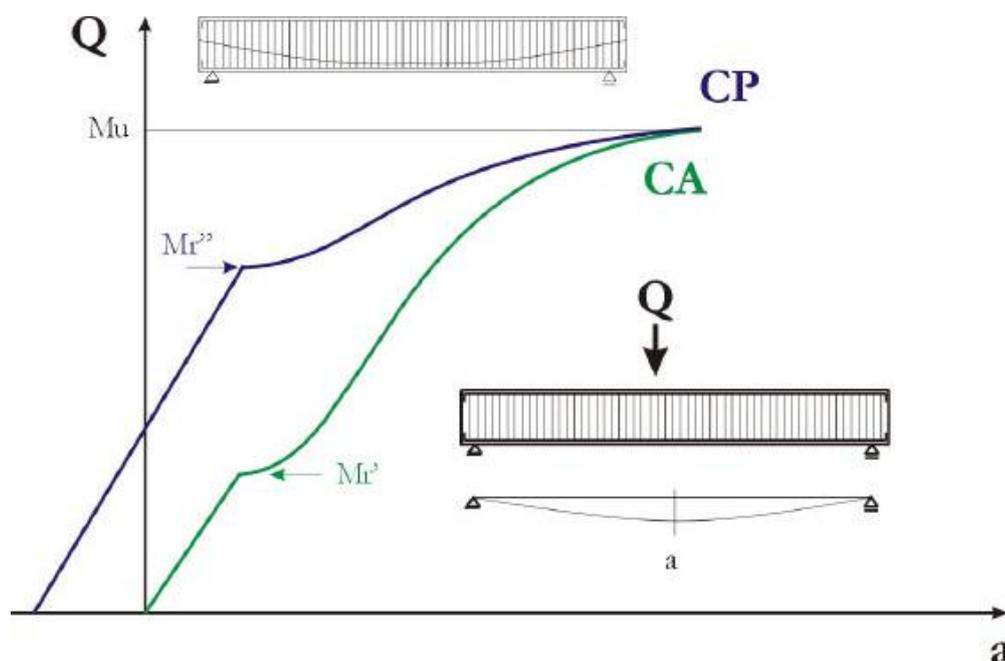
Ishitani e Silva (2002) mostram de forma simples e esclarecedora a vantagem da utilização do concreto protendido, demonstrando a diferença de comportamento de um tirante ao se utilizar concreto simples, concreto armado e concreto protendido, como é mostrado na Figura 7. É observado o comportamento do gráfico Carga-Deformação de um tirante tracionado sem armadura e com armaduras sem protensão. A pré-compressão, decorrente do pré-alongamento da armadura ativa do tirante, aumenta substancialmente a capacidade de resistir ao carregamento externo necessário para iniciar a fissuração (ISHITANI & SILVA, 2002).



Fonte: ISHITANI & SILVA, 2002

Em outro gráfico, da mesma publicação, apresentado na Figura 8, Ishitani e Silva (2002) mostram a diferença da curva carga-flecha em uma viga de concreto armado e em uma com armadura de protensão. Ambas possuem a mesma capacidade última (M_u), mas a peça protendida tem um momento de fissuração (M_f) muito maior que a viga de concreto armado. Suas deformações iniciais são menores, devido a contraflecha inicial da viga protendida, para um nível igual de carregamento.

Figura 8 – Carga deslocamento em peças fletidas de CA e CP



Fonte: ISHITANI & SILVA, 2002

2.2 PROTENSÃO SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA

O estudo é embasado na NBR 14931 – Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento (ABNT, 2004), que estabelece os requisitos gerais para a execução de estruturas de concreto, detalhados para a execução de obras cujos projetos foram elaborados de acordo com a NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento (ABNT, 2014). De forma mais específica, no Anexo C da norma, que possui como título: Execução da Protensão em concreto protendido sem aderência.

A NBR 14931 (ABNT, 2004), anexo C, tem por objetivo fixar as condições exigíveis para a execução da protensão em obras de concreto protendido sem aderência. Para os efeitos dessa norma são aplicadas as seguintes definições:

- armadura de protensão sem aderência: cabos confeccionados segundo especificação de projeto, com o objetivo de gerar força de protensão;
- ancoragem: mecanismo capaz de conservar o cabo em estado de tensão, transmitindo a força de protensão ao elemento estrutural ou ao concreto;
- ancoragem ativa: ancoragem responsável pelo estado de tensão no cabo, por meio do equipamento de protensão;
- ancoragem passiva: embutida no concreto, fixa a extremidade do cabo oposta à ancoragem ativa;

- e) fretagem: armadura passiva (frouxa) que tem como objetivo resistir às tensões locais de tração do concreto, transmitidas pelas ancoragens.
- f) operação de protensão e cravação: por meio de condições especificadas previamente, a força de tração é aplicada no cabo de protensão, após isso, é fixado o cabo à ancoragem ativa, após seu tensionamento.

Os aços para a armadura de protensão devem seguir a NBR 7483 (ABNT, 2008). Na Figura 9 é mostrado as massas do conjunto da cordoalha CP 190 RB, mais graxa, mais capa plástica de polietileno de alta densidade (PEAD) para protensão não-aderente.

Figura 9 – Massa aproximada em função do diâmetro nominal da capa

Diâmetro nominal da capa mm	Massa aproximada do conjunto (cordoalha + capa + graxa) kg/km
15	880
18	1 240

Fonte: NBR 14931 (ABNT, 2004)

Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004), o aço deve ser estocado sobre o piso, ou pranchado de madeira, com uma distância mínima de 30 cm do solo. Quanto maior o tempo de estocagem do aço, maiores devem ser os cuidados de armazenamento dos mesmos, sendo recomendado que se estoque na embalagem de seu fornecedor. Os cabos não devem ser expostos ao sol por mais de três meses, pois pode danificar a capa plástica, a menos que o fornecedor garanta a proteção contra a incidência dos raios ultravioleta na composição da capa.

As capas das cordoalhas são de polietileno de alta densidade, com sua parede contendo espessura mínima de 1 mm, e seu diâmetro interno deve permitir o livre movimento da cordoalha em seu interior. Devem ser duráveis e resistentes a todo o processo de manuseio, transporte e execução, para que não diminua a sua eficácia, devendo ser também impermeáveis. A graxa de proteção anticorrosiva e lubrificante não pode ser agressiva ao aço (cordoalha), tanto no estado de repouso, quanto tensionado.

Para a definição da posição dos cabos e ancoragens, devem ser informados os seguintes dados, perante a norma: cotas verticais e horizontais dos eixos dos cabos em relação à estrutura, espaçadas a cada metro; ângulo de saída na região das ancoragens, de cada cabo;

cotas horizontais e verticais dos pontos de concordância, alteração de curvatura, e de cruzamento dos cabos; raio de curvatura se existir trechos circulares; numeração dos cabos nas vistas e cortes; desvios admissíveis nas medidas.

Alguns cuidados de montagem devem ser tomados para garantir o desempenho do sistema de protensão. Deve-se locar os cabos em relação à fôrma, segundo projeto; fixar os cabos por meio de travessas fixadas às armaduras positivas, ou suportes independentes especiais que se faça necessário; verificação dos estribos ou suportes que devem suportar os cabos sem flambar; os suportes não podem causar danos aos cabos, deixando-os fixos para qualquer movimentação horizontal ou vertical; ter muita atenção durante a fixação das ancoragens de maneira a não permitir deslocamentos ou penetração de argamassa no interior dos cabos; o trecho do cabo próximo à ancoragem deve ser rigorosamente assegurado, conforme especificação de sistema de protensão.

Antes da concretagem devem ser inspeccionados todos os cabos e suportes para se detectar eventuais defeitos, desalinhamento no traçado dos cabos, ruptura, deficiência de rigidez ou vedação na capa plástica de polietileno de alta densidade (PEAD). O concreto deve possuir fácil trabalhabilidade, para que seja permitido a sua penetração entre os cabos, ancoragens e armaduras, e em certos casos é necessário que a obra tenha um traço especial de concreto de igual resistência à compressão, para ser utilizado nas regiões de maior concentração. Cuidado especial com o local em que se colocam os vibradores para que não danifique os cabos. As extremidades dos cabos devem ser protegidas das intempéries, não se permitindo dobramentos com curvaturas excessivas e pontos angulosos.

Antes de realizar a protensão, deve-se escorar de maneira a permitir a retirada das fôrmas ou possibilitar a inspeção da estrutura. O escoramento e as fôrmas devem permitir todas as rotações e deformações previstas no projeto. Remover todas as impurezas das extremidades dos cabos, dos locais onde ficará o macaco hidráulico e da cavidade da ancoragem, onde será alojada a cunha.

Deve-se iniciar a protensão apenas com autorização da fiscalização presente na obra. O equipamento de aferição deve estar em total condições de uso, testado e aprovado de acordo com a norma. Preparação de andaimes para perfeita locação do macaco hidráulico que irá protender os cabos. Deve ser verificado se todos os cabos estão de acordo com o projeto de protensão. Após a protensão é feita uma planilha contendo os seguintes dados: elemento da estrutura (viga, pilar, laje, etc), número do cabo, tipo do cabo, tipo do equipamento de protensão, pressão manométrica teórica a aplicar e alongamento total teórico previsto.

2.3 SISTEMAS DE PROTENSÃO

2.3.1 Sistema de Protensão com Aderência

Basicamente, existem dois tipos de sistemas de protensão com pós-tração que se emprega em lajes protendidas em função da aderência ou não entre o cabo e o concreto, com nomes auto-explicativos, tem-se a protensão aderente e a protensão não-aderente (EMERICK, 2002).

No caso da protensão aderente, cabos são colocados dentro de bainhas metálicas, que são injetadas com nata de cimento, após a execução da protensão das cordoalhas. Quanto à distribuição das fissuras, a solução aderente comporta-se melhor, e também quanto à segurança à ruptura para efeitos localizados, como uma explosão ou um incêndio (EMERICK, 2002).

Distinguem-se dois tipos de aço existentes atualmente, sendo (RN) os aços de relaxação normal, e (RB) os aços de relaxação baixa. E quanto à tração, são diferenciados por CP-175 e CP-190, os mais comuns, e o mais empregado em obras com concreto protendido é o CP-190 RB, sendo a protensão com ou sem aderência. Na Tabela 1 estão as características técnicas do aço CP-190 RB (EMERICK, 2002).

Tabela 1 – Propriedades das cordoalhas de 7 fios – Aço CP190-RB

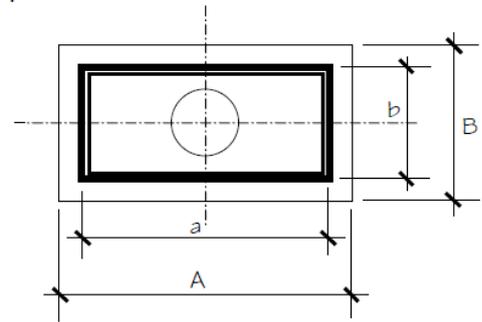
Tipo de cordoalha	Ø12,7mm (1/2")	Ø15,2mm (5/8")
Área mínima (mm ²) ⁽¹⁾	98,7	140,0
Área aproximada (mm ²)	101,4	143,5
Massa nominal (kg/m)	0,775	1,102
Carga de ruptura – f_{ptk} (kN)	187,3	265,8
Tensão de escoamento – f_{pyk} (MPa)	1585	1688
Módulo de Elasticidade (GPa)	Aproximadamente 196	
Relaxação após 1000 horas a 20°C para carga inicial de 70% da ruptura	MÁX. 2,5%	

Fonte: EMERICK, 2002

As fixações das extremidades dos cabos recebem o nome de ancoragem. Geralmente, tanto para o sistema aderente, quanto para o não-aderente, os cabos possuem uma ancoragem ativa e uma passiva. Porém, em cabos longos, com comprimento maior que 40 metros, pode ser conveniente protender as duas extremidades do cabo, tendo assim duas ancoragens ativas, de modo a reduzir as perdas por atrito. Na Tabela 2 são mostrados os nichos para ancoragem ativa no sistema aderente (EMERICK, 2002).

Tabela 2 – Dimensões dos nichos das ancoragens ativas – protensão aderente

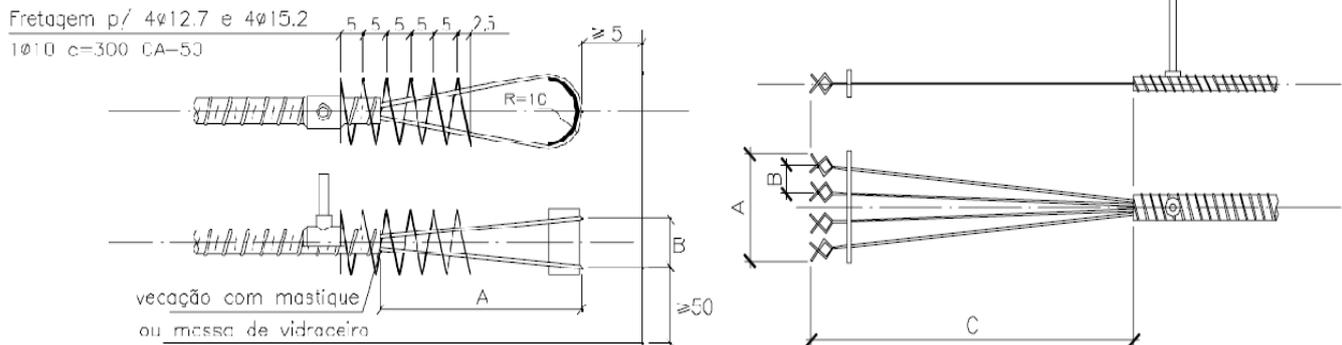
Unidade de protensão	A (mm)	B (mm)	a (mm)	b (mm)
1 Ø12,7	120	120	100	100
2 Ø12,7	120	120	100	100
3 Ø12,7	180	150	130	130
4 Ø12,7	240	100	230	85
1 Ø15,2	140	140	120	120
2 Ø15,2	180	180	140	140
3 Ø15,2	220	220	160	160
4 Ø15,2	240	120	230	90



Fonte: EMERICK, 2002

As ancoragens passivas podem ser em laço ou em bulbo, como é mostrado na Figura 10 e na Tabela 3, onde apresentam as suas dimensões (EMERICK, 2002).

Figura 10 – Ancoragem Passiva em laço com armadura de fretagem e em bulbo



Fonte: EMERICK, 2002

Tabela 3 – Dimensões para ancoragens passivas em laço e em bulbo

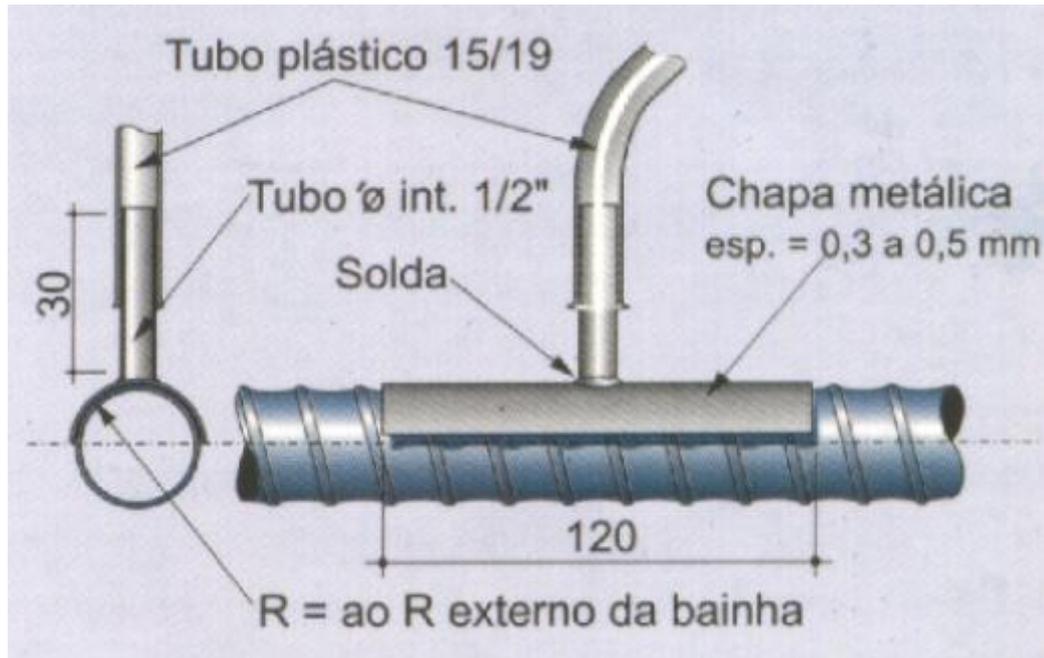
Tipo	A (mm)	B (mm)	Tipo	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1 Ø12,7	600	–	4 Ø12,7	310	70	750
2 Ø12,7	600	–	4 Ø15,2	390	90	950
4 Ø12,7	700	50				
1 Ø15,2	600	–				
2 Ø15,2	600	–				
4 Ø15,2	700	50				

Fonte: EMERICK, 2002

Na proteção com aderência, ocorre a injeção de uma nata que possui a finalidade de garantir uma proteção eficaz das armaduras de protensão contra a corrosão, além de permitir ligação mecânica entre a armadura e o concreto, preenchendo os vazios. Essa nata possui

diversas características que devem ser atendidas para um bom desempenho. A operação de injeção só pode ser feita após os resultados de protensão. Na Figura 11 é mostrada a bainha com o purgador, responsável pela injeção de nata, utilizado na protensão aderente (EMERICK, 2002).

Figura 11 – Bainha metálica com purgador

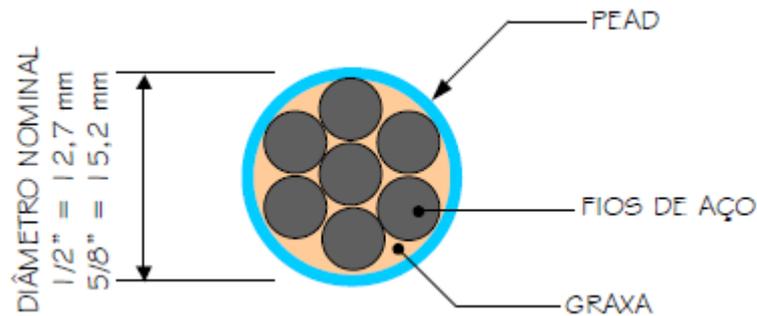


Fonte: Revista Técnica (1997)

2.3.2 Sistema De Protensão Não-Aderente

No sistema de protensão não-aderente são utilizadas cordoalhas plastificadas. Cordoalhas iguais às tradicionais, com adição de graxa e também encapadas com polietileno de alta densidade, resistente e durável, impermeável a água. Esse conjunto deve atender as especificações do PTI (Post-Tensioning Institute). Possuem bitolas disponíveis de 12,7 mm e 15,2 mm e massa aproximada de 890 kg/km e 1240 kg/km, respectivamente. Na Figura 12 é mostrada a cordoalha, com o sistema de revestimento PEAD, graxa e livre movimentação da cordoalha em seu interior (EMERICK, 2002).

Figura 12 – Seção da monocordoalha engraxada com 7 fios



Fonte: EMERICK, 2002

As cordoalhas devem ser armazenadas de acordo com a norma regulamentadora NBR 14931, anexo C. Rasgos ou falhas da cobertura de PEAD devem ser reparados antes da concretagem com fita plástica, para manter o isolamento da cordoalha em relação ao concreto. No Quadro 1 é mostrado um comparativo entre a protensão aderente e não-aderente (ABNT, 2004).

A protensão sem aderência é utilizada quando as armaduras de protensão estão ancoradas apenas nas extremidades das peças estruturais. A falta de aderência pode não impedir a fissuração, sendo necessário utilizar uma armadura aderente passiva para prevenir a fissuração. Acima de 40 m de comprimento, deve-se adotar ancoragens intermediárias, criando-se juntas de concretagem. O sistema de protensão não aderente possui rapidez na montagem, diminuição de perda por atrito, não é necessário injetar nata na cordoalha e é mais econômica que a protensão aderente, permitindo a reprotensão com os devidos cuidados (MORAES, 1999).

Quadro 1 – Características básicas dos sistemas de protensão aderente e não-aderente

SISTEMA ADERENTE	SISTEMA NAO ADERENTE
Usa bainha metálica para até quatro cordoalhas por bainha, em trechos de 6 m com luvas de emenda e vedação.	Sem bainha metálica. As cordoalhas vêm de fabrica com graxa e bainha plástica contínua.
O manuseio (enrolar e desenrolar) é feito com quatro cordoalhas ao mesmo tempo (aproximadamente 3,2 kg/m).	O manuseio é feito com uma cordoalha por vez (cerca de 0,89 kg/m).
Concretagem cuidadosa para evitar danos à bainha metálica (abertura da costura helicoidal).	Concretagem sem maiores cuidados, pois a bainha plástica de PEAD é resistente aos trabalhos de obra.
Usa macaco de furo central que precisa ser enfiado pela ponta da cordoalha (aproximadamente 50 cm da face do concreto).	Usa macaco de dois cilindros que se apóia na cordoalha junto à face do concreto.
A protensão é feita em quatro níveis de pressão hidráulica, seguidas das respectivas leituras de alongamento, correção da tabela e medida da perda por acomodação da ancoragem.	A protensão é feita em uma só elevação de pressão, pois não há retificação da cordoalha (bainha justa).
Exigem lavagem das cordoalhas por dentro para a diluição de eventual pasta de cimento que poderia ter entrado e prendido as cordoalhas.	Lavagem desnecessária.
A água deve ser retirada por ar comprimido antes da injeção, para não haver diluição da pasta.	Medida desnecessária.
Usa cimento em sacos para preparo da pasta de injeção, feito com misturador elétrico. A injeção é feita por bomba elétrica.	Medida desnecessária.

Fonte: Revista Técnica (1999)

2.4 ESQUEMAS ESTRUTURAIS

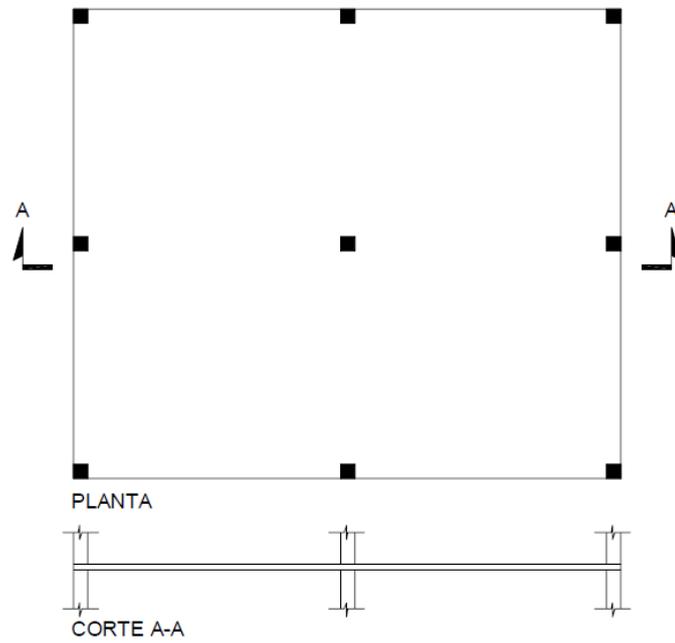
2.4.1 Esquemas Estruturais Adotados Em Laje Protendida

Os principais esquemas estruturais onde se adota o sistema de protensão são em lajes lisas, com ou sem engrossamento na região dos pilares, como demonstrado nas Figuras 13 e 14, respectivamente, e as lajes nervuradas, demonstradas nas Figuras 15 e 16 (EMERICK, 2002).

As lajes lisas possuem vantagens em relação às outras, principalmente na hora da execução. Porém, sua resistência é ditada pelo cisalhamento na região laje-pilar (puncionamento). Com o engrossamento na região dos pilares, a laje adquire maior resistência ao puncionamento, o que pode ser adquirido também, por meio do uso de viga protendida (EMERICK, 2002).

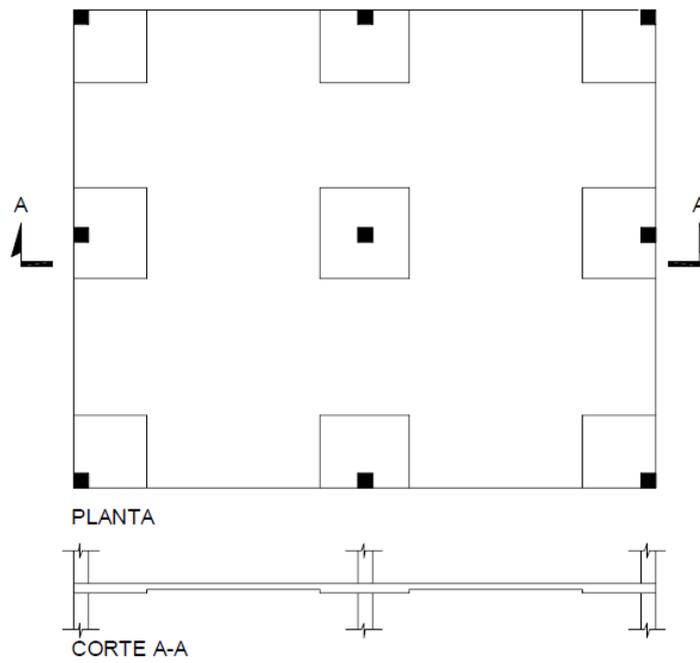
Com a utilização de lajes planas protendidas, a distância entre os pilares pode ser mantida entre 6 e 8 metros, sem maiores perdas para a estrutura. Com isso, na ausência de vigas, os pilares não possuem mais a necessidade de ficarem alinhados e totalmente na parte externa do edifício, aumentando a flexibilidade no lançamento, facilitando a execução de varandas e fachadas mais simples para serem acabadas (CAUDURO & LEME, 1999).

Figura 13 – Laje Lisa



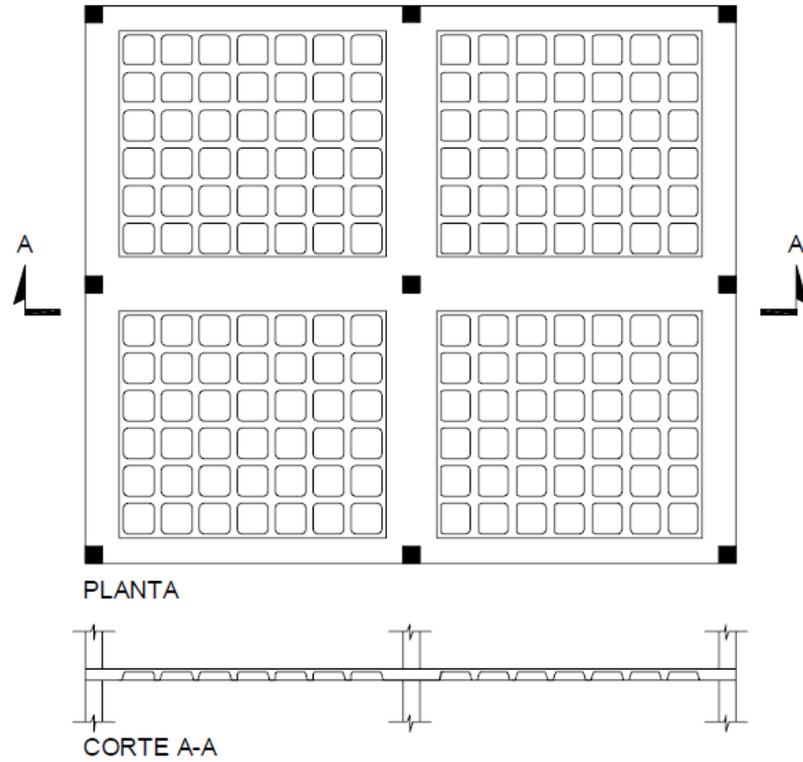
Fonte: EMERICK, 2002

Figura 14 – Laje com engrossamento na região dos pilares



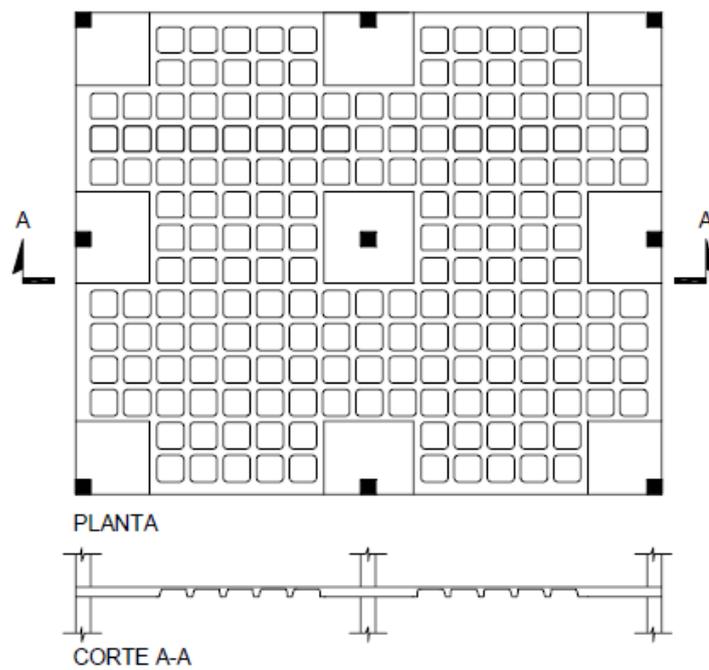
Fonte: EMERICK, 2002

Figura 15 – Laje nervurada com faixas protendidas



Fonte: EMERICK, 2002

Figura 16 – Laje nervurada com engrossamento na região dos pilares



Fonte: EMERICK, 2002

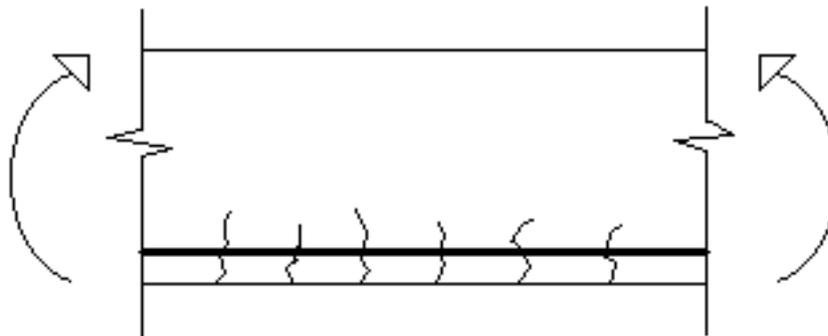
Para o cálculo da espessura das lajes protendidas é buscado observações práticas. O ACI 423, por exemplo, recomenda adotar os valores a seguir:

- Lajes com sobrecarga entre 2KN/m e 3KN/m: $h > l/40$ a $l/45$
- Lajes de cobertura: $h \geq l/45$ a $l/48$

2.4.2 Esquemas Estruturais Adotados Em Viga Protendida

Diferente da viga de concreto armado convencional, a viga protendida sofre a aplicação de um estado prévio de tensões, mediante cabos esticados e ancorados, as cordoalhas. Isso faz com que a viga obtenha uma redução das tensões de tração, melhora o comportamento da mesma para solicitações de flexão e cisalhamento, reduzindo ou até anulando a fissuração que ocorreria se a viga fosse de concreto armado convencional, cuja resistência à tração é mínima, como mostrado na Figura 17 (PFEIL, 1984).

Figura 17 – Viga de concreto armado sofrendo solicitação de flexão simples



Fonte: Pfeil, 1984

As armaduras de viga protendida são compostas por armaduras protendidas e não protendidas. As protendidas são compostas pelos cabos pré esticados e ancorados, as não protendidas são constituídas pelos vergalhões usuais de concreto armado que compõem as armaduras transversais, longitudinais, locais (nos pontos de ancoragem dos cabos) denominadas fretagem, e regionais, denominadas armaduras de introdução de tensões, pois garantem o espalhamento das tensões (PFEIL, 1984).

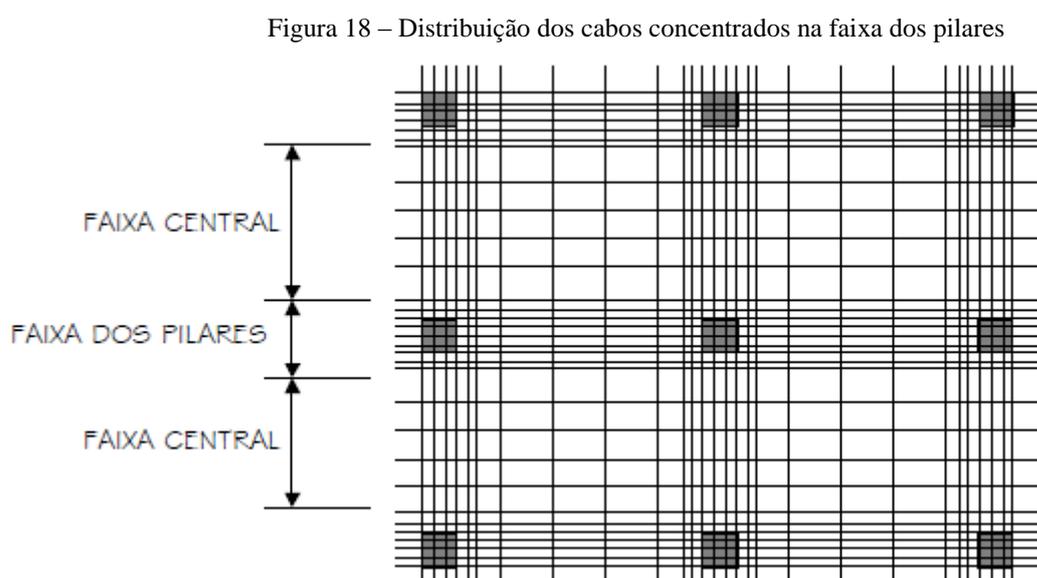
Sob ação de cargas, a viga protendida sofre flexão, modificando-se as tensões de compressão aplicadas antes. Ao retirar a carga, a viga volta à sua posição original e as tensões prévias são restabelecidas (PFEIL, 1984).

Caso as tensões de tração provocadas pelas cargas forem menores que as tensões prévias de compressão, a seção continuará comprimida, não sofrendo fissuração. Sob ação de cargas mais elevadas, as tensões de tração ultrapassam as tensões prévias, dessa forma o concreto fica tracionado e fissura. Ao remover a carga, a protensão provoca o fechamento das fissuras (PFEIL, 1984).

2.5 DISTRIBUIÇÃO DOS CABOS EM PLANTA

Os esforços concentram-se com maior intensidade nas regiões das faixas dos apoios, sendo assim, é natural que essas regiões possuam uma maior concentração de cabos. A ACI 423 (1996) apresenta a seguinte recomendação para a distribuição dos cabos em planta, Figura 18:

- Faixa dos pilares: 65 a 75% dos cabos
- Faixa central: 25 a 35% dos cabos

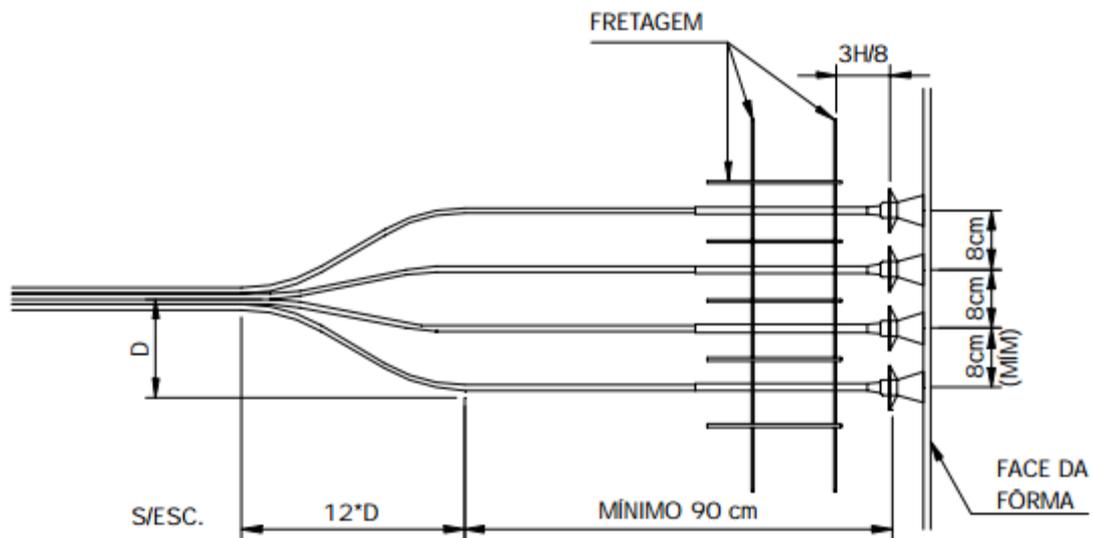


Fonte: ACI 423 (1996)

Algumas vantagens são especificadas por Souza e Cunha (1998), da utilização de cabos concentrados nas faixas dos pilares, onde é apresentada uma melhor aproximação com

a distribuição de momentos na laje, ocorrendo o aumento da resistência à punção, e também há um aumento da resistência próximo ao pilar, para transferência de momentos de ligação laje-pilar. O problema que pode ser encontrado para a concentração de cabos na faixa dos pilares é a concentração de armadura na região dos mesmos, contudo, deve ser adotado o mínimo de dois cabos passando sobre os pilares. Na região próxima das ancoragens, as cordoalhas agrupadas em feixes deverão ser suavemente separadas. A Figura 19 ilustra isso.

Figura 19 – Separação dos feixes de cabos na região das ancoragens



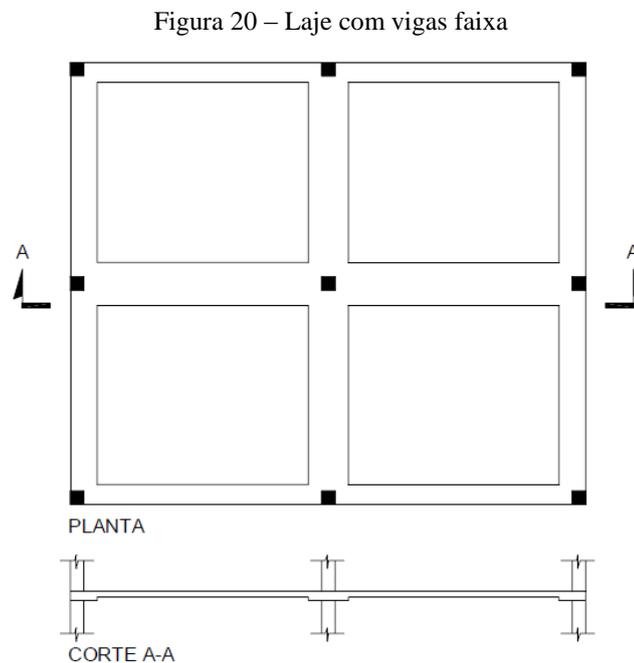
Fonte: PIT (1994)

Na publicação técnica do professor Manfred Theodor Schmid (2009), é mostrada uma sequência de cálculo para o dimensionamento da laje protendida. De início, deve-se escolher a opção com ou sem aderência, distribuir pilares, escolher a espessura da laje em função do vão, do cobrimento e da resistência ao fogo desejados. Posteriormente, deve-se fazer a fixação das características dos materiais a serem utilizados, determinação das cargas, cálculo dos esforços solicitantes, escolha da protensão (carga a ser “balanceada”), e arranjo dos cabos, realizar o cálculo dos momentos secundários provenientes da protensão, verificação do ELU para a flexão com o dimensionamento da armadura passiva necessária, verificação do ELU para o funcionamento, verificação dos Estados Limites de Utilização (limitação das fissuras, deformações lineares, vibração, resistência ao fogo), e por último, realização do detalhamento da armadura passiva mínima (SCHIMID, 2009).

2.6 – PUNCIÓNAMENTO

Com grande importância nas lajes planas, o punção condiciona a escolha de grandes vãos. Diz respeito a uma ruptura sem deformações prévias, sendo uma ocorrência repentina resultante de carga ou reação localizada sobre uma pequena área da laje, denominada área de carga (SCHMID, 2009).

Para que ocorra um aumento da resistência ao punção, deve se colocar adequadamente, cabos de protensão nas regiões próximas aos pilares. Tal resistência poderá ser melhorada também, por meio do engrossamento da laje na região dos pilares, ou com a utilização de vigas faixa protendidas, como mostrado na Figura 20 (EMERICK, 2002).



Fonte: EMERICK, 2002

2.7 – RECOMENDAÇÃO DE EXECUÇÃO

Segundo Ceccon (2004), do curso de especialização da UNICENP, deve existir algumas verificações a serem feitas antes da execução: estado limite último, que diz respeito à segurança da estrutura quanto a ruína (flexão e cisalhamento); estados limites de serviço ou de utilização, que inclui descompressão, compressão excessiva, formação de fissuras, abertura de fissuras e deformação excessiva; verificar as tensões de tração transversal e as regiões de espalhamento de tensões; por último deve ser verificado o tempo de funcionamento da estrutura, determinando tempo inicial e tempo final, onde ocorreram as perdas progressivas,

quando se possui a mínima força de protensão e todo o carregamento aplicado sobre a estrutura, verificando assim se a protensão a ser aplicada é satisfatória (CECCON, 2004).

Deve ser realizada uma análise de compatibilidade do material entregue na obra (aço de protensão, no caso), com as especificações do projeto estrutural, do peso e homogeneidade do aço fornecido bem como da aparência do material. Após se abrir os rolos (Figura 21), as cordoalhas sem tensão devem manter flechas inferiores a 15 cm em 2 m de comprimento (NAKAMURA, 2012).

Figura 21 – Rolos de cordoalhas sem tensão



Fonte: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/185/artigo286936-2.aspx>> Acesso em: 4 de novembro, 2015

A montagem dos cabos é de extrema importância para a boa execução da protensão. Em lajes com vigas é recomendado que se coloque inicialmente todos os cabos das vigas, posteriormente se coloca todos os cabos uniformes, e por último, são colocados os cabos restantes na outra direção (EMERICK, 2002). Deve-se tomar um cuidado especial com a pré-blocagem, ou pré-encunhamento do cabo. Procedimento com a função de cravar a ancoragem em uma das pontas do cabo (NAKAMURA, 2012).

É preciso fiscalizar a firmeza da fixação das ancoragens passivas, o comprimento do cabo exposto nessa ancoragem, o comprimento dos trechos de transição, buscando vedar qualquer local que possa colocar a cordoalha em contato com o concreto, verificar o

posicionamento em perfil dos cabos de acordo com as tolerâncias exigidas, verificar se as curvas entre os pontos de transferência estão suaves, alinhamento horizontal dos cabos, colocação de armadura de fretagem, e por último deve ser verificado o espaço útil para a colocação do macaco hidráulico que irá protender os cabos (EMERICK, 2002).

Quanto ao lançamento do concreto, qualquer aditivo contendo cloreto deve ser proibido. Deve tomar cuidado com a vibração do concreto na região das ancoragens de forma que se evite brocas que causem concentrações de tensões. Preocupar-se com a altura do lançamento de concreto, para que não seja alterado o posicionamento dos cabos e evite segregação. Evitar o contato de vibradores com as cordoalhas (EMERICK, 2002).

Depois de concretado, deve ser verificado a integridade do concreto nos nichos, e em todas as superfícies aparentes. Se forem detectados qualquer broca ou anomalia, a operação de protensão deve ser suspensa. Uma marca de tinta deve ser feita para a análise do alongamento do cabo após a protensão, em sua ancoragem ativa. A protensão só poderá ser realizada quando o concreto atingir a resistência mínima permitida. Um andaime ou uma área deve ser dedicada para os profissionais que executarão a protensão, medindo o alongamento simultaneamente com a protensão. O macaco hidráulico deverá ser posicionado assentando-se sobre a ancoragem, não podendo colocar carga na cordoalha a ser tracionada. Após analisar o alongamento, deve-se verificar se houve algum erro quanto aos valores de cálculo, que pode ser justificado por erro do equipamento, da marcação de tinta, escorregamento na ancoragem passiva, falha na concretagem ou apoio errado do macaco (EMERICK, 2002).

Quanto à protensão, existe uma recomendação de sequência para a sua realização, onde deve se protender todos os cabos das nervuras (no caso de laje nervurada), ou todos os cabos uniformes (nos casos de laje lisa), posteriormente se protende todos os cabos das vigas e por último, cabos de combate à retração, se houver (EMERICK, 2002). Antes de iniciar os trabalhos, os equipamentos de protensão devem ser verificados, checando se são os mais adequados para a obra e verificando o peso, voltagem e principalmente a calibragem. É importante que o manômetro da bomba e o macaco hidráulico (Figura 22) não sejam separados, pois são calibrados em conjunto. A etapa mais crítica do serviço é a da protensão, em que o aço é submetido a uma tensão de cerca de 80% de sua resistência (Figura 23) (NAKAMURA, 2012).

Figura 22 – Macaco Hidráulico e Bomba com manômetro



Fonte: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/185/artigo286936-2.aspx>> Acesso em: 4 de novembro, 2015

Figura 23 – Protensão realizada pelo macaco hidráulico

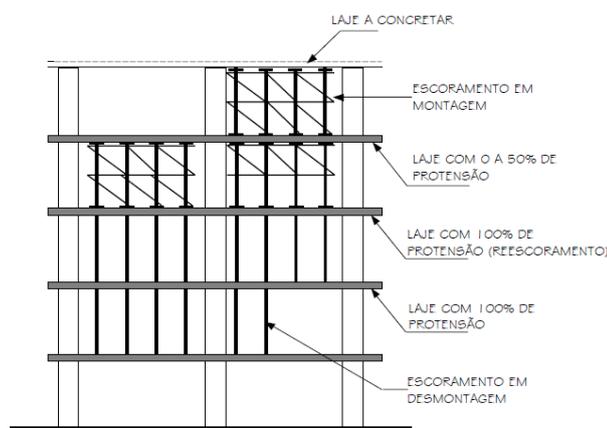


Fonte: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/185/artigo286936-1.aspx>> Acesso em: 4 de novembro, 2015

Após a protensão, deve-se cortar os cabos, por meio de um maçarico, deixando uma pequena ponta de 20 mm para fora da cunha, que permita um recobrimento de 25 mm em relação à face do concreto. Quanto ao escoramento, é recomendado que seja feito concretagem com pelo menos dois ou três níveis de escoramento, dependendo das dimensões da laje, como mostrado na Figura 24. No caso de lajes usuais, tem sido adotado protensão aos 4 dias de todos ou de uma parcela dos cabos, dependendo do projeto. No projeto, deve ser

apresentado de forma clara as idades de protensão, resistência mínima do concreto e os cabos que serão protendidos, caso a protensão seja realizada em duas ou mais etapas. O tipo de escoramento e o tempo que ele deve permanecer devem ser determinados pelo projetista, especificando o módulo de elasticidade mínimo do concreto e o número de pavimentos que devem ser mantidos reescorados, além do método que deve ser feito o reescoramento (EMERICK, 2002).

Figura 24 – Montagem e desmontagem do escoramento de lajes protendidas



Fonte: Código Modelo CEB/FIP, 1990

2.8 – DESVANTAGENS DA PROTENSÃO

Assim como nos aços do concreto armado convencional, o concreto protendido também sofre corrosão, denominado corrosão sob tensão, que fragiliza a seção da armadura, além de propiciar a ruptura frágil. Devido a isso, a armadura protendida deve ser muito protegida (ISHITANI & SILVA, 2002).

As perdas de protensão são perdas devido a esforços aplicados nos cabos. Podem ser: perdas imediatas, onde são verificadas durante a operação de estiramento e ancoragem; perdas por atrito, provenientes por atrito do cabo com peças adjacentes, durante a protensão; perdas nas ancoragens, onde movimentos nas cunhas de ancoragem são provocados quando o esforço realizado pelo macaco hidráulico no cabo é transferido para a placa de apoio; encurtamento elástico do concreto; perdas por retração ou fluência do concreto; perda por relaxação do aço, quando há uma queda de tensão nos aços de alta resistência (ISHITANI & SILVA, 2002).

Altas forças nas ancoragens, má qualidade da nata de injeção e da capa engraxada nas cordoalhas e baixo controle de execução podem causar sérios riscos para a execução de uma

estrutura por meio do sistema de protensão, deixando assim nada vantajoso sua utilização (ISHITANI & SILVA, 2002).

3 ESTUDO DE CASO: CÂMARA MUNICIPAL DE ANÁPOLIS

3.1 INTRODUÇÃO

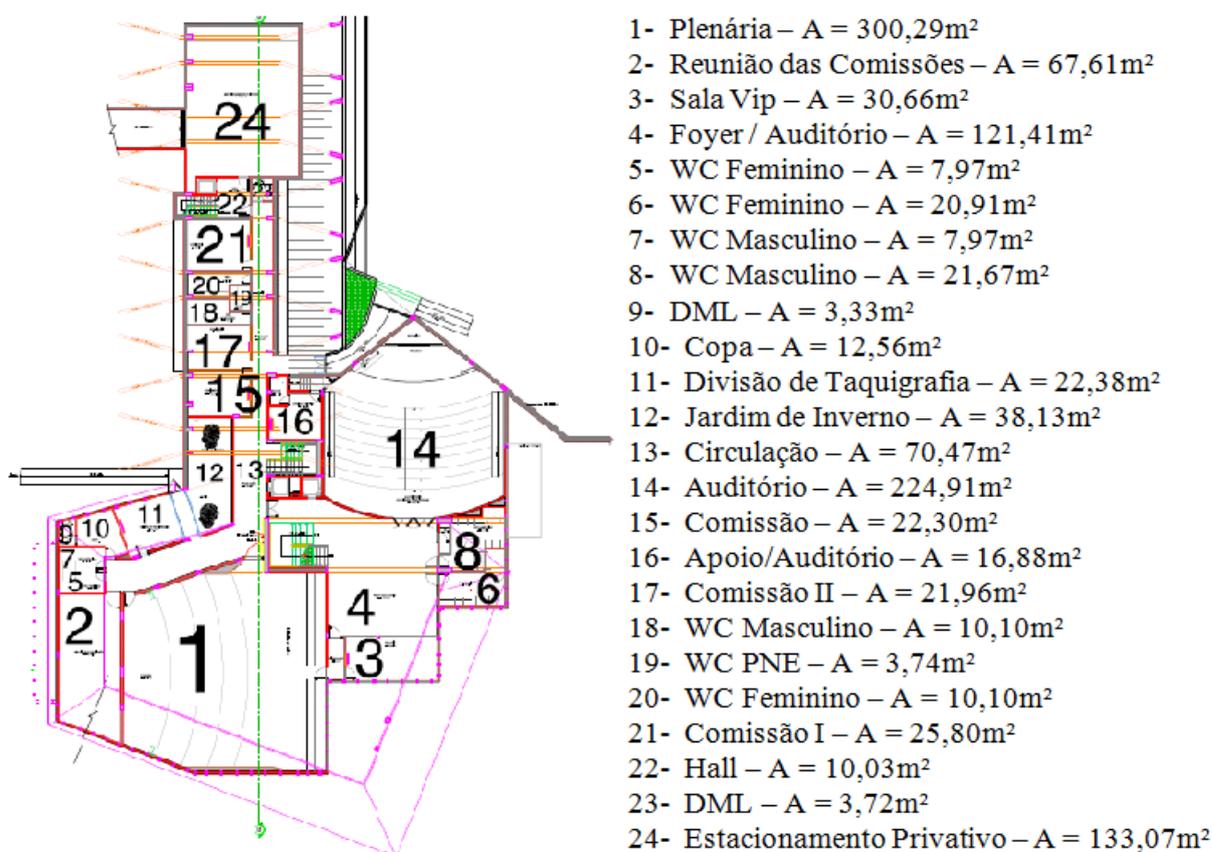
O estudo de caso deste trabalho foi desenvolvido na obra da Câmara Municipal de Anápolis, Edifício Administrativo, situada na cidade de Anápolis, na Praça 31 de Julho, S/Nº - Centro. O objetivo foi evidenciar a funcionalidade do sistema de protensão para grandes obras. O estudo foi desenvolvido junto com os fiscais da Prefeitura Municipal de Anápolis e o Engenheiro Civil da construtora Albenge, responsável pela obra.

A protensão vem sendo desenvolvida no Brasil desde 1948, como mencionado no capítulo 2, porém, esse método foi utilizado na cidade de Anápolis pela primeira vez apenas no ano de 2013, no Residencial Belvedere Du Parc, onde havia um grande vão na Sala de Jantar/Estar, a qual ainda tinha a opção de ser expandida, aumentando ainda mais a importância do sistema de protensão nesse caso.

O estudo de caso irá transparecer todos os pontos positivos e negativos da utilização do método na obra, desde a elaboração do projeto com o detalhamento das cordoalhas, passando pela etapa executiva, até o pós obra.

A obra da Câmara Municipal de Anápolis possui 6 pavimentos e é composta por um subsolo (Figura 25), térreo, 1º pavimento (onde está localizado o Mezanino), 2º Pavimento, 3º Pavimento e o 4º Pavimento (onde está localizado o Piso Técnico).

Figura 25 – Arquitetura Planta Baixa - Subsolo



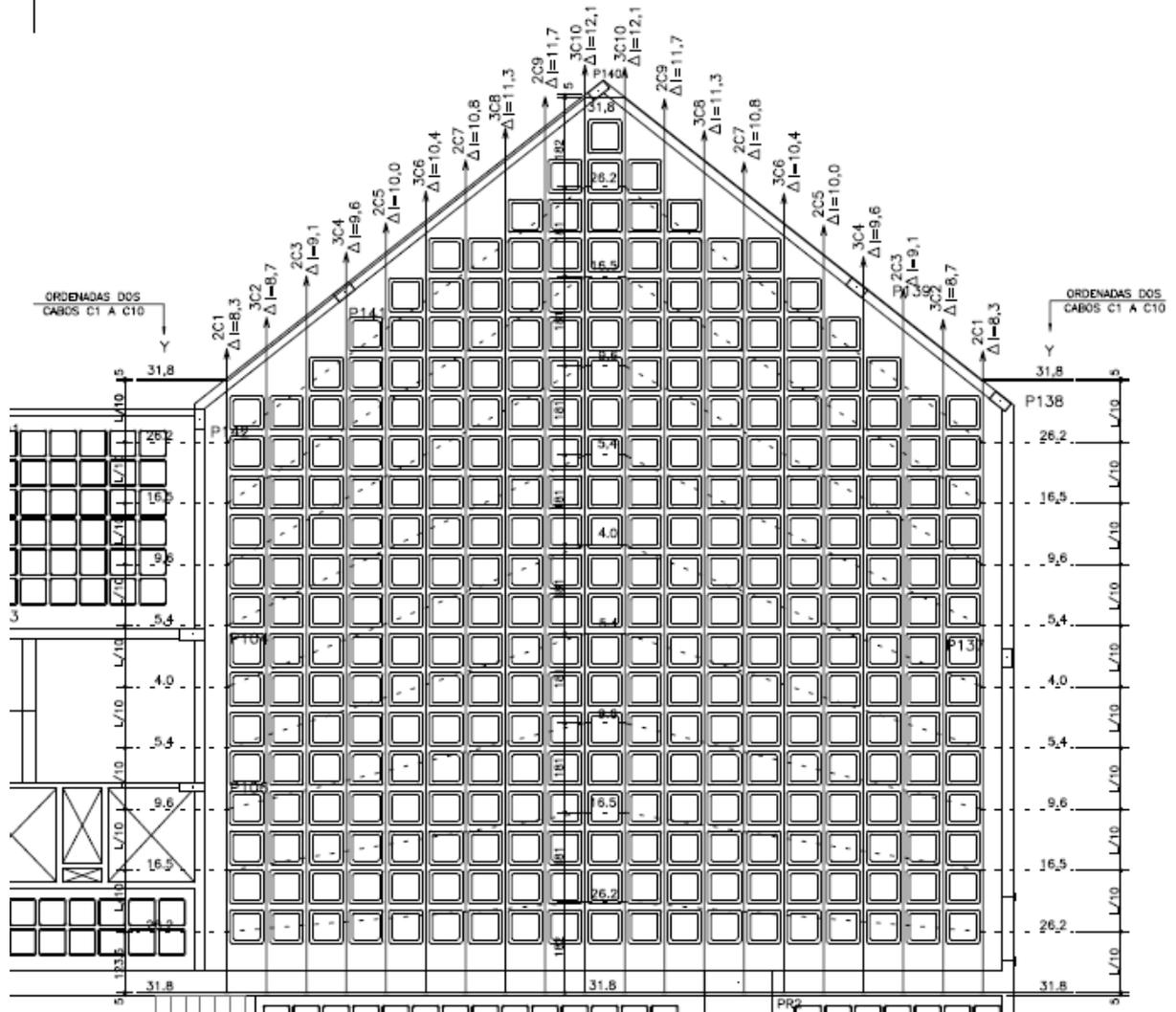
Fonte: Próprio autor

3.2 PROJETOS DE PROTENSÃO

3.2.1 Protensão das Lajes do Térreo e Segundo Pavimento

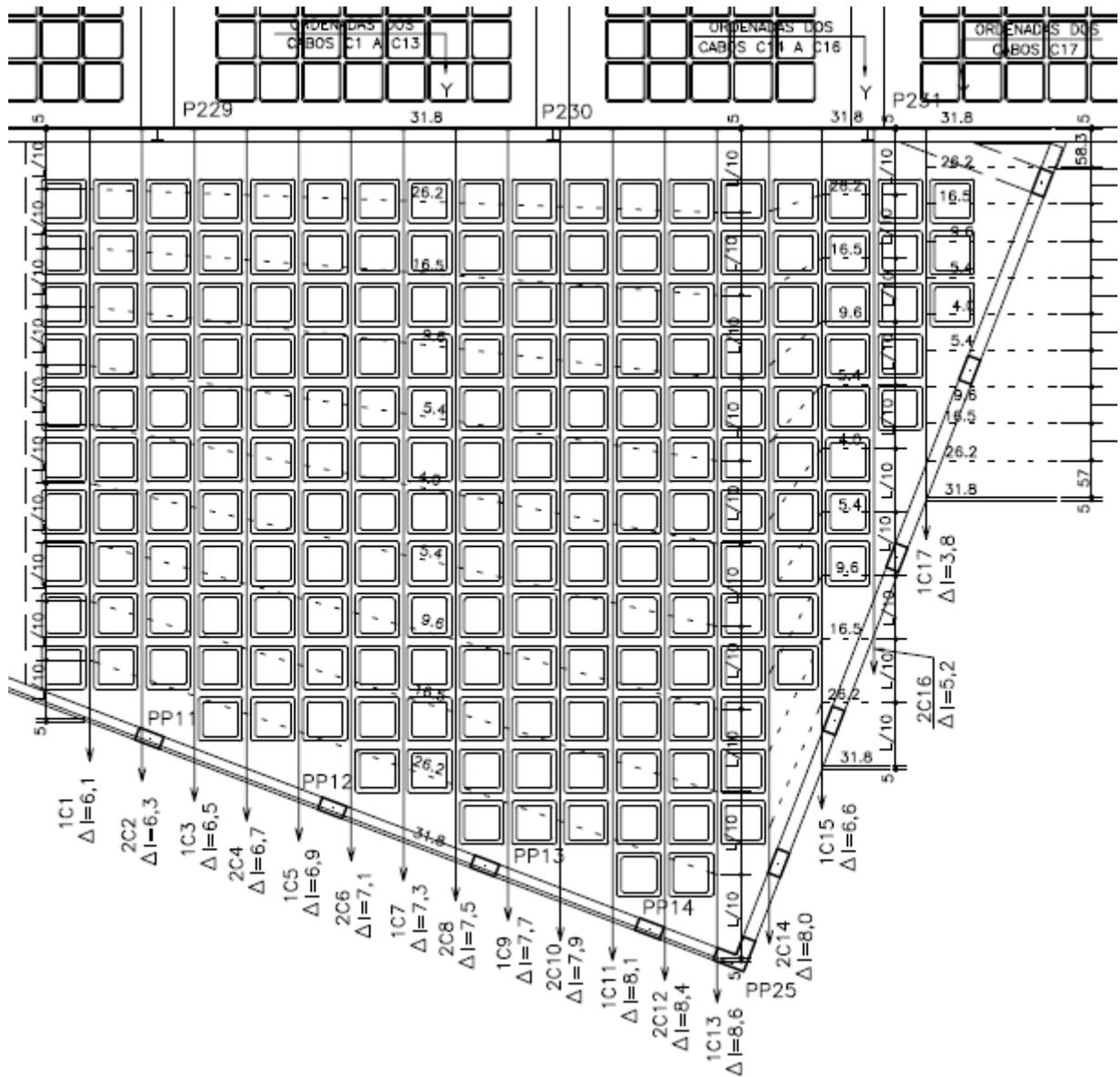
No subsolo temos o auditório, com área de 224,91 m² e capacidade de 230 pessoas, e temos também a Plenária, com área de 300,29 m². Para a protensão das lajes da Câmara Municipal de Anápolis, foi utilizado o sistema de monocordoalhas não-aderentes, onde todos os cabos possuem diâmetro de 12,7 mm, CP 190 RB-EP. A força de protensão a ser aplicada em cada cabo foi de 15 tf. Foram distribuídos pela laje 105 cabos com ancoragem ativa e passiva e um comprimento total de 951,75 metros para a laje do térreo, e 673,55 metros para a laje do segundo pavimento que se encontra com o pavimento térreo da primeira etapa, conforme projetos mostrados nas Figuras 26, 27, 28 e 29.

Figura 26 – Protensão da Laje do Térreo no sentido longitudinal



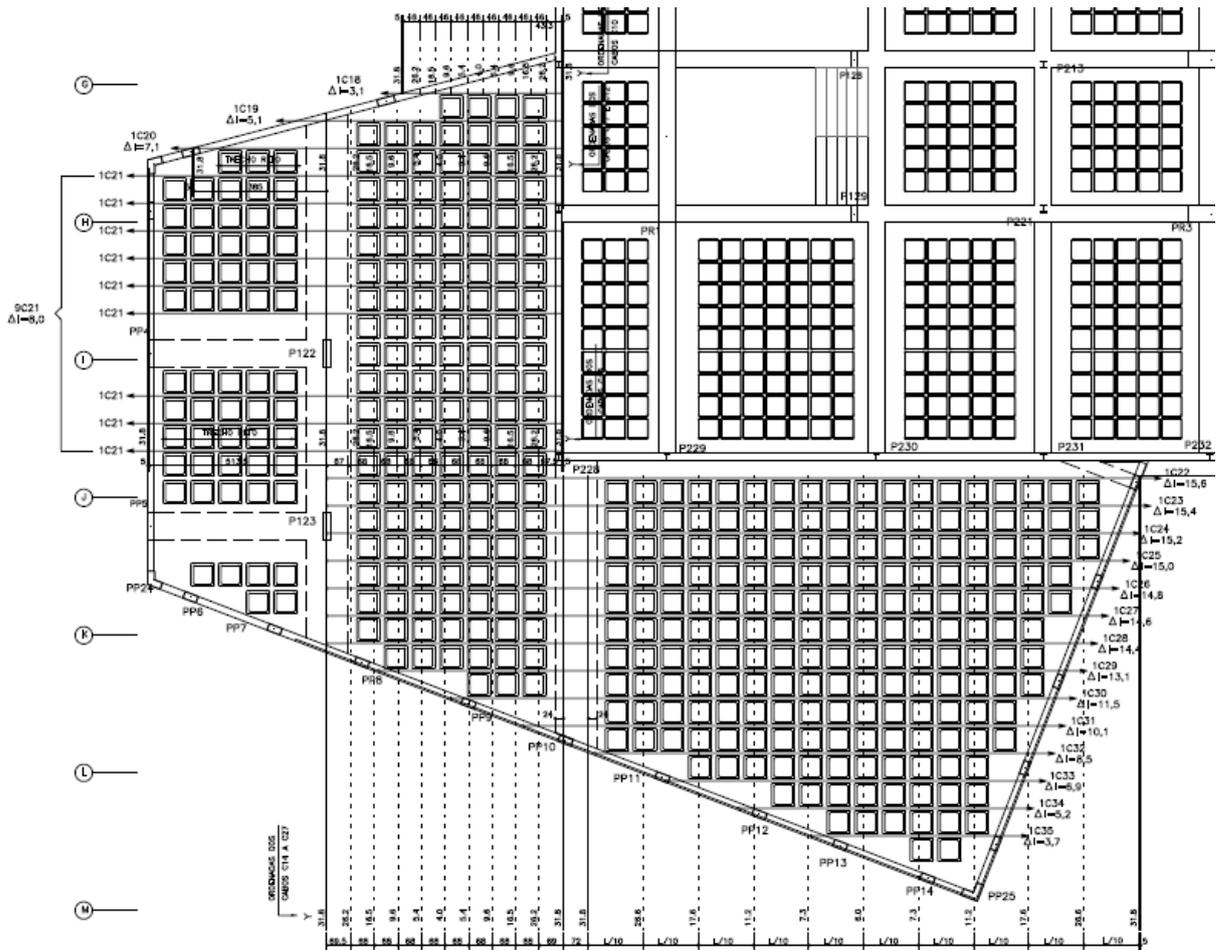
Fonte: Próprio autor

Figura 28 – Protensão da Laje do 2º Pavimento no sentido transversal



Fonte: Próprio autor

Figura 29 – Protensão da laje do 2º pavimento no sentido longitudinal



Fonte: Próprio autor

A empresa contratada para realizar os cálculos e os projetos foi a empresa Lorenzini Protensão. Em seu site, conta sua história, sendo que possui parceria internacional, seus engenheiros buscam especialização onde mora o mais amplo conhecimento na área, os Estados Unidos. Fundada em 1999, a sua sede está situada em Brasília, sendo que em 2003, ocorre o surgimento de sua primeira filial no Espírito Santo. Devido a isso, foi a empresa escolhida para ser a responsável por todos os projetos de protensão da obra.

O motivo da laje ser protendida, é basicamente o fato de possuir ambientes que não permitem a existência de pilares: o auditório, situado no térreo, e a plenária, no segundo pavimento. Outra razão para utilização da protensão foi o pé direito de 10 metros, que também foi determinante para a escolha dessa técnica.

A laje do auditório possui 105 cabos distribuídos alternadamente entre 3 e 2 cabos na direção transversal e longitudinal da laje, situados em cada uma das nervuras ao longo de todo o ambiente a ser protendido. A laje da plenária consta de 51 cabos na direção transversal e

longitudinal, situados em cada uma das nervuras ao longo de todo o ambiente a ser protendido. A ancoragem é composta por uma ativa e uma passiva, sendo que a ativa fica para fora da estrutura e a passiva fica enterrada dentro da peça, e é feita através de uma chapa acunhada denominada fretagem, concretada junto com a peça.

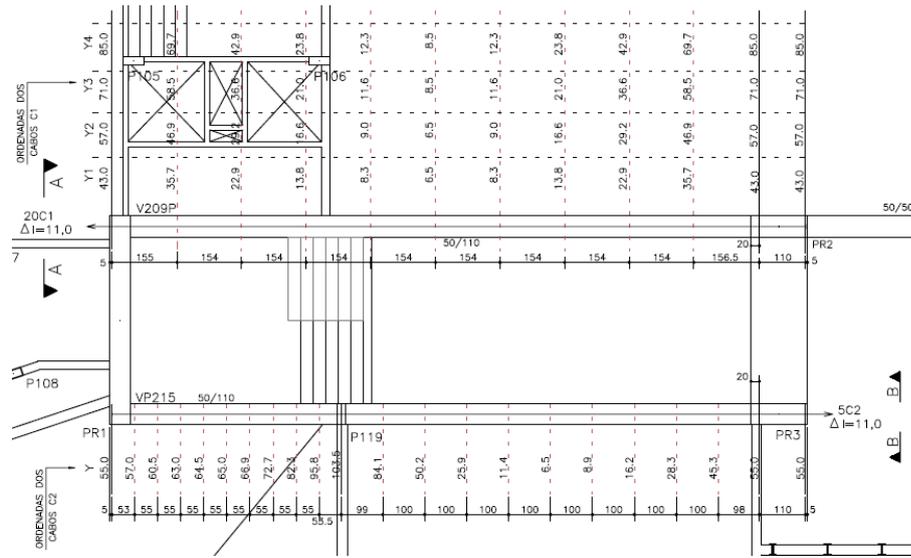
3.2.2 Projeto de Protensão das Vigas

A obra possui protensão de viga nas lajes do térreo, 1ª Pavimento, 2º Pavimento e 4º Pavimento. O principal motivo para a técnica da protensão para as vigas foi a deformação devido à variação térmica. No térreo, por exemplo, quatro vigas são protendidas (Figura 30, Figura 31 e Figura 32).

A viga VP209 possui: 20 cabos de 12,7 mm de diâmetro, com 17,20 m de comprimento unitário com uma ancoragem ativa e uma passiva em todos os cabos, com um alongamento final de 14,3cm; a VP215 possui: 5 cabos de 12,7 mm de diâmetro, com 17,20 m de comprimento unitário com uma ancoragem ativa e uma passiva em todos os cabos, com um alongamento final de 11 cm; a VP220 possui: 30 cabos de 12,7 mm de diâmetro, com 9,6 m de comprimento unitário, com uma ancoragem ativa e uma passiva em todos os cabos, com um alongamento final de 6 cm; e a VP224 possui: 20 cabos de 12,7 mm de diâmetro, com 9,6 m de comprimento unitário, com uma ancoragem ativa e uma passiva em todos os cabos, com um alongamento final de 6cm.

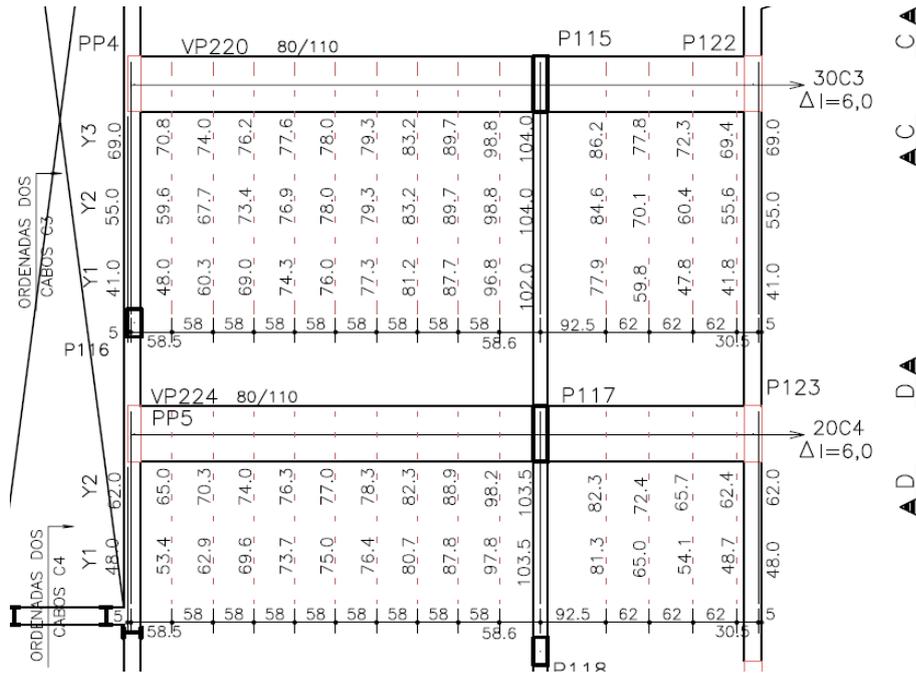
As vigas VP209 e VP215 estão localizadas no Auditório, com dimensões de 16,6 m de comprimento, 0,50 m de largura e 1,10 m de altura, e as vigas VP220 e VP224 estão localizadas na Reunião das Comissões, com dimensões de 4,18 m de comprimento, 0,80 m de largura e 1,10 m de altura.

Figura 30 – Protensão das vigas VP209 e VP215 do térreo



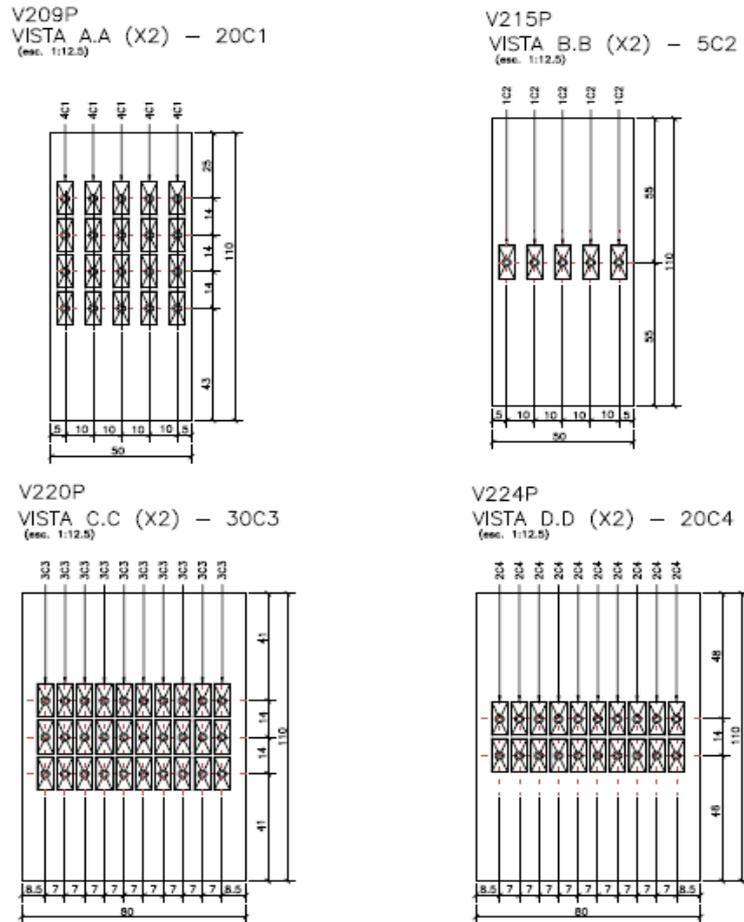
Fonte: Próprio autor

Figura 31 – Protensão das vigas V220 e V224 do térreo



Fonte: Próprio autor

Figura 32 – Vista das vigas do térreo



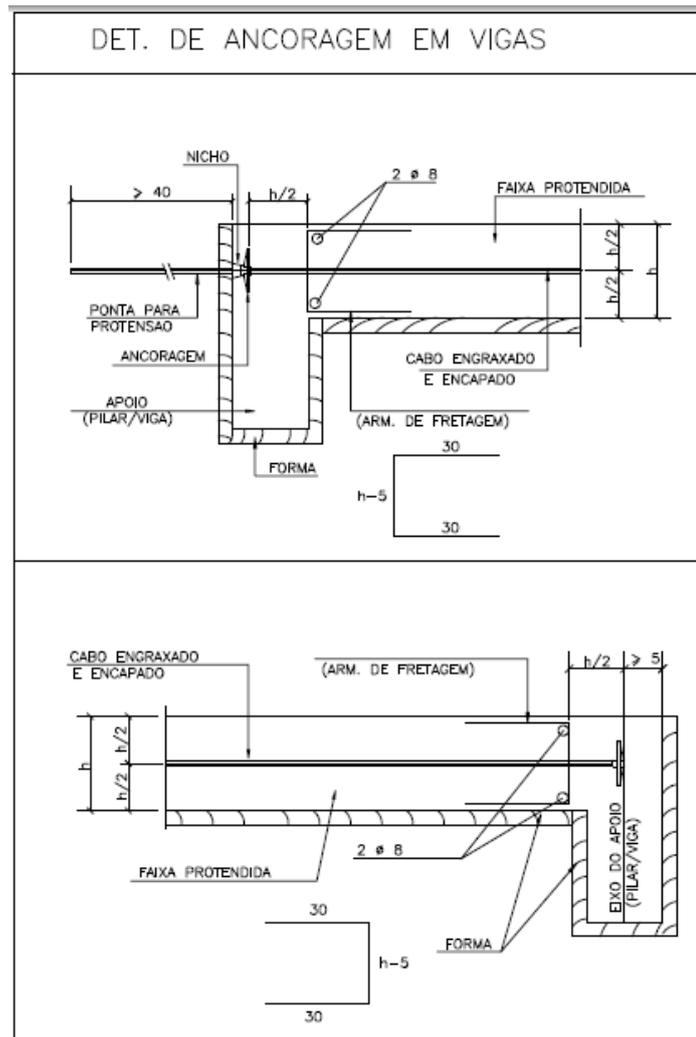
Fonte: Próprio autor

3.3 ANCORAGENS ATIVA E PASSIVA

A ancoragem tem por objetivo manter o cabo em estado de tensão, transmitindo a força de protensão à estrutura. Na obra em questão, foram utilizadas uma ancoragem ativa e uma passiva em cada um dos cabos, como geralmente é feito nas demais obras. A ancoragem ativa é a que permite a aplicação da força de protensão, ficando uma ponta para fora, onde virá o macaco hidráulico e irá protender o cabo. A ancoragem passiva tem por função, solidarizar uma extremidade da cordoalha no concreto.

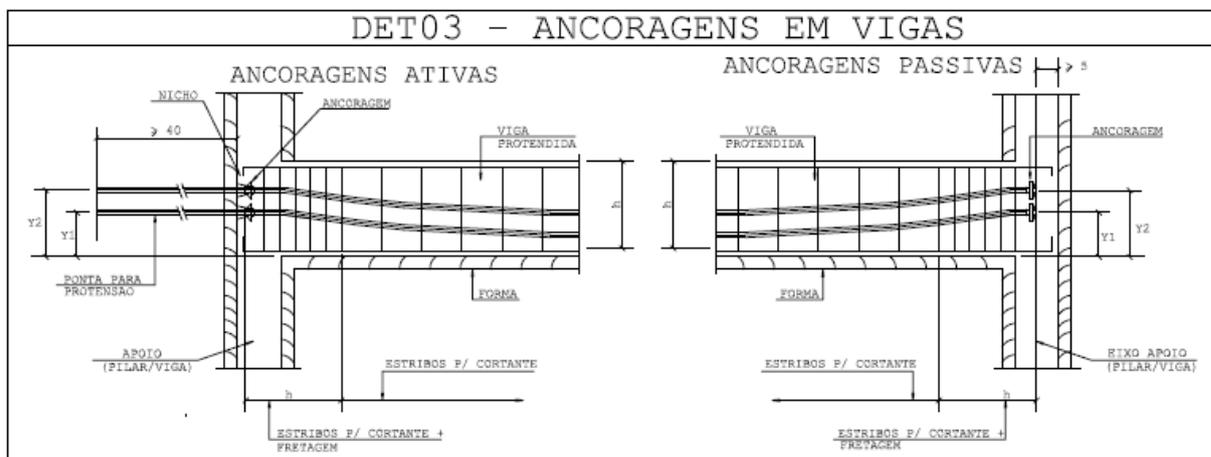
No detalhamento das ancoragens é evidenciado o nicho da ancoragem ativa, e a armadura de fretagem, além da ponta deixada para a protensão; já no da passiva, mostra-se apenas a armadura de fretagem e o local de apoio onde o cabo irá solidarizar o concreto, tal detalhamento é mostrado na Figura 33 e Figura 34.

Figura 33 - Detalhamento das ancoragens em vigas



Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Detalhamento das ancoragens ativa e passiva



Fonte: Próprio autor

3.4 PROCESSO EXECUTIVO

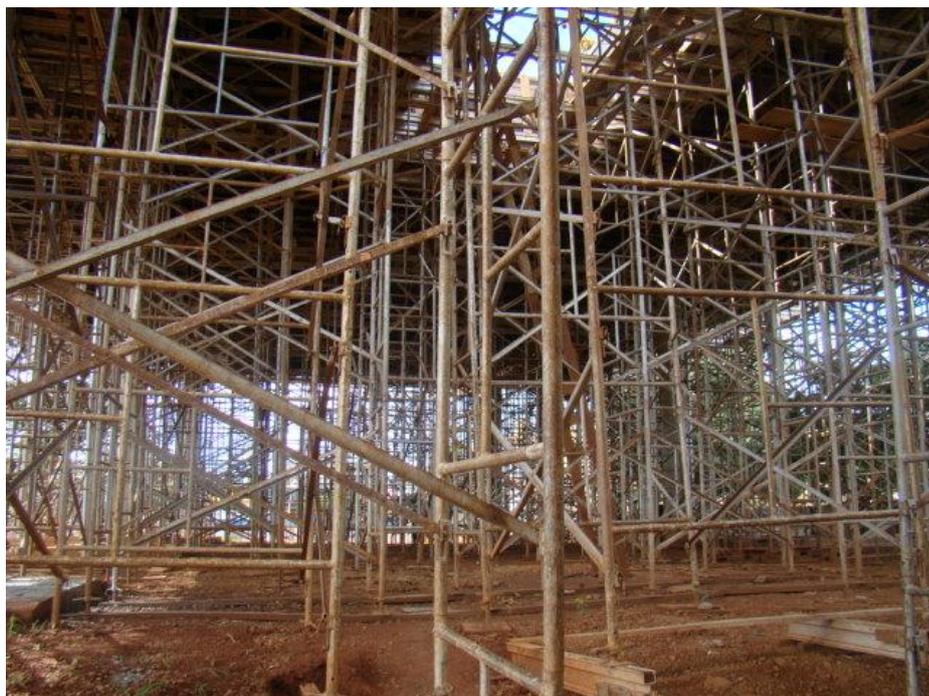
Na obra da Câmara Municipal de Anápolis tiveram alguns importantes motivos para a utilização do sistema de protensão. Como dito anteriormente, foram colocados cabos para combater a dilatação térmica, onde serão evitadas fissuras em peças de grande porte (Figura 35) devido à dilatação; ganhar vãos em áreas internas, onde não se pode ter pilar algum, nesse caso, em um auditório e em uma plenária, onde as lajes foram protendidas, em ambos os eixos, com cabos em cada nervura da laje do ambiente; e um pé direito com mais de 10 metros de altura (Figura 36), tornou extremamente viável a utilização da protensão nas vigas e lajes.

Figura 35 – Viga protendida da laje do térreo



Fonte: Próprio autor

Figura 36 – Pé Direito de 10 metros de altura



Fonte: Próprio autor

A empresa Bueno Construção e Protensão foi a responsável por fornecer o material e executar todo o serviço de protensão da obra. Empresa estabelecida em Goiânia, com mais de dez anos de experiência na área, equipe especializada e equipamentos de última tecnologia na área da protensão.

As cordoalhas foram recebidas já cortadas, com suas dimensões de projeto, sendo conferidas e se adequando às especificações. O armazenamento foi realizado em pranchas de madeira a 30 cm do solo, não danificando o material.

A colocação correta das ancoragens é de extrema importância para a vida útil da protensão, pois a manutenção da tensão ao longo dos anos depende disso (Figura 37).

Figura 37 – Colocação das ancoragens nos cabos



Fonte: Próprio autor

Após a colocação das ancoragens, realizando todo o cabeamento mediante projeto, e suas armaduras devidamente prontas, é realizada a concretagem (Figura 38). O lançamento do concreto foi feito com cuidado absoluto, para que não alterasse o posicionamento dos cabos. A vibração feita com cautela, para que não prejudicasse a integridade dos cabos, deixou brocas que posteriormente foram recuperadas, antes da realização da protensão.

Figura 38 – Concretagem da laje térreo



Fonte: Próprio autor

Com o concreto alcançando a resistência de 35 Mpa após 28 dias, foi autorizada a realização da protensão dos cabos. O macaco hidráulico é colocado na ancoragem ativa dos cabos (Figura 39), situada do lado de fora da estrutura, e o pistão dianteiro crava a cunha dentro da ancoragem após o tensionamento. A pressão da bomba hidráulica foi elevada até a pressão final, atingindo uma força de protensão, previamente calculada, de 15 tf.

Figura 39 – Protensão através do macaco hidráulico



Fonte: Próprio autor

Uma vantagem geral da protensão, quando comparada com o concreto armado convencional, é o fato de que se algo der errado, o problema é acusado no momento da protensão, e já se deve pensar em reforço estrutural, se houver o escoamento de algum cabo ou outro problema, diferente do concreto armado convencional, que só depois de colocar a carga solicitada de uso que será analisado algum problema de cálculo ou execução devido à fissuras. Houve um único problema durante a execução da protensão na obra da Câmara. Devido à grande quantidade de cabos e uma extensa área de aço (Figura 40), brocas tiveram de ser recuperadas, onde o concreto não adentrava a estrutura.

Figura 40 - Encontro de vigas e pilar, com grande área de aço



Fonte: Próprio autor

Algumas vantagens da protensão não foram aproveitadas de forma correta na obra, não sendo desfrutados ao máximo os benefícios desse sistema. A protensão é utilizada para reduzir o tempo de escoramento, onde normalmente uma laje é escorada após sua concretagem por 28 dias, porém, se protender, com 14 dias já poderá ser removido o escoramento, sendo extremamente vantajoso para a execução rápida da obra.

Nessa obra a vantagem do escoramento não foi desfrutada, devido à obra possuir duas etapas, onde uma delas foi concretada 6 meses antes da outra (Figura 41), juntamente com os cabos, então foram seguidos todos os passos solicitados para que não houvesse fissuras ou perda de desempenho dos cabos, deixando a peça chanfrada com 45°, e depois, quando foi concretada a laje nova, foi feita uma nata de cimento, houve um preparo e limpeza da peça, para receber o concreto novo e realizar a aderência entre os dois, não houve problemas.

Figura 41 – Primeira etapa concretada, aguardando andamento da segunda etapa



Fonte: Próprio autor

Devido ao fato de não ter sido realizada a protensão dos cabos, por não ter finalizado a segunda etapa da obra, o escoramento (Figura 42) só foi removido 8 meses depois de ser escorada a laje da primeira etapa, apenas após ter protendido as vigas, deixando claro o não aproveitamento dessa vantagem.

Figura 42 – Laje escorada durante processo de protensão dos cabos



Fonte: Próprio autor

Na parte econômica a vantagem não foi aproveitada, pelo fato da obra ser superdimensionada, possuindo mais cabos do que o necessário, a economia de volume de concreto foi compensada pelo excesso de protensão, e a demora da protensão de uma laje gerou o pagamento de 8 meses de aluguel de escoramento, derrubando a vantagem da parte orçamentária por completo. Porém, seria inviável realizar a obra com concreto armado convencional, pois o projeto de arquitetura é muito complexo, com paredes inclinadas e pé-direito duplo, muitos vãos abertos, fazendo com que se deixe de lado a parte financeira para se atender a parte de arquitetura, porque se fosse atender só a parte econômica, o projeto teria de ser totalmente modificado, saindo da concepção inicial.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando o estudo da obra da Câmara Municipal de Anápolis, pôde-se observar que o aproveitamento da técnica de concreto protendido não foi satisfatório. Brocas foram adquiridas pelo excesso de cabos na região das vigas, exigindo reparos; uso excessivo de escoramento; baixa redução do volume de concreto utilizada e superdimensionamento da obra foram os fatores que fizeram com que o resultado não fosse tão satisfatório.

Problemas foram evitados graças a protensão. Devido ao aumento da resistência do concreto à tração por conta dos cabos, houve uma redução considerável na deformação e fissuração, devido à variação térmica, nas vigas de grandes dimensões. Reduziu-se também o volume de concreto em ambientes onde a laje foi protendida, removendo assim, pilares que ficariam em locais indesejados e atrapalhariam as funções dos ambientes em questão. A diminuição da seção da viga e a execução de um pé direito de 10 metros, sem a protensão, não ocorreriam.

O mercado brasileiro já vê o concreto protendido como solução para grandes obras, onde ao se colocar na balança a vantagem executiva, ou o menor orçamento, a técnica da protensão acaba sendo mais vantajosa em grande parte das vezes, por agilizar o cronograma da obra, aumentar a sua vida útil e garantir a segurança. Anápolis vem desfrutando da técnica, e já possui três obras com concreto protendido em sua estrutura, evidenciando o crescimento físico e intelectual da cidade.

REFERÊNCIAS

- ACI 423 **Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons. Committee 423.** Detroit, 1983.
- CAUDURO, E.L. & LEME, A.J.H **A Protensão em Edifícios sem Viga – Novas Técnicas Aumentam a Qualidade e Reduzem o Custo Total do Edifício – 41º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON, Salvador, 1999.**
- CECCON, J.L **Concreto Protendido Notas de Aula.** Curso de Especialização Engenharia de Estruturas de Concreto – UNICENP.
- EMERICK, A.A **Projeto e Execução de Lajes Protendidas,** Brasília, 2002.
- HANAI, J.B **Fundamentos do Concreto Protendido ,** São Carlos, 2005.
- ISHITANI, H. & SILVA, F.R.L **Concreto Protendido – Fundamentos Iniciais,** Escola Politécnica – USP – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, 2002.
- MORAES, M.C **Concreto Protendido: Introdução ao Uso da Cordoalha Engraxada Plastificada – Caderno de Estrutura Nº 14,** Brasília – 1999.
- NAKAMURA, J **Artigo Protensão Tensão Aplicada,** Revista Técnica, Ed. 185, 2012.
- NBR 14931 **Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento,** ABNT - 2004.
- NBR 6118 **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento,** ABNT - 2014.
- PFEIL, W **Concreto Protendido, Vol. 1, Ed. LTC, 2ª Ed.,** Rio de Janeiro, 1984.
- PTI **Field Procedures Manual for Unbonded Single Strand Tendons,** 1994.
- Revista Técnica, Edição: Janeiro – 1997.
- SOUZA, V.C.M. & CUNHA, A.J.P **Lajes em Concreto Armado e Protendido, 2ª Ed.,** Rio de Janeiro, 1998.
- SCHMID, M.T **Lajes Planas Protendidas, 3ª Ed.,** 2009.

VERÍSSIMO, G.S. & CÉSAR Jr, K.L.M **Concreto Protendido – Fundamentos Básicos, 4ª Ed.** , Universidade Federal de Viçosa, 1998.