



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Renata Barreira Maciel

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJE NERVURADA E PROTENDIDA: aspectos técnicos, aplicabilidade e produtividade.

Palmas – TO

2018

Renata Barreira Maciel

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJE NERVURADA E PROTENDIDA: aspectos técnicos, aplicabilidade e produtividade.

Projeto elaborado e apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II do curso de bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. M.e Roldão Pimentel de Araújo Júnior.

Palmas – TO

2018

Renata Barreira Maciel

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJE NERVURADA E PROTENDIDA: aspectos
técnicos, aplicabilidade e produtividade.

Projeto elaborado e apresentado como requisito parcial
para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão
de Curso (TCC) II do curso de bacharelado em
Engenharia Civil do Centro Universitário Luterano de
Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. M.e Roldão Pimentel de Araújo
Júnior.

Aprovado em: 06 / 11 / 18

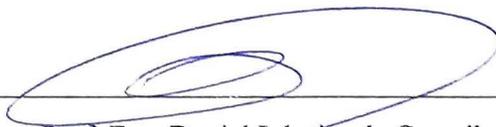
BANCA EXAMINADORA



Prof. M.e Roldão Pimentel de Araújo Júnior

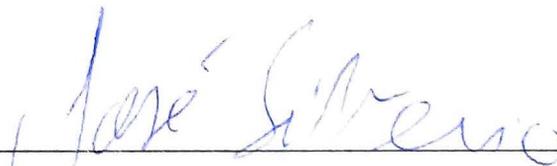
Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. Esp. Daniel Iglesias de Carvalho

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. Esp. José Silvério de Oliveira Júnior

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2018

AGRADECIMENTOS

A Deus por atender a cada uma das minhas orações de maneira até mais especial do que eu pedia e me conceder não somente esta graça, mas as inúmeras que me permitiram estar concluindo este curso. Também a Nossa Senhora Aparecida por todas as intercessões e amparo nos momentos de desânimo.

A minha mãe Creuza Américo, companheira de todas as horas, que me ouve, me acalma e me incentiva em todos os momentos da minha vida. Essa é mais uma de nossas vitórias. E ao meu pai que sempre me inspirou a ser forte e humilde diante de todas as situações.

A meus irmãos e sobrinhos pela compreensão, confiança e apoio. Em especial a minha irmã Suely, meu irmão Darnei e a minha amiga Maraina pelo companheirismo, atenção e paciência.

Ao meu orientador Prof. M.e Roldão Pimentel de Araújo Júnior pelo orientação, compreensão e empenho para realização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

MACIEL, Renata Barreira. **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS: aspectos técnicos, aplicabilidade e produtividade.** 2018. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA), Palmas//TO, 2018.

Em função do avanço da construção civil e do crescente avanço tecnológico, tem-se atualmente uma significativa variedade de sistemas estruturais que oferecem vantagens ao sistema convencional de lajes maciças em concreto armado, fazendo com que os profissionais precisem escolher por um sistema que melhor se adapte ao projeto a ser desenvolvido. O presente trabalho tem como objetivo analisar comparativamente as características relacionadas a aspectos técnicos, aplicabilidade e produtividade entre os sistemas estruturais de lajes nervuradas em concreto armado e lajes protendidas maciças. Inicialmente foram apresentados os sistemas estruturais adotados, descrevendo suas classificações, equipamentos utilizados e levantamento inicial de dados relativos às variáveis analisadas no estudo. Assim, foi realizado um levantamento bibliográfico na literatura especializada através de consulta a artigos científicos, dissertações e livros selecionados através de busca no banco de dados do Scielo, repositórios nacionais e Instituto Brasileiro de Concreto. Os estudos encontrados sobre o emprego de lajes nervuradas e protendidas, apontaram que essas lajes propiciam grandes vãos e melhoram a produtividade em sua execução. Com isso, foram apresentados resultados que possibilitam aos profissionais da construção civil conhecer as limitações e benefícios do emprego de cada uma dessas tecnologias, servindo assim de referência na escolha da alternativa estrutural a ser adotada. Após a realização da análise comparativa das características de cada sistema estrutural adotado, chegou-se a conclusão as lajes têm semelhanças no que diz respeito á aspectos técnicos, quanto a produtividade constatou-se que cada uma delas possuem particularidades que devem ser avaliadas em função de mão de obra disponível, e quanto a aplicabilidade as lajes protendidas têm melhores resultados.

Palavras-chave: Laje nervurada. Laje Protendida. Concepção Estrutural.

ABSTRACT

MACIEL, Renata Barreira. **COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN NERVURED AND PROTECTED LABS: technical aspects, applicability and productivity**. 2018. 74 f. . Final Course Assignment (Undergrad) – Civil Engineering Course; Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2018.

Due to the advancement of civil construction and the growing technological advance, there is currently a significant variety of structural systems that offer advantages to the conventional system of solid slabs in reinforced concrete, making professionals have to choose for a system that best suits to the project to be developed. The present work has as objective to analyze comparatively the characteristics related to technical aspects, applicability and productivity between the structural systems of ribbed slabs in reinforced concrete and massive prestressed slabs. Initially, the adopted structural systems were presented, describing their classifications, equipment used and initial data collection related to the variables analyzed in the study. Thus, a bibliographic survey was carried out in the specialized literature through the consultation of scientific articles, dissertations and selected books through a search of the Scielo database, national repositories and the Brazilian Institute of Concrete. The studies found on the use of ribbed and prestressed slabs, pointed out that these slabs provide large spans and improve productivity in their execution. From this, results were presented that allow civil construction professionals to know the limitations and benefits of the use of each of these technologies, thus serving as reference in the choice of structural alternative to be adopted. After carrying out the comparative analysis of the characteristics of each structural system adopted, it was concluded that the slabs have similarities about to technical aspects, as for productivity, it was verified that each of them has particularities that must be evaluated in function of available labor, and as to the applicability the prestressed slabs have better results.

Key words: Ribbed slab. Prestressed slabs. Structural Design..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Revestimentos e camada de regularização de laje.....	14
Figura 2 – Laje nervurada e posicionamento das armaduras.....	16
Figura 3 – Laje nervurada tipo dupla.....	16
Figura 4 – Laje nervurada tipo invertida.....	17
Figura 5 – Laje nervurada tipo normal (direta).....	17
Figura 6 – Laje nervurada unidirecional.....	18
Figura 7 – Laje nervurada bidirecional.....	19
Figura 8 – Representação do corte longitudinal de protensão aderente.....	24
Figura 9 – Seção de monocordoalha engraxada.....	25
Figura 10 – Execução de laje protendida para edifício em São Paulo.....	28
Figura 11 – Suportes (cadeirinhas) utilizados para fixação dos cabos.....	29
Figura 12 – Fluxograma desenvolvimento da pesquisa.....	32
Figura 13 – Execução de laje nervurada com blocos EPS.....	36
Figura 14 – Execução de laje nervurada com cubetas plásticas.....	37
Figura 15 – Armaduras de laje nervurada.....	38
Figura 16 – Posicionamento de cabos de protensão aderente.....	41
Figura 17 – Posicionamento dos cabos de protensão.....	44
Figura 18 – Concretagem de laje protendida.....	44
Figura 19 – Estoque de cubetas de pavimento em execução.....	50
Figura 20 – Santuário Madre Paulina, Nova Trento – SC.....	52
Figura 21 – Piso com laje protendida.....	53
Figura 22 – Laje nervurada apoiada em vigas.....	55
Figura 23 – Laje nervurada engastada com mesa inferior.....	56
Figura 24 – Laje nervurada engastada com trecho maciço.....	56
Figura 25 – Laje plana nervurada com vigas: Universidade Mackenzie em São Paulo.....	57
Figura 26 – Laje plana nervurada sem vigas: Shopping Bretas em Montes Claros-MG.....	58
Figura 27 – Esquema de laje nervurada com ábaco (esquerda) e capitel (direita).....	59
Figura 28 – Pavimentos de lajes nervuradas com utilização de vigas de borda.....	59
Figura 29 – Esquemas estruturais de lajes protendidas.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – RUP diária de fôrma para laje nervurada.....	47
Tabela 2 – RUP cíclica de armação para laje nervurada.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas
CCA	Concreto Celular Autoclavado
EPS	Poliestireno Expandido
NBR	Norma Brasileira
RUP	Razão Unitária de Produção
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Peso específico
%	Por cento
cm	Centímetro
KN	Quilonewton
m	Metro
m ²	Metro Quadrado
m ³	Metro Cúbico
mm	Milímetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	11
1.2 OBJETIVOS	11
1.2.1 Objetivo Geral	11
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	13
2.2 LAJES NERVURADAS	15
2.2.1 Tipos de lajes nervuradas	16
2.2.2 Materiais de enchimento	19
2.2.3 Aspectos técnicos, aplicabilidades e produtividade	21
2.3 LAJES PROTENDIDAS	23
2.3.1 Tipos de lajes protendidas	24
2.3.2 Equipamentos para protensão	26
2.3.3 Aspectos Técnicos, aplicabilidade e produtividade	27
3 METODOLOGIA	31
3.1 DESENHO DO ESTUDO	31
3.2 LOCAL E PERÍODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA	31
3.3 OBJETO DE ESTUDO	31
3.5 VARIÁVEIS	31
3.6 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS, ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS DAS LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS	35
4.1.1 Execução de lajes nervuradas	35
4.1.2 Execução de lajes protendidas	40
4.2 INDICADORES DE PRODUTIVIDADE EM LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS	45
4.2.1 Análise de produtividade de lajes nervuradas	45
4.2.2 Análise de produtividade de lajes protendidas	48
4.3 APLICABILIDADES DE LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS	49

4.3.1 Aplicabilidades de lajes nervuradas	49
4.3.2 Aplicabilidade de lajes protendidas	51
4.4 BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES TÉCNICAS DE LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS	55
4.4.1 Benefícios e limitações técnicas de lajes nervuradas	55
4.4.2 Benefícios e limitações técnicas de lajes protendidas	60
4.5 ANÁLISE E RECOMENDAÇÃO DE OPÇÃO MAIS SATISFATÓRIA ENTRE AS LAJES EM ESTUDO.....	62
4.5.1 Análise e recomendação em relação aos aspectos técnicos de lajes nervuradas e protendidas.....	62
4.5.2 Análise e recomendação em relação a aplicabilidades de lajes nervuradas e protendidas.....	63
4.5.3 Análise e recomendação em relação à produtividade de lajes nervuradas e protendidas.....	65
5 CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Tem sido cada vez mais frequente a procura por estruturas mais eficientes, que garantam uma boa relação custo-benefício e ainda uso racional dos recursos empregados nas construções. Neste contexto, segundo Faria (2010), empresas do setor da construção civil têm buscado um maior conhecimento em relação a novas técnicas, que possibilitem redução de perdas, custos e tempo de execução.

Diante disso, é possível observar um grande avanço tecnológico, como por exemplo, a adoção de lajes nervuradas e protendidas nas construções. As utilizações desses sistemas estruturais possibilitam a execução de grandes vãos, situação em que, de acordo com Spohr (2008), o emprego das lajes convencionais exige grandes espessuras tornando-se antieconômico.

Com a variedade de sistemas estruturais disponíveis atualmente no mercado, faz-se necessário avaliar qual deles se adapta melhor ao projeto a ser executado. Dessa forma, Silva (2015) afirma que a escolha do sistema satisfatório deve levar em consideração os vãos exigidos pelo projeto arquitetônico, as cargas solicitantes da edificação e os recursos disponíveis para o processo executivo da estrutura.

Segundo Faria (2010), além desses indicadores, é importante destacar, que a decisão do sistema estrutural depende de muitos fatores. Dentre os quais, pode-se citar, mão de obra, viabilidade técnica, uso de fôrmas, tempo de execução, entre outras, tendo em vista que a análise dessas variáveis, otimizam os resultados nas diferentes etapas de projeto.

A proposição deste trabalho é desenvolver um estudo comparativo entre duas alternativas de lajes, que vêm sendo difundidas no mercado, nervuradas e protendidas, no que se refere à técnica, aplicabilidade e produtividade oferecidas por esses sistemas estruturais. Para tanto serão realizadas revisões bibliográficas, buscando conceitos e parâmetros necessários para análise dessas alternativas.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Em relação à técnica, aplicabilidade e produtividade, qual das lajes em estudo apresenta melhor desempenho?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as diferenças entre lajes nervuradas e protendidas no que diz respeito a aspectos técnicos, aplicabilidade e produtividade.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Descrever os procedimentos construtivos das lajes nervuradas e protendidas;
- Levantar indicadores de produtividade em lajes nervuradas e protendidas;
- Identificar aplicabilidades de lajes nervuradas e protendidas;
- Conhecer benefícios e limitações técnicas das lajes em estudo;
- Analisar e recomendar a opção mais satisfatória, levando em consideração os aspectos técnicos de construção, aplicabilidade e produtividade, entre as lajes analisadas.

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com Pinheiro e Razente (2007), o aumento dos vãos, exigidos pelas evoluções arquitetônicas, e o alto custo das fôrmas, tornaram as lajes maciças convencionais desvantajosas economicamente. Dessa forma surgiram no mercado da construção civil grandes inovações nos sistemas estruturais, como a utilização de materiais mais leves e o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas.

Além do desempenho para grandes vãos, Spohr (2008) afirma que as empresas da construção civil, com o intuito de se manterem constantes e competitivas no mercado, têm prezado pela eficiência e produtividade. Nesse sentido, as lajes nervuradas e protendidas passaram a ser amplamente utilizadas, com o objetivo de vencer maiores vãos com espessuras relativamente reduzidas, além da redução na quantidade de pilares e vigas. Desenvolvendo, dessa forma, projetos otimizados e com maior aproveitamento dos materiais empregados.

Ainda segundo Spohr (2008), as particularidades que cada projeto apresenta, impedem a aplicação de um modelo padrão, ocasionando muitas vezes a escolha equivocada do sistema estrutural. Neste contexto, o que justifica a realização dessa pesquisa é apresentar parâmetros que possam auxiliar os profissionais de engenharia na escolha da alternativa estrutural mais adequada para cada obra no que se refere à técnica, aplicabilidade e produtividade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para atingir os objetivos propostos, são apresentadas no referencial teórico as pesquisas recentes que possibilitam o entendimento e embasam a abordagem metodológica proposta no presente trabalho, abordando as principais características das lajes nervuradas em concreto armado e protendidas.

2.1 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

Barboza (2008) define a concepção da estrutura de um edifício como o estabelecimento de um arranjo ou combinação adequada dos diversos elementos estruturais existentes e definição das ações a serem consideradas, com o objetivo de atender conjuntamente os requisitos de segurança, durabilidade, estética, funcionalidade, entre outros, que as construções devem conter. Implica em escolher um ou mais arranjos estruturais para o conjunto da construção, sendo a concepção estrutural a fase mais importante do projeto, pois nesta fase define-se o sistema estrutural, os materiais que serão empregados e as ações a serem consideradas, com a finalidade de pré-dimensionar os elementos estruturais e prever seu comportamento.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 8681:2003), as ações podem ser definidas como causa ou esforços que causam deformações nas estruturas. Sendo que as deformações impostas são ocasionalmente definidas por ações indiretas, e as forças por ações diretas. A norma classifica estas ações como permanentes, variáveis e excepcionais:

a) Ações permanentes:

Ações que ocorrem de forma constante ou com pequena variação durante toda vida útil da construção, sendo que a variabilidade destas ações é medida em um grupo de construções equivalentes. Estas ações podem ser diretas, tais como, o peso próprio da estrutura e os empuxos de terra, ou indiretas como a protensão, retração dos materiais e recalques de apoio.

b) Ações variáveis:

Estas ações acontecem com variações significativas durante a vida da construção. As ações variáveis podem ser normais, quando se tem a chance de ocorrência suficientemente grande de forma que se torne obrigatório a consideração destas no projeto das estruturas, ou especiais, as quais ocorrem nas estruturas em que devem ser consideradas certas ações

especiais, como por exemplo , como ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza ou de intensidade especiais.

c) Ações excepcionais:

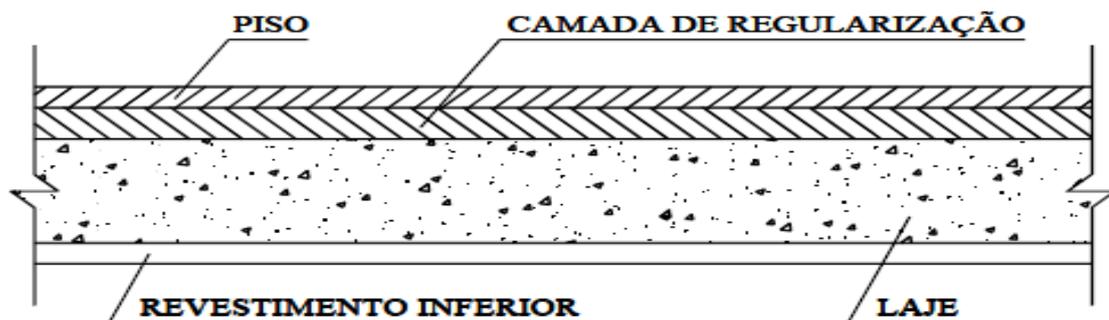
São as ações que possuem um período de duração extremamente curto e muito baixa chance de ocorrência durante a vida da construção. Ainda assim, as ações excepcionais têm de ser consideradas nos projetos de certas estruturas. São classificadas como excepcionais as ações decorrentes de causas tais como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais.

Silva (2005) afirma que para o dimensionamento de lajes dos edifícios, as seguintes ações são normalmente consideradas:

a) Ações permanentes diretas:

Ações provenientes do peso próprio da laje e seus elementos construtivos tais como, peso próprio estrutural, peso de elementos fixos, peso dos materiais de enchimento peso de alvenaria sobre a laje, etc.. Além destes são consideradas também os elementos utilizados para o revestimento e regularização da laje (Figura 1).

Figura 1 – Revestimentos e camada de regularização de laje



Fonte: Silva (2005).

b) Ações permanentes indiretas:

No dimensionamento das lajes protendidas deverão ser consideradas como ações permanentes indiretas ações resultantes dos fenômenos de retração e fluência do concreto, além da ação da protensão.

c) Ações variáveis:

Ações provenientes das cargas acidentais às quais a laje poderá ser submetida, ou seja, provenientes do uso da edificação (pessoas, mobiliário, etc.), sendo considera para fins de

cálculo uniformemente distribuída sobre a laje. Também são consideradas as ações durante a construção, tais como cargas acidentais de execução e peso próprio de estruturas provisórias auxiliares, sendo que sua duração é determinada em cada projeto específico.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda ainda que na análise estrutural seja considerada a influência de todas as ações que possam gerar efeitos significativos quanto à segurança da estrutura em análise, considerando-se os possíveis estados limites últimos e os de serviço. Para tanto, é necessário estabelecer combinações últimas e de serviço de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis à estrutura.

Moncayo (2011) ressalta que a outro requisito importante para a elaboração de projetos de edifícios trata-se da verificação da estabilidade global, garantindo dessa forma a segurança da estrutura perante o estado limite último de instabilidade, situação que corresponde à perda da capacidade resistente da estrutura em função do aumento das deformações.

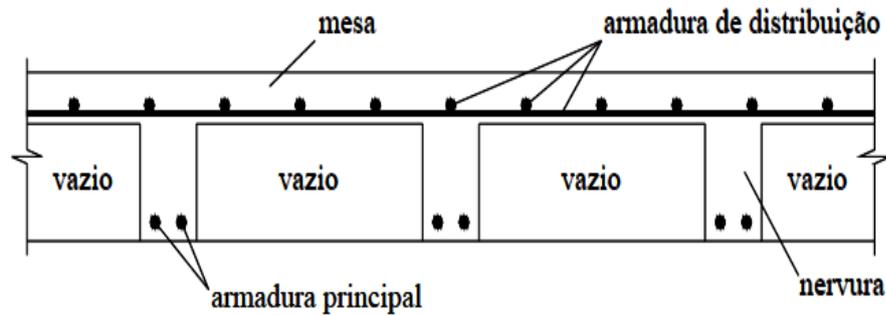
Com as ações atuantes na estrutura estabelecidas, é possível a realização do pré-dimensionamento da mesma. No que diz respeito ao pré-dimensionamento de estruturas em concreto armado, Melo (2013), ressalta que este pode ser determinante na concepção arquitetônica, em função dos espaços estruturais em planta e em elevação. Nele as seções das peças são obtidas a partir do arranjo estrutural admitido, do comportamento estrutural de cada peça e das imposições normativas.

2.2 LAJES NERVURADAS

De acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), as lajes nervuradas são as lajes nas quais a zona de tração para momentos positivos está situada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte, podendo ser moldadas no local ou com nervuras pré – moldadas. Conforme a disposição das nervuras, as lajes nervuradas podem ser denominadas unidirecionais, quando as nervuras estão em uma única direção, ou bidirecionais, quando estão dispostas em duas direções.

As lajes nervuradas foram desenvolvidas a partir da necessidade de melhor aproveitamento dos materiais empregados e redução do peso das estruturas. Para que isto ocorra, o sistema consiste na diminuição do volume de concreto na região tracionada da laje, como demonstrado na Figura 2, uma vez que a resistência do concreto à tração é desconsiderada nas teorias de dimensionamento de estruturas de concreto armado (SCHWETZ, 2011).

Figura 2 – Laje nervurada e posicionamento das armaduras



Fonte: Silva (2005).

Silva (2005), explica que as nervuras consistem em faixas de concreto onde se concentram as armaduras que resistem aos esforços de tração que a laje está submetida. Resultando dessa forma em famílias de vigas, neste caso as nervuras, que estão associadas pela mesa, tendo comportamento intermediário entre grelha e laje maciça.

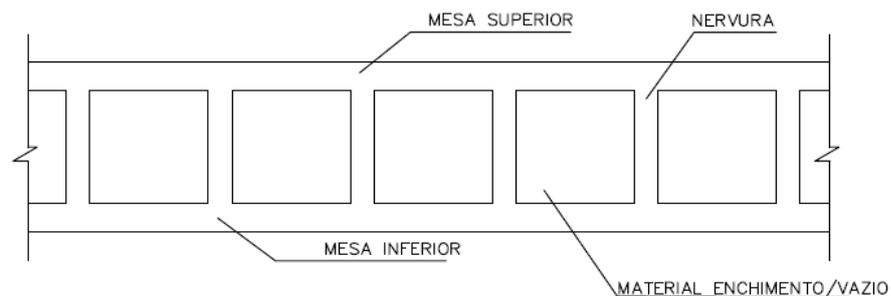
2.2.1 Tipos de lajes nervuradas

De acordo com Silva (2005), as lajes nervuradas moldadas no local possuem diversas classificações. Quanto à sua posição na seção transversal, podem-se dividir estas lajes como dupla invertida ou normal (direta):

a) Laje nervurada tipo dupla:

Neste caso, as nervuras localizam-se entre as mesas de concreto, inferior e superior, como demonstrado na Figura 3. Os espaços entre as nervuras podem ser preenchidos com materiais de enchimento ou permanecerem vazios, sendo neste ultimo caso necessária a utilização de fôrmas, as quais serão perdidas.

Figura 3 – Laje nervurada tipo dupla

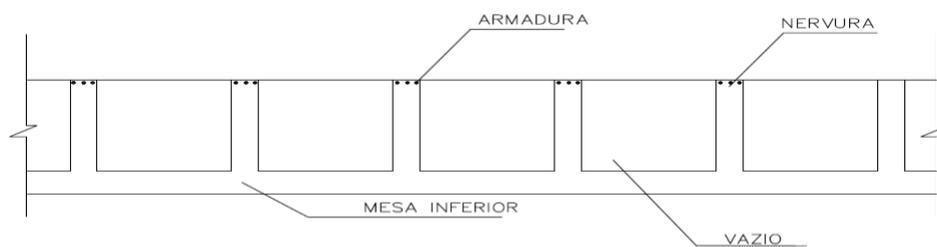


Fonte: Autor (2018).

b) Laje nervurada tipo invertida:

Neste tipo de laje tem-se uma mesa inferior de concreto e as nervuras são superiores, conforme a Figura 4, sendo que o espaço entre estas normalmente mantém-se vazios, tornando-se necessário o uso de fôrmas para moldar a mesa e as nervuras. O emprego destas lajes se restringe para casos de lajes em balanço, nas quais os momentos fletores são negativos.

Figura 4 – Laje nervurada tipo invertida

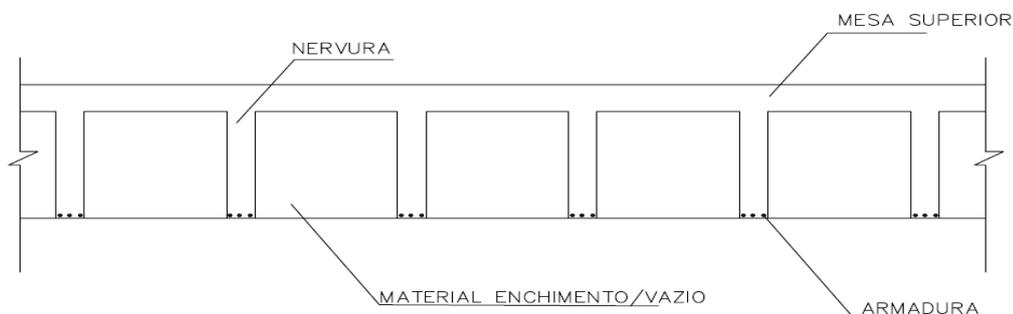


Fonte: Autor (2018).

c) Laje nervurada tipo normal (direta):

Nesta situação tem-se uma mesa superior e as nervuras são inferiores, conforme demonstrado na Figura 5, sendo que os espaços entre as nervuras podem ser preenchidos com material sem função estrutural, que permaneceram na laje, ou ainda permanecerem vazios, fazendo-se necessário o uso de fôrmas. Este é a configuração de laje nervurada mais frequentemente utilizada.

Figura 5 – Laje nervurada tipo normal (direta)



Fonte: Autor (2018).

As lajes nervuradas podem ainda ser classificadas quanto ao posicionamento das nervuras, pois possibilitam a aplicação das nervuras em uma única direção: unidirecional, ou

em duas direções: bidirecional, sendo esta última a mais utilizada. Aparentemente isto ocorre devido à escassez de tecnologia e pela falta de esclarecimento por parte dos projetistas, no que se refere ao comportamento das lajes nervuradas unidirecionais. (TENÓRIO, et al., 2009)

No caso das lajes nervuradas unidirecionais, Silva (2005) esclarece que as nervuras geralmente são posicionadas de forma paralela na direção do menor vão teórico, como demonstrado na Figura 6, admitindo-se que exibem comportamento estrutural de vigas simplesmente apoiadas. De acordo com o vão solicitado são utilizadas nervuras transversais (nervuras no maior vão teórico), com o objetivo de conferir o travamento das nervuras principais. As nervuras transversais também são utilizadas, onde existam ações concentradas ou parcialmente distribuídas sobre as lajes. As lajes nervuradas armadas em uma direção são utilizadas nas ocasiões em que a relação entre o maior e o menor vão teórico for maior que dois.

Figura 6 – Laje nervurada unidirecional



Fonte: APS Construtora (2018).

Nas lajes unidirecionais, as armaduras longitudinais e verificação das deformações deverão ser obtidas por cálculo análogo ao de vigas trabalhando de forma independente com seção transversal tipo “T”. Na determinação do cisalhamento, em função das distâncias entre as nervuras, no entanto, o cálculo deverá ser como lajes ou vigas (ARAÚJO, 2008). Para Barboza (2008), o comportamento de lajes unidirecionais se assemelha ao comportamento de vigas bi-apoiadas, ou em alguns casos, aos de vigas contínuas, sendo que o seu comportamento só se diferencia do de vigas alinhadas lado a lado devido a existência da capa de concreto proporciona um pequeno efeito de placa.

Quanto às lajes bidirecionais, Barboza (2008) explica que as nervuras formam uma malha quase sempre retangular e devem ser posicionadas, preferencialmente, ortogonalmente entre si, como demonstrado na Figura 7, o que facilita a execução e também a aquisição de materiais de enchimento. Quando possível é recomendado dispor as nervuras paralelas às vigas de contorno.

Figura 7 – Laje nervurada bidirecional



Fonte: ATEX (2018).

As lajes bidirecionais são utilizadas na ocasião em que a relação entre o maior e menor vão teórico for inferior a dois. Caso a laje esteja apoiada em vigas ou paredes de contorno, estas sofrerão uma redução dos esforços solicitantes, flechas e uma distribuição de ações sobre elas. Se houver simetria entre os espaçamentos nas duas direções da laje ou houver igualdade no número de nervuras, sujeitando-se apenas as dimensões dos vãos teóricos da laje, as vigas ou contornos de parede poderão estar sujeitas a ações de mesma ordem de grandeza. (SILVA, 2005)

2.2.2 Materiais de enchimento

De acordo com Silva (2005), a utilização dos materiais de enchimento tem como função o aumento da altura da laje, e também do braço de alavanca formado pela capa de concreto comprimido e a armadura tracionada. O autor ressalta ainda que os elementos de enchimento não tem função estrutural, devendo suportar somente o peso do concreto fresco e as ações em função da execução.

Para a execução das lajes nervuradas, os materiais inertes mais utilizados são os blocos de EPS (poliestireno expandido) e de CCA (concreto celular autoclavado). Também são também empregados tijolos cerâmicos, porém em menor escala, devido o acréscimo ao peso próprio da estrutura. Existe ainda a opção da utilização de fôrmas, apropriadas para

modelagem da laje nervurada, neste caso a colocação de materiais inertes é dispensada (SILVA, 2002).

Spohr (2008) afirma que no caso da utilização dos blocos de EPS tem-se como vantagens o fato de permitirem que a laje receba com mais facilidade o acabamento e apresentarem baixo peso específico ($\gamma = 0,1$ a $0,25$ kN/m³). Silva (2002) acrescenta ainda que os cortes no EPS são feitos facilmente utilizando-se facas ou serrotes, por exemplo, sem haver perdas devido a quebras e facilitando a passagem de tubulações. Além disso, a aplicação destes blocos oferta maior conforto acústico, visto que há uma redução dos ruídos entre os pavimentos.

Semelhante aos blocos de EPS, os blocos de concreto celular autoclavado, apresentam baixo peso específico, provocando uma redução no peso próprio da estrutura e consequentemente das cargas nas fundações, influenciando no custo do empreendimento. Os blocos permitem ser posicionados sem dificuldade nos espaços determinados pela armação, dispensando fixação adicional para a concretagem. A sua utilização também facilita a execução da armação, concretagem e a instalações, visto que é de fácil manuseio e pode ser facilmente serrado ou cortado (SILVA, 2002).

Os blocos cerâmicos possuem como vantagens um melhor isolamento acústico e térmico comparados ao concreto, facilidade de aquisição e produção em diversas dimensões. Porém quando comparados aos demais blocos utilizados nas lajes nervuradas, os blocos cerâmicos provocam aumentos na carga da estrutura. Além disso, exigem vedação com argamassa ou plástico que evitem a penetração de concreto, para que os blocos atuem efetivamente como material inerte (BARBOZA, 2008).

Optando-se pela permanência dos vazios entre as nervuras, torna-se necessário utilizar fôrma em toda a laje (face inferior da mesa e faces laterais e inferiores das nervuras). Neste caso eram normalmente usadas fôrmas de madeira, porém, devido os altos custos deste material, atualmente vem se destacando o uso de fôrmas de polipropileno reaproveitáveis, sendo que essas fôrmas são comercializadas com diversas dimensões em planta e alturas, são reforçadas internamente, e proporcionam uma adequada precisão nas dimensões e acabamento. Elas são leves e de fácil manuseio, sendo instaladas de forma direta sobre o escoramento, não sendo necessário assoalho na execução da laje (SILVA, 2005).

Silva (2002) cita ainda como vantagens do emprego de fôrmas de polipropileno, o fato de que não adicionam peso às lajes, dispensam o uso de compensados e inertes, são leves, facilidade de montagem e desforma.

2.2.3 Aspectos técnicos, aplicabilidades e produtividade

Segundo Schwetz (2011), algumas vantagens importantes apresentadas pelas lajes nervuradas tem feito com que sua utilização avance consideravelmente no mercado. Dentre elas, a possibilidade de execução de maiores vãos, resultando em espaços mais livres, o que pode ser um diferencial no que se refere, por exemplo, a garagens e estacionamentos, onde as colunas interferem as manobras dos veículos e podem reduzir o número de vagas. Spohr (2008) também cita a possibilidade de distribuição dos pilares de acordo com o projeto arquitetônico, sendo dispensada a necessidade de alinhamento entre eles, além disso, o autor afirma que as vigas não condicionam o posicionamento das paredes neste tipo de laje, proporcionando maior liberdade ao projeto arquitetônico. Araújo (2014) afirma que as lajes nervuradas tornam-se competitivas economicamente em relação ao sistema de lajes maciças em vãos a partir de 8m.

No caso das lajes planas nervuradas com vigas, Hennrichs (2003), explica que a laje é apoiada em vigas “chatas”, também denominadas vigas-faixa, que geralmente possuem armaduras bastantes “carregadas”, tanto no que se refere aos estribos quanto em armaduras longitudinais.

A retirada de parte das vigas que compõe o pavimento permite projetar a chamada “laje lisa” ou laje sem vigas. A vantagem da utilização dessas lajes consiste na ausência de vigas, o que proporciona uma maior flexibilidade no layout do pavimento, economia de fôrmas, e tempo de execução. No entanto, o emprego das lajes sem vigas solicitam maiores espessuras de laje (BARBOZA, 2008).

Com relação à versatilidade deste sistema, Spohr (2008) diz que as lajes nervuradas podem ser utilizadas em qualquer tipo de estrutura, tais como prédios comerciais, residenciais e órgãos públicos. No entanto, Barboza (2008) ressalta que uma dificuldade existente na utilização das lajes nervuradas, consiste na interação com projetos em que se têm dutos, como por exemplo, os projetos elétrico e telefônico. Graff (2015) acrescenta ainda que as lajes nervuradas podem solicitar alturas maiores em cada pavimento, influenciando diretamente no pé direito da edificação.

De acordo com Faria (2010) os blocos de EPS não são reutilizados a cada pavimento, pois permanecem na estrutura após a concretagem das lajes, ocasionando desta forma um estoque, fixo e mínimo, de blocos para uma determinada quantidade de pavimentos. Na construção de lajes nervuradas executadas com cubetas de polipropileno, também existe a necessidade de verificação de liberdade espacial suficiente do canteiro para que as cubetas sejam estocadas.

Pinheiro e Razente (2007) recomendam que as lajes nervuradas sejam evitadas nas situações de balanços e engastes. O autor sugere duas soluções para o emprego da laje nervurada em circunstâncias onde o engastamento for indispensável: limitar o momento fletor ao valor equivalente da resistência a compressão ofertado pela nervura e a utilização de lajes do tipo duplas.

Quanto à produtividade Spohr (2008) afirma que as lajes nervuradas apresentam algumas características que contribuem para este fator, dentre estas aponta a possibilidade de embutir as vigas na própria laje, o que evita recortes e proporciona uma maior agilidade ao serviço de montagem das fôrmas. O processo pode ainda ser acelerado com o uso de fôrmas industrializadas, alcançando um ciclo médio de execução de sete dias por pavimentos de aproximadamente 450,00 m².

Ramos (2014) analisou a produtividade em uma obra utilizando laje nervurada com blocos EPS e pode perceber que os serviços de fôrmas e armadura são os que têm maior impacto para o desempenho da obra.

Araújo (2007), explica que o processo de execução das lajes nervuradas se inicia com a análise do projeto da laje, ou seja, o engenheiro responsável e o comprador analisam detalhadamente o todo o projeto da laje nervurada. Realizada a análise, são definidas quais as especificações e as quantidades de cada material que deverá ser empregado na execução da laje. Com isso o projeto é enviado para a obra, e é conferido pelos responsáveis pela construção do empreendimento, para então ser realizada a compra dos materiais.

De acordo com Lopes (2015), a primeira etapa para a construção de uma laje nervurada consiste na colocação das fôrmas e enchimentos. Madeira compensada, chapas de aço e poliestireno expandido são alguns dos materiais utilizados como fôrmas para as lajes nervuradas.

Após a realização do escoramento e o assentamento dos blocos, as armaduras deverão ser colocadas. São executadas as montagens das armaduras das nervuras, e depois as armaduras da capa, conforme indicações do projeto (ARAÚJO, 2008). Quando forem utilizados estribos, estes devem obedecer ao seu devido espaçamento e fixados através de arames à armadura presente nas nervuras, para que dessa forma não saiam de sua devida posição no momento da concretagem (BOCCHI; GIONGO, 2007).

Silva (2005) ressalta que nas lajes nervuradas a armadura transversal localizada nas nervuras é composta por estribos simples fechados, que são dispostos ao longo do comprimento da nervura.

O concreto deverá ser lançado após o amassamento, sendo que entre o fim deste e o lançamento, não deverá demorar mais que uma hora. O uso de retardadores de pega possibilita o aumento deste tempo, conforme as propriedades do aditivo e especificações do fabricante. Sempre que possível, a concretagem da laje nervurada deverá ser realizada em uma única etapa, com o objetivo de evitar juntas de concretagem, porém nos casos em que isto não for possível de ser feito, deve-se assegurar a solidarização do concreto já endurecido com o novo (BOCCHI; GIONGO, 2007).

Após o lançamento, o concreto deverá então ser vibrado, para se obter uma maior homogeneidade e redução no número de vazios, possibilitando que a resistência mínima de projeto seja atingida. No processo de cura do concreto, este deverá ser protegido de agentes prejudiciais como chuva forte, choques e vibrações que possam causar fissuração da massa ou prejudicar sua aderência a armadura. Quando o concreto estiver suficientemente endurecido, para resistir às ações a que a laje será submetida e que estas não provoquem deformações acima do limite aceitável, as fôrmas e escoramentos poderão ser retirados (BOCCHI; GIONGO, 2007).

2.3 LAJES PROTENDIDAS

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) define como elementos de concreto protendido aqueles em que uma parcela das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão, como por exemplo, os macacos hidráulicos, com o intuito de em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, além de proporcionar uma melhoria em relação ao aproveitamento de aços de alta resistência no ELU (estado limite último).

De acordo com Pedrozo (2008), as primeiras lajes protendidas foram executadas em meados da década de 50, utilizando o sistema “liftslab”. Este sistema consistia em concretar e protender as lajes planas sobre o solo para que depois fossem içadas e ancoradas aos pilares. Mas foi na década de 60 que as lajes protendidas conquistaram um grande desenvolvimento em todo o mundo, especialmente nos Estados Unidos.

O desenvolvimento do sistema de protensão tem proporcionado grandes avanços para a engenharia estrutural. De acordo com Schmid (2009), esta tecnologia tem gerado consequências perceptíveis em aspectos econômicos, estruturais e técnicos nas construções em concreto, sendo que o seu potencial ainda não foi completamente explorado. Em muitas situações a protensão deixa de ser empregada pelo não conhecimento suficiente, ou por parte de quem projeta a edificação ou do contratante, das inúmeras vantagens proporcionadas pelo

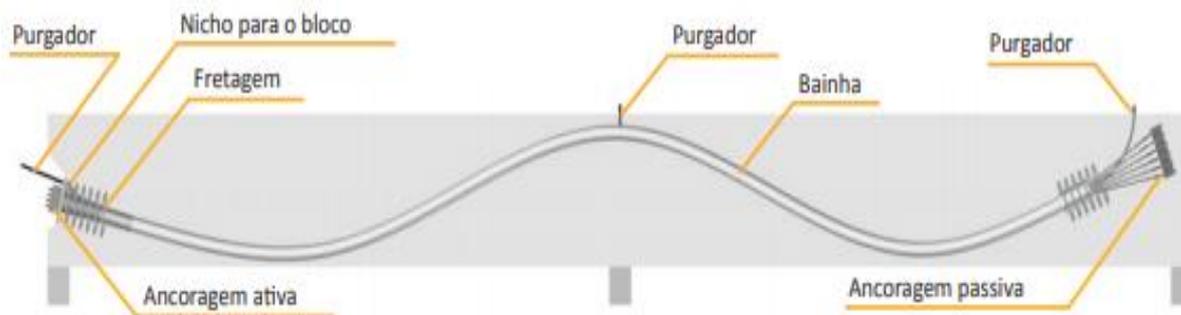
sistema. Dentre essas vantagens está a possibilidade de executar grandes vãos entre pilares, garantindo a edificação flexibilidade e maior flexibilidade arquitetônica. Com a percepção de que uma parte significativa do custo da obra corresponde às lajes, a utilização das lajes protendidas tem ganhado aos poucos o mercado da construção civil.

2.3.1 Tipos de lajes protendidas

De acordo com Carvalho (2012), as lajes protendidas moldadas no local podem ser executadas com protensão aderente e não aderente (cordoalha engraxada). A protensão com aderência posterior em lajes é realizada utilizando-se bainhas achatadas, enquanto que na utilização da protensão sem aderência são empregados cabos de monocordoalha engraxadas.

Pedrozo (2008), explica que a protensão aderente é aquela em que o cabo de aço é alojado no interior de uma bainha metálica e depois alongado por dispositivos hidráulicos (Figura 8), para que posteriormente seja injetada uma nata de cimento a fim de garantir a aderência. Este tipo de protensão é mais usual em estruturas de grande porte, como pontes e viadutos, ou em estruturas que necessitam de uma protensão externa.

Figura 8 – Representação do corte longitudinal de protensão aderente



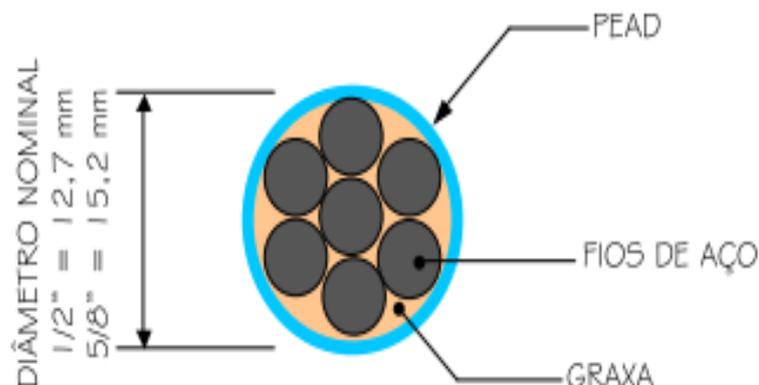
Fonte: Catálogo Rudloff (2012)

Este sistema apresenta maior segurança em casos de ações excepcionais, tais como situações de incêndio e explosões. Schmid (2009) explica que isso se deve ao fato do envolvimento da cordoalha na nata de cimento e bainha metálica. A utilização da protensão com aderência também apresenta como vantagem a relativa independência do sistema de ancoragens no caso de falhas nestas, pois caso isso ocorra a perda de força ocorrerá de forma localizada, não comprometendo o comprimento total do cabo, visto que a força irá permanecer neste.

Com o objetivo de facilitar o processo e tornar a tecnologia mais competitiva em relação a obras de menor porte, é que foi trazida dos Estados Unidos a protensão com

cordoalha engraxada e plastificada (Figura 9), solução na qual a aderência entre o aço e a estrutura de concreto é ausente (PEDROZO, 2008).

Figura 9 – Seção de monocordoalha engraxada



Fonte: Emerick (2002).

A utilização da graxa entre os fios de aço e a bainha plástica tem como objetivo fazer com que o cabo escorregue com facilidade durante a protensão. Segundo Almeida Filho (2002) isso faz com que as perdas por atrito sejam diminuídas de forma significativa, além disso, a bainha plástica de polietileno juntamente com a camada de graxa protege o sistema contra a corrosão, garantido dessa forma uma maior durabilidade da estrutura. A vida útil da estrutura também está associada às ancoragens, visto que segundo Zanette (2006), neste sistema a transferência de forças depende fundamentalmente delas.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece ainda os conceitos que classificam o concreto protendido de acordo com a maneira que armaduras utilizadas são tracionadas:

- Concreto com armadura ativa pré-tracionada (protensão com aderência inicial): consiste no concreto protendido em que são utilizados apoios independentes do elemento estrutural para a execução do pré-alongamento da armadura ativa, antecedendo, neste caso, o lançamento do concreto. Depois de o concreto estar endurecido, é encerrada a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios. A ancoragem do concreto neste sistema acontece exclusivamente pela aderência. Este sistema é normalmente utilizado em indústrias de pré-moldados.
- Concreto com armadura ativa pós-tracionada (protensão com aderência posterior): neste caso somente depois do endurecimento do concreto, é que se exerce o pré-alongamento da armadura ativa. Os apoios então serão partes do próprio elemento

estrutural, gerando posteriormente aderência com o concreto, de forma permanente, a partir da injeção das bainhas.

- Concreto com armadura ativa pós-tracionada sem aderência (protensão sem aderência): não é criada aderência com o concreto, a armadura tem ligação com o concreto somente em alguns pontos fixados. O pré-alongamento da armadura é executado depois do endurecimento do concreto, tendo como apoios, componentes do próprio elemento estrutural.

Assim como as lajes executadas em concreto armado, as lajes protendidas podem ser também classificadas como unidirecionais ou bidirecionais, dependendo da trajetória que a carga seguirá partindo do local de sua aplicação até o apoio da laje. Esta trajetória pode variar conforme as dimensões da laje, forma como a armadura é distribuída, força de protensão aplicada, posicionamento dos pilares, distribuição e intensidade do carregamento (ALMEIDA FILHO, 2002).

2.3.2 Equipamentos para protensão

De acordo com Emerick (2002), a operação de protensão deve ser feita por equipe especializada com macaco hidráulico devidamente calibrado, sendo que esta calibragem é realizada juntamente com a da bomba, portanto depois da calibração deve se garantir que esses equipamentos não sejam separados. O macaco hidráulico é apoiado na borda da laje e tem como função esticar as cordoalhas até que alcancem a força prevista no projeto. Antes da retirada do macaco são cravadas as cunhas de fixação das cordoalhas nas ancoragens da laje.

A ancoragem consiste na combinação de peças necessárias para fixar os aços que serão sujeitos a protensão e transmitir para o concreto a força de protensão. A ancoragem pode ser passiva, ativa, intermediária ou morta. Na ativa a ancoragem é usada para tensionar e fixar a cordoalha para a protensão, ao adicionar cunha e fôrma plástica á essa mesma ancoragem tem-se a considerada passiva, onde não se utiliza o macaco. As ancoragens intermediárias são aquelas que se localizam em qualquer local ao longo do cabo, podendo ser utilizada para tensionar um determinado comprimento do cabo sem que este precise ser cortado, possibilitando assim a antecipação da protensão e remoção da fôrma. Já no caso da ancoragem morta, esta fica na ponta do cabo e fixada em uma das extremidades deste antes que ele chegue à obra.

2.3.3 Aspectos Técnicos, aplicabilidade e produtividade

O sistema de protensão na construção possibilita um melhor aproveitamento da área de concreto, reduzindo assim a espessura da laje. Com uma altura reduzida, obtém-se uma economia significativa dos materiais. A laje protendida também proporciona uma diminuição do peso total do aço empregado no projeto, visto que os cabos têm uma resistência superior às das barras de aço convencionais. Em grandes vãos essa vantagem garante um aumento no espaço para instalações elétricas, hidráulicas e outras. As lajes protendidas mostram-se mais econômicas em vãos acima de 7,00 m, sendo recomendado seu emprego em vãos estruturais em próximos a este valor (de 6,00 a 8,00 m) (PEDROZO, 2008).

De acordo com Emerick (2002), para a execução de lajes protendidas, as lajes lisas sem ou com engrossamento na região dos pilares, tem sido os principais esquemas estruturais utilizados. Sendo que estas apresentam vantagens quando comparadas às demais, principalmente no que diz respeito a sua execução. Porém, sua capacidade é regida pelo esforço cisalhante na ligação laje-pilar.

Quanto a aplicabilidade, este sistema é utilizado normalmente em elementos esbeltos, é necessário observar a necessidade de uma maior inércia ou rigidez, nos casos em que o vão ultrapasse 7,00m, devendo ter sua altura aumentada para viabilizar sua utilização (FERREIRA, 2013).

De acordo com Ferreira (2013), as primeiras aplicações de lajes protendidas foram realizadas em obras de grande porte, como pontes e viadutos, visto as tensões de tração na seção da peça não eram aceitas, essa aplicação era restrita a lajes planas. Com o tempo, passou a ser empregado o sistema de protensão parcial, ainda em obras de arte, possibilitando a execução de vãos maiores. Posteriormente este sistema foi utilizado em edifícios dispensando a utilização de lajes muito espessas, resultando em uma estrutura mais leve e econômica.

Segundo Linck (2013), a utilização da protensão não aderente facilitou a aplicação de lajes protendidas em obras de pequeno porte. Quando aplicadas em lajes lisas esse método construtivo torna-se competitivo, em edificações residenciais, quando comparado aos sistemas convencionais utilizados. Dessa forma a laje protendida ganha mercado, podendo ser executada por construtoras em diversas obras, agregando a estas uma melhor disponibilização nos ambientes internos.

Em edifícios de residências e comércios (Figura 10), a utilização das lajes lisas protendidas permite a diminuição o número de pilares, agregando dessa forma mais flexibilidade dos espaços na planta do projeto. Além disso, o uso de lajes protendidas pode

reduzir de forma significativa a altura do edifício, já que exige uma menor espessura de laje para resistir aos esforços aos quais é submetida (LOUREIRO, 2006).

Figura 10 – Execução de laje protendida para edifício em São Paulo



Fonte: Rudloff (2012)

De acordo com Pedrozo (2008) no caso de lajes lisas protendidas sem a utilização de capitéis, sendo apoiadas diretamente sobre os pilares, deve-se limitar o vão na ordem de 12,00m. Isso se justifica pelo fato de que a laje necessitaria de uma espessura elevada para vencer este vão. Pedrozo (2008) recomenda ainda que vãos isostáticos devem ser evitados, pois devido à ausência de excentricidade geométrica na disposição dos cabos, a eficiência dos cabos é comprometida.

As lajes protendidas apresentam como vantagem em relação à aplicabilidade, a possibilidade de executar pisos de grande extensão (72m), sem a necessidade de juntas de dilatação. Isso se deve a pré-compressão inserida pela protensão, que evita a fissuração do piso em razão da retração do concreto (LOUREIRO, 2006).

No que diz respeito a produtividade, a colocação das cordoalhas na estrutura é facilitada pelo fato de cada bainha comportar até quatro delas em um mesmo cabo. Apesar da necessidade de injeção da nata de cimento na bainha, esta etapa não retarda o cronograma da obra, podendo ser executada juntamente com os demais processos executivo da laje (SCHMID, 2009).

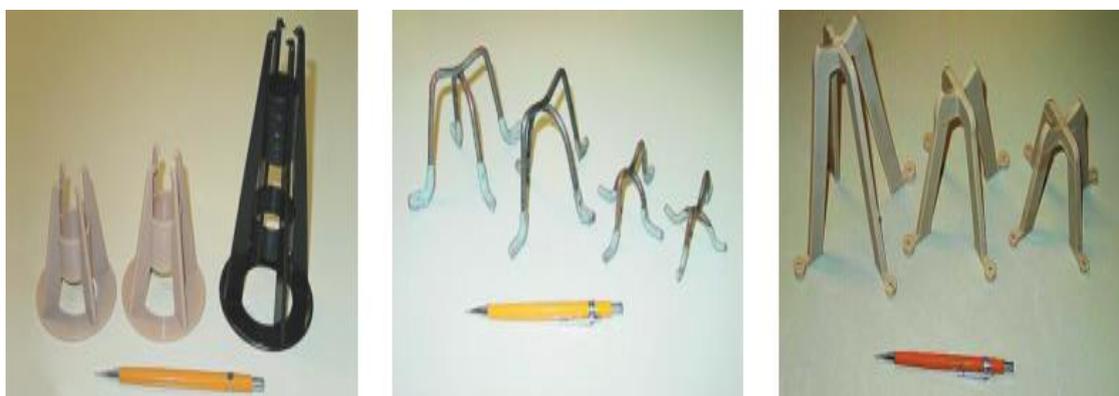
Loureiro (2006) explica que nas lajes protendidas sem aderência com monocordoalhas engraxadas e plastificadas, a fixação das ancoragens é dada de forma mais simples e com baixo peso, garantindo uma maior rapidez na execução da estrutura. Não apenas as ancoragens deste sistema são leves, mas também as monocordoalhas e aparelhos especiais para a protensão dos cabos. Cauduro (2002) ressalta que o baixo peso das monocordoalhas (0,88kg/m, em diâmetros de 12,7mm) proporciona um transporte simples e fácil das

cordoalhas. O macaco hidráulico de dois pistões, que irá tensionar uma cordoalha por vez a cada 30 segundos, também apresenta baixo peso (19 kg).

Para melhor entendimento do processo construtivo das lajes protendidas, Schmid (2009) relaciona a seguinte sequência construtiva destas lajes da seguinte maneira:

1. As formas que irão sustentar a laje antes da sua protensão são montadas, estas assim como o escoramento, deveram ser projetadas considerando seu peso próprio, o peso do concreto, o peso da armadura e também as deformações da laje que ocorrem devido a protensão;
2. É realizada a instalação das ancoragens, sendo é importante lembrar que no caso dos cabos não aderentes, as ancoragens deverão ter uma proteção especial, visto que a transferência da protensão ao concreto se dá somente por estas;
3. É feita a execução da armadura passiva inferior e de punção;
4. Os cabos de protensão são distribuídos em planta;
5. De acordo com o projeto, os cabos são fixados em elevação sobre os suportes. Esses suportes são também chamados cadeirinhas (figura 11) e tem como objetivo evitar o deslocamento dos cabos.

Figura 11 – Suportes (cadeirinhas) utilizados para fixação dos cabos



Fonte: Cauduro (2002)

6. A armadura passiva superior é instalada;
7. É realizada a concretagem, devendo ser feita de maneira cautelosa principalmente em lajes com cordoalhas plastificadas, evitando que a capa que as envolve sofra danos.
8. Depois da cura do concreto, e este atingir a resistência prevista no projeto, as fôrmas verticais de borda são retiradas;

9. Os cabos são então protendidos, com os mecanismos necessários para protender a laje (macaco hidráulico e bomba). Esse procedimento deve ser realizado de acordo com o plano de protensão estabelecido pelo projeto, os alongamentos obtidos também deverão ser verificados com os previstos em projeto;
10. De forma gradativa as demais fôrmas são retiradas;
11. As pontas dos cabos são cortadas, é feita a proteção das ancoragens e então os nichos são fechados.
12. No caso de protensão com aderência, é realiza por fim, a injeção dos cabos.

3 METODOLOGIA

3.1 DESENHO DO ESTUDO

Quanto à finalidade metodológica o presente trabalho, tratou-se de uma pesquisa aplicada, pois pretendeu gerar conhecimento para aplicação prática. Quanto à abordagem, a pesquisa pôde ser classificada como uma pesquisa qualitativa. No que diz respeito ao objetivo metodológico, consiste em uma pesquisa exploratória.

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho o procedimento metodológico adotado consistiu em uma pesquisa bibliográfica, que de acordo com Gil (2002), visa desenvolver a pesquisa a partir de materiais já elaborados, como livros e artigos científicos.

3.2 LOCAL E PERÍODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada na cidade de Palmas - TO. Os dados foram coletados durante o período de março a setembro de 2018. As análises dos dados, determinação dos resultados, e conclusão do estudo aconteceram no período de outubro e novembro de 2018.

3.3 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo desta pesquisa consistiu na análise de aspectos técnicos, produtividade e aplicabilidade das lajes nervuradas em concreto armado e lajes protendidas.

Como a pesquisa se trata de um estudo comparativo tornou-se necessário que as lajes avaliadas utilizassem sistemas similares. Dessa forma o estudo se restringiu a lajes moldadas no local e ambas com sistema de distribuição de armaduras em duas direções.

3.4 VARIÁVEIS

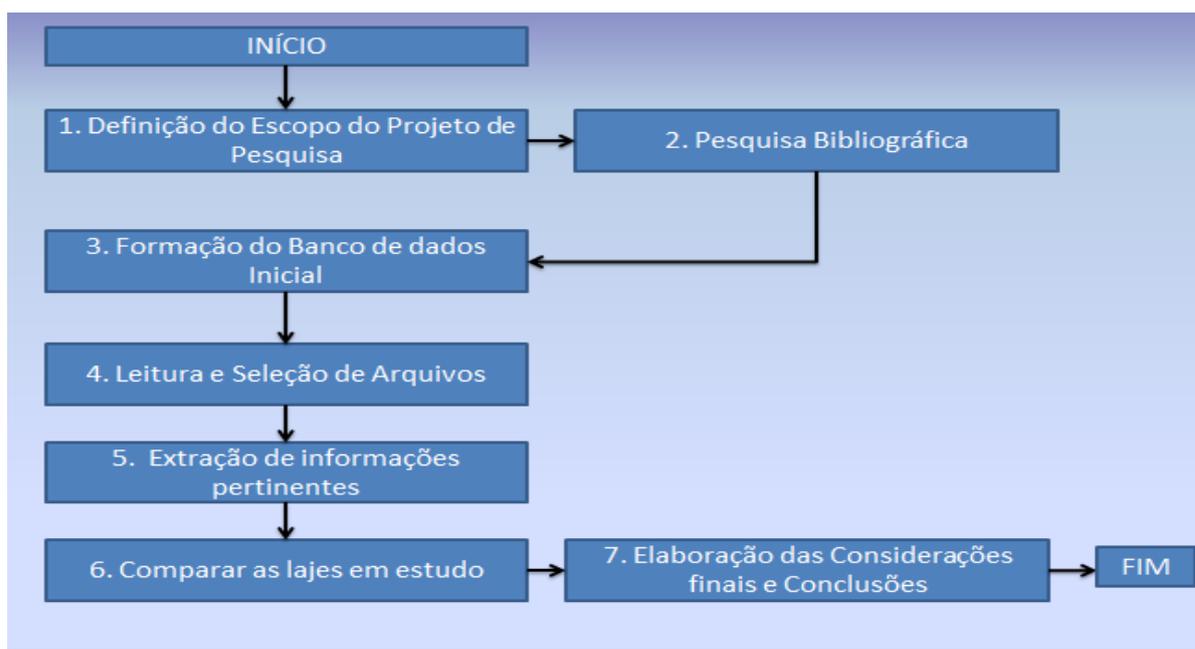
Neste trabalho foram analisadas as variáveis a seguir:

- Aspectos técnicos das lajes nervuradas e protendidas, como vãos alcançados, comportamento global da estrutura e relação das lajes com os demais elementos da estrutura;
- Produtividade ofertada, ou seja, a eficiência proporcionada pelas lajes em estudo para a transformação de recursos físicos em serviços, bem como os principais benefícios e desvantagens em relação a esta.
- Aplicabilidades possíveis das lajes em estudo em obras de grande, médio e pequeno porte.

3.5 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS, ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Para alcançar os objetivos propostos, a pesquisa seguiu o fluxograma apresentado a seguir na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autor (2018).

A etapa 1 consistiu em definir o tema da pesquisa, seu objeto de estudo, sua importância e os objetivos a serem alcançados.

A etapa 2 correspondeu a pesquisa realizada para embasamento teórico dos conceitos básicos dos objetos de estudo e as variáveis que foram analisadas. Foram buscados livros impressos e digitais, normas técnicas, artigos técnicos, dissertações, teses e trabalhos de conclusão de curso que tratassem do assunto do trabalho. Para tanto foram consultados a base de dados Scientific Electronic Library Online (SCIELO), os repositórios nacionais, livros digitais disponíveis em sites ou impressos disponíveis em biblioteca física. Também foi utilizada a ferramenta Google Acadêmico para auxiliar na realização das buscas.

Nestas buscas foram utilizadas palavras – chaves que de acordo com Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012) devem ser escolhidas após a definição do campo amostral, sendo que estas foram o primeiro filtro para a seleção de publicações.

Na etapa 3 os materiais encontrados na etapa 2 foram armazenados no gerenciador de referências Mendeley®, desenvolvido com o objetivo de auxiliar na organização e desenvolvimento bibliográfico de pesquisas.

Na etapa 4 foi feita uma leitura seletiva do material bibliográfico obtido. Esta leitura segundo Gil (2002) deve discernir as informações e dados que o material possui, relacionar as informações e dados obtidos com o problema apresentado no trabalho e verificar a consistência das informações e dados expostos pelos autores. O material que foi utilizado corresponde a publicações no período de 2002-2018 e continham informações que auxiliaram na obtenção dos resultados da pesquisa.

A etapa 5 consistiu em extrair dados do material selecionado referentes á aspectos técnicos, aplicabilidades, e produtividade das lajes em análise , tais que serviram de base para obtenção dos resultados a serem discutidos e analisados no trabalho.

Na etapa 6 foram estabelecidos os resultados da pesquisa, comparando as lajes protendidas e nervuradas em relação as variáveis propostas, a partir dos dados obtidos na pesquisa bibliográfica realizada. Por vezes houve a necessidade de mais informações para efetivar os resultados da pesquisa, sendo então realizadas novas buscas, além das que foram analisadas inicialmente, acrescentando-se então novas fontes. Com base nos dados obtidos na pesquisa e análise critica do autor foi então recomendada à solução mais vantajosa entre as lajes em estudo em função das variáveis que norteiam esta pesquisa.

No que diz respeito aos aspectos técnicos das lajes foram coletados dados correspondentes aos vãos livres alcançados entre os pilares da estrutura. Foram analisadas também informações quanto à relação das lajes em estudo com as vigas do projeto, observando-se a possibilidade da execução de lajes lisas (apoiadas diretamente nos pilares), com ou sem a utilização de capitéis, bem como seu efeito na estabilidade global da estrutura.

Em função da carência de indicadores de produtividade para a laje protendida moldadas no local nas bases mais frequentemente utilizadas para mensuração da produtividade na construção civil, TCPO - Tabela de Composição de Preços para Orçamentos e SINAPI- Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, para a realização da análise da produtividade foram utilizadas duas pesquisas realizadas em campo, uma delas empregando-se a laje nervurada e outra utilizando a laje protendida:

- Ramos (2014)

Trabalho realizado com o objetivo de analisar a produtividade na execução de uma obra de concreto armado com o emprego da laje nervurada. Os dados para a realização deste trabalho foram levantados durante 60 dias no período de abril a julho de 2014, realizando-se a contagem de pessoal em cada função, as horas gastas para o trabalho, juntamente com a leitura diária do trabalho finalizado.

- Linck (2013)

Trabalho realizado com o objetivo de descrever as vantagens e desvantagens no processo executivo de lajes lisas protendidas utilizando cordoalhas engraxadas em edificações residenciais. Para a coleta de dados da produtividade ofertada pela laje lisa protendida foi realizado o acompanhamento da sua execução, realizando o quantitativo de equipe e o levantamento dos seus indicadores de produtividade.

Para esta análise foram levantados os indicadores RUP (Razão Unitária de Produção) obtidos nos processos de armação e execução de fôrmas nas obras analisadas. O RUP de acordo com Souza (2004) é um indicador que consiste na quantificação da mão-de-obra necessária (expressa em homens-hora demandados) para se produzir determinada unidade de saída em estudo, podendo ser calculado pela seguinte expressão:

$$\text{RUP} = \text{Entradas/Saídas}$$

Além disto, com o material obtido, foram descritos os processos de execução das lajes nervuradas e protendidas, ambas moldadas no local. Dessa forma foram abordadas as vantagens e desvantagens apresentadas pelas lajes em relação aos seus processos executivos, bem como o efeito destas no andamento ou cronograma da obra.

Quanto á aplicabilidade das lajes nervuradas e protendidas foram analisados as suas possíveis utilizações em diferentes tipos de obras. Foram levantados também dados que possam levar a identificação de restrições ao uso das lajes em estudo.

Por fim, na etapa 7 foram então realizadas as conclusões e considerações finais do trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A crescente procura por tecnologias com capacidade de vencer grandes vãos, estimulou o concepção de soluções que permitissem esta condição. Foram desenvolvidas entre estas soluções lajes que exigissem uma quantidade menor de vigas e pilares para sua sustentação.

Diante das opções disponíveis em mercado, torna-se interessante que seja feita uma análise dos diversos fatores que influenciam o projeto, execução e utilização do empreendimento.

Neste capítulo, estão apresentados e discutidos os resultados que foram obtidos durante a realização da pesquisa bibliográfica que norteou este estudo.

4.1 PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS DAS LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS

Neste item são apresentadas com base em bibliografias já desenvolvidas as etapas de construção de lajes nervuradas e protendidas moldadas in loco. A partir dos resultados obtidos para o desenvolvimento deste item, serão também discutidas as vantagens e desvantagens que os sistemas oferecem.

4.1.1 Execução de lajes nervuradas

Bocchi e Giongo (2007) divide a construção de uma laje nervurada em concreto armado em seis etapas e especifica para cada fase alguns cuidados a serem tomados.

4.1.1.1 Fôrmas

De acordo com Lopes (2015), a primeira etapa para a construção de uma laje nervurada consiste na colocação das fôrmas e enchimentos. Madeira compensada, chapas de aço e poliestireno expandido são alguns dos materiais utilizados como fôrmas para as lajes nervuradas. Os cimbramentos nos quais serão sustentadas as plataformas deverão estar contraventados de forma correta e assentados em base firme, que pode ser o contrapiso de pavimento térreo ou a laje de um andar inferior, para que então os blocos possam ser assentados sobre estas plataformas.

Como nos demais elementos estruturais executados com concreto armado, as fôrmas são utilizadas para dar forma a peça e garantir sustentação até que o concreto alcance a resistência necessária para se auto suportar. Sendo que o material a ser utilizado irá depender

do tamanho e planejamento da obra, além de mão de obra e recurso financeiro a ser empregado.

No caso de edifícios de múltiplos pavimentos, a moldagem das lajes de um determinado pavimento deve proceder quando o andar inferior dispor de condições favoráveis de resistência às ações de construção, ou seja, peso próprio do escoramento e das fôrmas, peso próprio do concreto fresco, ações de pessoas e equipamentos.

Nas lajes nervuradas as fôrmas são responsáveis pela moldagem da laje, de forma a torná-la mais leve do que o modelo convencional, fazendo com que a parte tracionada da laje seja ocupada blocos de materiais leves (figura 13), substituindo o volume que seria ocupado pelo concreto. Neste caso, os blocos utilizados são perdidos, pois permanecem incorporados a laje após a concretagem.

Figura 13 – Execução de laje nervurada com blocos EPS



Fonte: ISOMAF (2018).

As fôrmas podem consistir ainda em cubetas plásticas, como representado na figura 14, que permitem dispensar o concreto na zona tracionada, neste caso as fôrmas podem ser reutilizadas, pois são removidas após o prazo determinado de cura do concreto. Essa possibilidade de reutilização faz com que esta opção se torne mais sustentável em relação ao uso de materiais inertes.

Figura 14 – Execução de laje nervurada com cubetas plásticas



Fonte: Grupo Orguel (2018).

As fôrmas são dispostas sobre plataformas de madeira compensada ou metálicas, que são sustentadas pelo sistema de cimbramento, obedecendo aos espaçamentos previstos em projeto. Quando se opta pela utilização de materiais leves, deve-se ter cautela na movimentação das peças, pois podem ser danificadas.

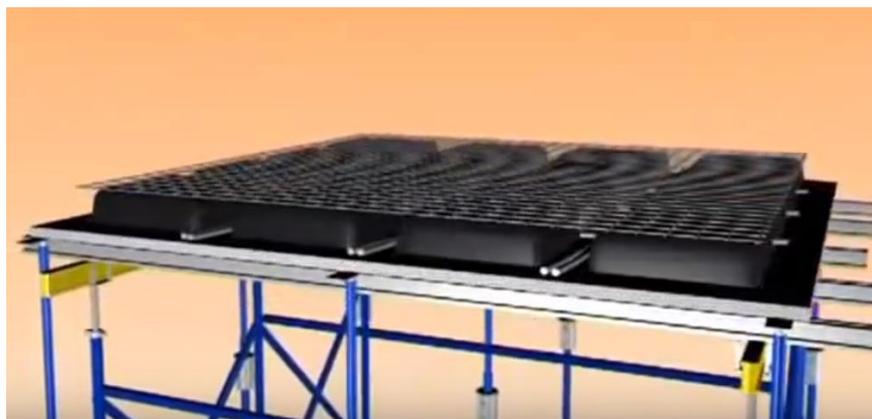
Araújo (2007) explica ainda que depois do nivelamento e antecedendo a concretagem, deve-se aplicar desmol sobre a superfície das cubetas. Isso é feito com o objetivo de evitar que a peça moldada tenha aderência, facilitando a retirada das peças quando o concreto estiver seco.

De acordo com o que é explicado por Bocchi e Giongo (2007) percebemos que a execução de fôrmas de laje nervurada é realizada de forma diferente de uma laje convencional. Esse procedimento é o que garante a característica básica desse sistema, garantindo a redução do volume de concreto e conseqüentemente do seu peso próprio.

4.1.1.2 Armaduras

Após a execução das fôrmas, são colocadas as armaduras nas nervuras (Figura 15), bem como os espaçadores que irão garantir o cobrimento necessário á proteção adequada da peça á corrosão. Quando forem utilizados estribos, estes precisam ser fixados com o espaçamento previsto por meio de espaçadores de argamassa moldados na obra ou plásticos impedindo, dessa forma, que estes saiam da posição quando da concretagem da laje. A armadura da mesa, que resiste aos esforços de flexão aos quais a superfície da mesa será sujeita, precisa ser posicionada sobre os blocos ou cubetas, com os espaçamentos e cobrimentos conforme o projeto.

Figura 15 – Armaduras de laje nervurada



Fonte: ATEX (2011)

Diante disso, percebemos que a colocação da armação na laje não apresenta maiores complicações. O posicionamento da armadura é, inclusive, orientado pela posição das nervuras.

É importante lembrar que de acordo com Pinheiro e Razente (2007), as lajes nervuradas podem ser unidirecionais ou bidirecionais. E isso vai depender diretamente do posicionamento das armaduras, visto que, quando armadas em uma só direção serão unidirecionais e quando armadas em duas direções são denominadas bidirecionais.

4.1.1.3 Preparação e lançamento do concreto

Após a fixação das fôrmas é realizada a concretagem, iniciando-se pelo preenchimento das nervuras facilitando a verificação dos espaços onde ocorrerá a vibração. Recomenda-se que nesse estágio o concreto não esteja muito fluido, pois o concreto fluido pode causar fissuras na mesa superior (TECHNE, 2017).

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) para estruturas de concreto armado precisa ser, no mínimo igual a 20MPa. Para lajes nervuradas aplica-se a mesma recomendação.

È recomendado que a concretagem de uma laje nervurada, seja realizada de uma só vez, evitando-se dessa forma juntas de concretagem. Se não for possível que isso seja feito, é necessário garantir a ligação entre o concreto endurecido e o novo, retirando a nata do concreto endurecido e fazer a limpeza do local antes da nova concretagem.

Bocchi e Júnior (2007) explica que o lançamento do concreto ocorre logo após o amassamento, não sendo permitido entre o fim deste e o lançamento intervalo superior a uma hora, sendo que este prazo deve ser contado a partir do fim da agitação na betoneira ao pé da

obra. O uso de retardadores de pega faz com que se possa dilatar este prazo, de acordo com as propriedades do aditivo e as recomendações do fabricante. A concretagem de uma laje nervurada, sempre que possível, é para ser feita de uma única vez, evitando-se as juntas de concretagem. As juntas de concretagem devem localizar-se em regiões onde as tensões de cisalhamento são menores.

Em relação ao preparo e lançamento do concreto as lajes nervuradas não se diferem muito das lajes maciças convencionais. Isso se torna uma vantagem do sistema, visto que a mão de obra é facilitada, exigindo cuidados semelhantes. No entanto é preciso no momento da concretagem de laje nervurada com material inerte ter atenção quanto à fragilidade dos blocos e garantir seu posicionamento.

4.1.1.4 Adensamento do concreto

Bocchi e Júnior (2007) afirma que, para garantir uma maior homogeneidade e reduzir o número de vazios, é sempre necessária a vibração do concreto na laje nervurada, preferencialmente de formas mecânica, ou seja, com uso de vibradores de imersão. Os vibradores deverão ser manuseados por operários capacitados. Dessa forma garante-se a resistência prevista em projeto.

O adensamento da laje nervurada é realizado somente na região onde as quatro nervuras se cruzam, para isso utiliza-se um vibrador de imersão com diâmetro máximo de 25mm. (TECHNE, 2017).

A NBR 14931 (ABNT, 2004) recomenda que ao utilizar vibradores de imersão, a espessura da camada deve ser aproximadamente igual a 75% do comprimento da agulha e que ao vibrar uma camada de concreto, o vibrador deve penetrar cerca de 10 cm na camada anterior. A norma ressalta ainda que deve-se ter cautela pois tanto a falta como o excesso de vibração são prejudiciais ao concreto.

4.1.1.5 Cura do concreto

Para garantir a qualidade do concreto, após a concretagem e adensamento, é preciso protegê-lo de intempéries, choques ou vibrações que possam causar danos a massa do concreto ou prejudicar a aderência em relação às armaduras.

Bocchi e Júnior (2007) ressalta ainda que devido a perda de água do concreto por evaporação do ambiente, é necessário manter o concreto sempre umedecido durante o período de cura para que a reação química de endurecimento do concreto ocorra de maneira completa. Além disso, pode-se também proteger a superfície umedecida do concreto com uma película

impermeável, evitando assim a evaporação. De toda forma é preciso evitar a secagem prematura, no mínimo nos sete primeiros dias após o lançamento do concreto, aumentando-se este quando a natureza do cimento assim exigir.

4.1.1.6 Retirada das fôrmas e dos escoramentos

As fôrmas e escoramentos devem ser retirados quando o concreto estiver em estado suficientemente endurecido para resistir aos esforços atuantes na laje. Além de garantir que ele também esteja em um estado de endurecimento suficiente para que devido a estes esforços não venha a sofrer deformações inaceitáveis, pois o concreto nas primeiras idades possui pequeno módulo de deformação.

Silva (2005), explica que a remoção do escoramento deve obedecer ao funcionamento estrutural do painel da laje. Dessa forma, nos painéis onde as nervuras trabalham simplesmente a apoiadas, as escoras deveram ser retiradas primeiramente do centro e depois das extremidades do vão. Em edifícios que contenham múltiplos pavimentos, o escoramento do piso inferior deve ser retirado após o término da execução da laje imediatamente superior. É aconselhado que a retirada do escoramento ocorra após ao menos quatorze dias depois da concretagem da laje. Quando opta-se pelo emprego de fôrmas de polipropileno, Silva (2005) diz que a retirada é realizada com rapidez, segurança e praticidade, podendo ser feita de forma manual dispensando a utilização de ar comprimido. Araújo (2008), porém afirma que a utilização do ar comprimido pode facilitar a retirada das fôrmas e recomenda ainda que devem ser utilizada cunha de madeira e martelo de borracha, pois outras maneiras podem danificar ou até mesmo inutilizar as peças.

Se pode notar que a retirada do escoramento da laje nervurada obedece ao procedimento de lajes maciças convencionais e o cuidado maior deve ser na retirada correta das escoras. Quanto à retirada das fôrmas é preciso ter cautela para não danificar as peças, no entanto quando utilizado o sistema com blocos leves este serviço se torna ainda mais simples, pois dessa forma será necessário retirar apenas a superfície onde os blocos estavam apoiados.

4.1.2 Execução de lajes protendidas

A NBR 14931 (ABNT, 2004) traz em seus anexos os procedimentos referentes à execução de lajes protendidas com e sem aderência. Para apresentar os resultados obtidos referentes ao procedimento de construção das lajes protendidas, e auxiliar na fundamentação e discussão destes, serão utilizados também outras fontes. Ambas as formas de protensão (com e sem aderência) de lajes serão abordadas e discutidas no presente trabalho.

4.1.2.1 Execução de lajes Protendidas com aderência

Com todo o sistema de fôrma e escoramento concluído, devendo este estar apto a receber o peso próprio e de serviço da laje, bem como deformações e rotações previstas das estruturas, realiza-se a instalação dos cabos de protensão. Este procedimento, bem como seus detalhes, deve ser definido dependendo do sistema de protensão empregado, do tipo de obra e também da decisão do contratante e projetista. (NBR 14931 ABNT, 2004).

É necessário que se tenha cautela durante o posicionamento das bainhas na fôrma (Figura 16) assegurando a sua colocação nas posições indicadas no projeto, bem como a sua permanência nestas posições durante a concretagem.

Figura 16 – Posicionamento de cabos de protensão aderente



Fonte: Impacto (2018)

A NBR 14931 (ABNT, 2004) destaca ainda alguns cuidados que devem ser tomados neste procedimento:

- a) locar as bainhas em relação à fôrma, conforme o projeto;
- b) fixar as bainhas em suas posições utilizando de travessas fixadas às armaduras passivas, ou através do uso de suportes independentes especiais quando necessário;
- c) verificar se os estribos ou os suportes são capazes de suportar as bainhas e os cabos sem que ocorram deformações como flambagens;
- d) verificar se os pontos onde se dá o suporte apresentam uma superfície apropriada de contato com as bainhas, evitando mossas ou outros danos. Além disso, precisam também possibilitar fixação prevenindo possíveis deslocamentos horizontais ou verticais;

e) travar as ancoragens fixadas à fôrma, de maneira a não permitir deslocamentos durante os trabalhos subsequentes ou penetrações de argamassa no interior das bainhas;

f) o trecho da bainha próximo à ancoragem deve ter seu posicionamento rigorosamente assegurado.

Após o posicionamento dos cabos a deve-se inspecionar as condições dos cabos e todos os defeitos que eventualmente forem encontrados devem ser reparados. Todo trecho de bainha deformada transversalmente deve ser substituído e as bainhas perfuradas devem ser estancadas. Os danos que possivelmente podem ser causados aos cabos são uma desvantagem desse sistema, visto que isto consome tempo do cronograma e pode agregar custo com reparo.

Realizada a inspeção inicia-se o processo de concretagem sendo que o concreto deve ter trabalhabilidade e diâmetro máximo do agregado compatíveis com o espaçamento de bainhas, ancoragens e armaduras passivas. Em alguns casos é preciso um traço de concreto de igual resistência e de características especiais, para ser utilizado nas regiões de maior concentração de armaduras. Além disso, a equipe que irá executar a concretagem deverá ter conhecimento de onde devem ser introduzidos os vibradores, para que as bainhas, respiros e tubos não venham a ser danificados. O diâmetro dos vibradores deverá ser compatível com os espaçamentos entre a fôrma e as bainhas (NBR 14931:2004).

Emerick (2002) explica ainda que no sistema aderente deve se ter um cuidado a mais em relação aos purgadores no momento da concretagem, que consiste na vedação e fixação das mangueiras.

Concluída a concretagem deve-se proceder a operação da protensão, sendo que primeiramente todos os equipamentos e cordoalhas deverão ser dispostos para a realização desta etapa. Instalam-se então os macacos de protensão, ajustados na superfície de apoio da ancoragem, fazendo com que os elementos componentes do cabo não sejam tensionados de forma diferente (NBR 14931:2004).

De acordo com Emerick (2002) o manuseio incorreto do equipamento de protensão poderá danificá-lo e causar acidentes de trabalho. Diante disso, a utilização destes equipamentos deve se restringir ao pessoal treinado. O posicionamento do macaco deverá ser realizado sem carga na cordoalha que será tracionada, devendo ser assentada sobre a ancoragem, caso haja alguma falha no posicionamento o macaco deve ser retirado e recolocado. Além disso, para evitar acidente em função do mau funcionamento de algum equipamento, não se deve permitir que alguém venha a ficar na frente da cordoalha a ser tracionada ou ainda entre o macaco e a bomba.

As cordoalhas ou fios componentes do cabo ligados às ancoragens ativas e passivas deverão ser marcados com o objetivo de identificar possíveis deslizamentos diferenciais. Deve ser feita ainda uma marcação com tinta spray, a uma distância fixa da face do concreto, que será utilizada como referência para medir o alongamento do cabo (EMERICK, 2002).

A protensão dos cabos deve ser monitorada, portanto deve ser elaborada uma planilha de protensão para cada cabo, onde deve constar minimamente o elemento da estrutura, número do cabo, tipo do cabo, tipo de equipamento a ser utilizado para protensão, pressão manométrica teórica a aplicar, alongamento teórico total previsto e pressões manométricas parciais (NBR 14931:2004).

A norma recomenda ainda que a injeção da nata de cimento deve ser realizada o mais rápido possível após a protensão, não devendo exceder o prazo de 15 dias da protensão dos cabos. Schmid (2009), no entanto recomenda que esta injeção ocorra depois da cura do concreto. Antes da realização da injeção os cabos precisam ser lavados e a injeção deve prosseguir até que a água que sai pelos respiros esteja perfeitamente limpa.

Depois de realizada a injeção, se deve proteger as peças de esforços ou vibrações que possam vir a afetar a integridade da calda. Quando não for possível se comprovar por meio de ensaios a garantia desta integridade, deve ser exigida uma resistência mínima da calda de 10 MPa, por ocasião da aplicação desses esforços ou vibrações.

A injeção da nata de cimento agrega algumas vantagens ao uso de lajes protendidas, pois apresenta uma maior segurança em relação ao fogo devido a esta proteção. Além disso, a aderência da cordoalha com o concreto garante à estrutura redução na taxa de armadura frouxa necessária à solução não aderente (SCHMID, 2009).

Após a protensão, o aço deve proceder ao corte do aço e a vedação de todas as aberturas das peças componentes da ancoragem, do seu contato com a estrutura e com o aço de protensão.

4.1.2.2 Execução de lajes Protendidas sem aderência

Quanto ao procedimento de fôrmas e escoramentos, as lajes protendidas sem aderência seguem o mesmo procedimento das com aderência, bem como a decisão de como será feita a instalação dos cabos.

A sequência de construção de acordo com Cauduro (2002) consiste em primeiramente, conforme mostrado na Figura 17, erguer as fôrmas colocar os cabos de pós-tração ainda não tensionados na fôrma em seus devidos lugares. A armadura comum aderente também é

posicionada nos locais especificados e todo o aço é seguramente amarrado na posição definida pelo engenheiro estrutural.

Figura 17 – Posicionamento dos cabos de protensão



Fonte: Cauduro (2002)

Os cabos devem ser locados em relação à fôrma conforme o que é pedido no projeto e fixados em suas posições com uso de travessas ou suportes (cadeirinhas). O espaçamento destes suportes deve suportar as cargas provenientes da montagem dos cabos e concretagem, e ainda impedir deslocamentos (NBR 14931:2004).

As ancoragens devem então ser fixadas de forma a não possibilitar deslocamentos durante os trabalhos que serão executados posteriormente ou durante as penetrações de argamassa dentro dos cabos. Os trechos próximos á ancoragem deve ter seu posicionamento perfeitamente assegurado.

Realiza-se então o lançamento do concreto na fôrma (Figura 18) e aguarda até que ele alcance o grau de endurecimento necessário para efetuar a protensão dos cabos (por exemplo, o concreto é lançado na sexta-feira e protendido na segunda-feira).

Figura 18 – Concretagem de laje protendida



Fonte: Cauduro (2002)

Com um macaco hidráulico apoiado diretamente na placa de ancoragem, o aço de protensão é tensionado e a força no aço é transferida para o concreto pelos dispositivos de ancoragem nas extremidades do elemento estrutural. Na utilização de cordoalhas engraxadas, a protensão pode ser realizada através de equipamentos leves e facilmente aplicada em obras de pequeno porte, o macaco hidráulico de dois pistões engenhoso e leve (19 kg), pode ser instalado e protender em qualquer parte do comprimento do cabo, tensionando uma cordoalha de cada vez a cada 30 segundos, além disso, neste sistema utiliza-se bomba hidráulica que é pequena (35 kg) e fácil de ser transportada (CAUDURO, 2002).

Quanto ao sistema de escoramento e os dias para retirada das escoras estes deverão ser discutidos com o projetista, preferencialmente especificando o módulo de elasticidade mínimo e o número de pavimentos que deverão ser mantidos escorados (EMERICK, 2002).

Nota-se que o sistema cordoalhas engraxadas tem um processo construtivo facilitado em relação ao sistema com aderência. Ainda sim, ambas possuem uma execução mais trabalhosa em comparação ao sistema convencional, exigindo uma mão de obra qualificada e um controle rígido de qualidade em cada etapa de sua construção.

4.2 INDICADORES DE PRODUTIVIDADE EM LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS

Neste item estão abordadas as propriedades das lajes nervuradas e protendidas em relação às vantagens e desvantagens que estes sistemas ofertam. São apresentados também os indicadores de RUP obtidos para estas lajes nos estudos de Ramos (2014) e Linck (2013). Foram levantados para melhor embasar o estudo dados auxiliares no SINAPI e na pesquisa realizada por Scheibler (2010).

4.2.1 Análise de produtividade de lajes nervuradas

Com a exigência cada vez maior no que diz respeito à eficiência nas construções de edificações, a observância da produtividade é de suma importância. Em relação aos processos de execução a laje nervurada apresenta algumas vantagens em relação às demais. Dentre as quais, Spohr (2008) aponta a possibilidade de embutir as vigas na própria laje, o que evita recortes e proporciona uma maior agilidade ao serviço de montagem das fôrmas. Além disso, o processo pode ser acelerado com o uso de fôrmas industrializadas, alcançando um ciclo médio de execução de sete dias por pavimentos de aproximadamente 450,00 m².

As lajes nervuradas no local se destacam pela alta produtividade gerada em seus processos executivos. Araújo (2008) justifica que este fato ocorre em função da combinação

de diversos aspectos, dentre os quais pode ser citada a agilidade na montagem e desmontagem, pois não exige a utilização de pregos para sua fixação, reduzindo desta forma a quantidade de componentes para sua instalação.

Outra vantagem das lajes nervuradas em relação à produtividade consiste na possibilidade de execução de tubulações após a laje estar concluída. Isso porque normalmente as tubulações são instaladas de forma externa nas nervuras inferiores das lajes. Neste caso durante a execução da laje não é necessário que as instalações estejam prontas para que seja realizada a concretagem do pavimento. Assim as equipes tem a capacidade de trabalharem de forma independente no pavimento, isso possibilita que o ciclo seguinte transcorra normalmente e proporciona uma redução de mão de obra junta (FARIA, 2010).

Ramos (2014) analisou a produtividade em uma obra utilizando laje nervurada com blocos EPS e pode perceber que os serviços de fôrmas e armadura são os que têm maior impacto para o desempenho da obra. Isso se deve ao fato de que a produtividade de um carpinteiro, por exemplo, deve-se quase exclusivamente do esforço do trabalhador, assim uma mão de obra especializada, pode agregar maior rapidez e eficiência na realização do serviço.

De acordo com Ramos (2014), para o serviço de execução de fôrmas é adequado avaliar isoladamente os diferentes elementos que compõe a estrutura (pilares, vigas e laje), pois estes elementos possuem suas características próprias de montagem e materiais utilizados. Alguns fatores podem influenciar a produtividade final nestes serviços descritos até o momento, tais como a mão de obra utilizada (entrosamento na equipe gera altas produtividades), as formas dos elementos (caso existam elementos com formas variadas, ou seja não exista repetição na geometria das peças, influenciando negativamente na produtividade), pé direito (quanto maior o pé direito da construção, mais esforço será produzido para se executar um mesmo serviço), material utilizado (quando há o uso de materiais de boa qualidade, este acaba implicando em um uso menor de travamentos e desperdício de material e mão de obra) e equipamentos para nivelamento da laje (utilização de equipamentos digitais, no caso nível a laser, este que diminui e muito o tempo necessário para o nivelamento do assoalho de uma laje).

Araújo (2007) explica que o aluguel das cabaças é a etapa mais longa do processo, sendo que esse gargalo acontece na construção da primeira laje, visto que quando se iniciar a próxima, as cabaças já estarão na obra, e o tempo de espera não existirá mais, diminuindo o tempo de execução total.

No estudo realizado por Ramos (2014) mensurou-se primeiramente a produtividade no serviço de execução de fôrmas, armação e concretagem de uma estrutura de concreto armado.

O estudo foi realizado em uma edificação na cidade de Florianópolis, que no período da realização do trabalho encontrava-se em construção. No seu estudo o autor quantificou e analisou a produtividade ofertada através da Razão Unitária de Produção.

O primeiro serviço a ser analisado foi a execução de fôrmas, tanto da laje como demais elementos da estrutura. Para a execução da laje foi consumido um total de 694,18m² de área de fôrma. Para a mensuração da produtividade para as fôrmas foi utilizada a RUP diária sendo esta medida por pavimento. Os resultados obtidos para este serviço estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – RUP diária de fôrma para laje nervurada

Pavimento	RUP diária (H.h/m ²)
2°	0,46
3°	0,49
4°	0,47

Fonte : Adaptado de Ramos (2014)

Na sequencia foi mensurada a produtividade ofertada no serviço de armação da laje nervurada. Para a execução da laje da edificação analisada foram empregados 10.102Kg de aço. Para a mensuração da produtividade da armação foi escolhida a RUP cíclica, ou seja, medida de acordo com o ciclo completo de produção, sendo esta medida em cada pavimento. As RUP's mensuradas para o serviço de armação da laje nervurada estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – RUP cíclica de armação para laje nervurada

Pavimento	RUP cíclica (H.h/Kg)
2°	0,013
3°	0,015
4°	0,0158

Fonte : Adaptado de Ramos (2014)

Posteriormente foi mensurada a produtividade da concretagem dos elementos, no entanto, diferentemente dos demais serviços a concretagem foi medida de forma conjunta (pilares, vigas e lajes). Obteve-se no estudo uma mediana de 2,00 H.h/m³, sendo que esta foi obtida pela média de cada pavimento. Assim, não foi possível com este estudo obter os indicadores de produtividade da laje nervurada de forma isolada.

No SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) foi possível encontrar em seu caderno técnico os coeficientes de mão de obra referentes a montagem e desmontagem de fôrmas de laje nervurada com cubetas que possuam área maior que 20 m². Sendo que este serviço demanda 1,21 horas por metro quadrado para carpinteiro e 0,22 horas por metro quadrado para ajudante.

4.2.2 Análise de produtividade de lajes protendidas

Na construção de lajes protendidas, a utilização da protensão com aderência agrega algumas vantagens ao sistema. A colocação das cordoalhas na estrutura é facilitada pelo fato de cada bainha comportar até quatro delas em um mesmo cabo. Apesar da necessidade de injeção da nata de cimento na bainha, esta etapa não retarda o cronograma da obra, podendo ser executada juntamente com os demais processos executivo da laje (SCHMID, 2009).

Loureiro (2006) explica que nas lajes protendidas sem aderência com monocordoalhas engraxadas e plastificadas, a etapa de injeção e a utilização de bainhas é dispensada, agilizando o manuseio das monocordoalhas. Além disso, a fixação das ancoragens nesse sistema é dada de forma mais simples e com baixo peso, garantindo uma maior rapidez na execução da estrutura.

Quando se opta por executar lajes lisas protendida obtêm-se uma melhoria no que diz respeito à produtividade. Isso ocorre, segundo Barbán (2008), devido à facilidade na execução das fôrmas, facilidade na colocação das armaduras, instalação de tubulações e maior praticidade durante a concretagem. Esses fatores acarretam um menor tempo de execução da obra, tornando-a mais econômica em comparação ao sistema com vigas.

Em uma avaliação do processo executivo de uma laje lisa protendida com cordoalhas engraxadas, realizada por Linck (2013), na cidade de Porto Alegre em uma edificação de 17 pavimentos, notou-se que a laje se destaca quanto ao consumo de materiais, no que diz respeito a fôrmas e armaduras. Porém foi observado que existe dificuldade na colocação das cordoalhas na laje, o que impactou negativamente a produtividade da laje, além de atrasos nos ciclos observados in loco devido aos serviços como a protensão e à manutenção de equipamentos.

A laje analisada na pesquisa de Linck (2013) possuía 537m², e para ser executada empregou um total de 580m² de fôrma. O sistema de fôrmas foi utilizado o sistema conhecido como mesas voadoras, que são estruturas metálicas com a função de escoramento e fôrma da laje. Em sua análise a autora optou pela utilização da RUP cíclica para a mensuração da produtividade no serviço de fôrmas obtendo como resultado uma RUP de 0,39 H.h/m².

Na laje foi utilizado um total de 3355 Kg de aço CA-50 e 2063 Kg de cordoalhas engraxadas para execução de sua armadura. Para mensurar a produtividade do serviço de armação a autora optou por utilizar a RUP cíclica obtendo um indicador de 0,044 H.h/Kg.

Linck (2013) não determinou os indicadores de produtividade da laje protendida para sua concretagem, porém estabeleceu uma RUP cíclica geral, ou seja, para a execução de toda a laje, obtendo um indicador de 2,49 H.h/m².

Scheibler (2010), acompanhou ainda a execução de uma laje plana protendida com cordoalhas engraxadas localizada no Rio Grande do Sul, o edifício possuindo 17 pavimentos tipo com 420m². Este por sua vez obteve para o serviço de armação uma RUP cíclica de 0,043 H.h/Kg e para o serviço de fôrmas uma RUP de 0,832 H.h/m².

4.3 APLICABILIDADES DE LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS

Neste item, são abordadas as aplicações possíveis das lajes nervuradas em concreto armado e lajes protendidas, em obras de pequeno, médio e grande porte.

4.3.1 Aplicabilidades de lajes nervuradas

As lajes nervuradas tem ganhado bastante espaço no mercado, um dos motivos é a versatilidade deste sistema. De acordo com Spohr (2008) as lajes nervuradas podem ser utilizadas em qualquer tipo de estrutura, como por exemplo: prédios comerciais, edificações residenciais, garagens, instituições de ensino, edificações com finalidade hospitalar, shoppings centers, hotelaria. No entanto, para Barboza (2008) algumas a utilização deste sistema acarreta dificuldades no que diz respeito à compatibilização dele com os demais projetos, tais como elétrico e telefônico. Esse problema ocorre em função necessidade da instalação dos dutos nas nervuras, pois não devem ser instalados na mesa devido à redução da sua seção. A NBR 6118 (ABNT, 2014) prevê este aumento em suas recomendações para o dimensionamento de lajes nervuradas. Na ausência de tubulações horizontais embutidas a espessura da mesa deverá ser superior ou igual a 1/15 da distância entre as faces da nervura e no mínimo 4cm. Porém quando houver tubulações embutidas na mesa com diâmetro menor ou igual a 10mm essa espessura deverá ser no mínimo 5cm, e quando esse diâmetro ultrapassar 10mm a espessura mínima se dá pela adição de 4cm mais o valor do diâmetro ou ainda 4cm mais duas vezes o valor do diâmetro quando essas tubulações se cruzarem.

Graff (2015) acrescenta ainda que as lajes nervuradas podem solicitar alturas maiores em cada pavimento, influenciando diretamente no pé direito da edificação. Com isso no caso de pisos inferiores, o volume de escavação será maior se for solicitado manter a distância piso

a piso que seria utilizando o sistema convencional, e no caso de pavimentos da torre será necessário aumentar o gabarito da edificação (TECHNE, 2017). Dessa forma, o engenheiro projetista juntamente com arquiteto e contratante deverão avaliar as possíveis soluções para manter o pé direito proposto ou reduzi-lo em função do acréscimo ocasionado pelo sistema.

Pinheiro e Razente (2007) recomendam que as lajes nervuradas sejam evitadas nas situações de balanços e engastes (marquises, sacadas), pelo fato de que, nesses casos, a face inferior da laje, onde o volume de concreto é reduzido, sofrerá esforços de compressão. O autor sugere duas soluções para o emprego da laje nervurada em circunstâncias onde o engastamento for indispensável: limitar o momento fletor ao valor equivalente da resistência a compressão ofertado pela nervura e a utilização de lajes do tipo duplas.

Quando opta-se pela utilização dos blocos de EPS, deve analisar se a obra comporta espaço para armazenamento deste material. Pois de acordo com Faria (2010), em prédios com vários andares, por exemplo, estes blocos não são reutilizados em cada pavimento, pois permanecem incorporados a laje, gerando dessa forma um estoque fixo por pavimento até que sejam instalados. No caso lajes executadas com a utilização das cubetas, também deve haver esta preocupação, afinal irão ocupar um espaço considerável no canteiro até sua utilização (Figura 19), no entanto este estoque não é fixo, pois elas não ficam incorporadas as lajes, são reutilizadas em cada pavimento e geralmente são alugadas por certo período de tempo.

Figura 19 – Estoque de cubetas de pavimento em execução.



Fonte: Arquivo pessoal (2018)

É necessário ainda que o custo locação destas cubetas seja bem estudado, pois uma vez que ocorra atraso no cronograma, este pode inviabilizar o sistema. O uso das lajes executadas com cubetas possui ainda reprovação por parte de alguns arquitetos, isso pelo fato da não linearidade da face inferior da laje, acarretando a necessidade de forros para obter uma superfície lisa (SILVA, 2002). O custo a mais do forro deve ser comparado em relação a economia que a redução do concreto que este sistema proporciona.

É importante ressaltar ainda que o sistema de lajes nervuradas exige mão de obra especializada para que a produtividade e custo do sistema não sejam prejudicados (FARIA, 2010). Dessa forma, podem ocorrer situações em que não exista equipe treinada para a execução na região onde a obra será executada, devendo então ser considerada a necessidade de contratar mão de obra de outra localidade, acrescentando dessa forma o custo final da obra.

Nota-se que não foi mencionada a aplicação de lajes nervuradas em obras de grande porte, como por exemplo, pontes e barragens. No caso das barragens, Pacheco et. al.(2003) explica que as lajes utilizadas em barragens tem uma função impermeabilização, necessitando muitas vezes de grandes espessuras para que ela desempenhe essa função. Como nas lajes nervuradas temos como principio a redução do volume de concreto, esse sistema não garantiria a estanqueidade exigida para a barragem.

Quanto às pontes Stucchi (2003), explica que pode se ter a aplicação de laje nervurada do tipo duplas. Neste caso, refere-se a lajes tipo caixão perdido onde se tem uma mesa inferior e outra superior. A parte interna, entre as mesas, permanece vazada reduzindo o volume de concreto empregado.

É possível notar que a laje nervurada é um sistema utilizado e bem aceito em obras da construção civil, tais como prédios e residências. No entanto o sistema tem pouco uso em obras de grande porte, isso deve ao fato de que a configuração implicar na redução do volume de concreto, o que pode ser uma desvantagem para alguns tipos de obra.

4.3.2 Aplicabilidade de lajes protendidas

Diante das inúmeras vantagens ofertadas pelo sistema de lajes protendidas, sua utilização tem sido crescente no mercado. A possibilidade de executar projetos arquitetônicos dos mais tradicionais aos mais inovadores (Figura 20), em obras de grande, pequeno e médio porte é o que segundo a Rudloff (2012) explica o uso destas lajes mundialmente.

Figura 20 – Santuário Madre Paulina, Nova Trento - SC



Fonte: Rudloff (2012).

O crescimento do uso de laje protendida é frequentemente associado a obras de grande porte, no entanto esta tecnologia vem sendo empregada também em empreendimentos de pequeno porte. Cauduro (2002) explica que a utilização de cordoalhas engraxadas justifica essa abertura do mercado da construção de edifícios residenciais, pois esta é uma opção alternativa ao concreto armado agregando praticidade, agilidade e economia. Sendo que, edifícios com 3 a 5 metros de vãos, tornaram-se competitivos e de melhor qualidade executiva que o concreto armado.

Além disso, o uso de cordoalhas engraxadas possibilitou o uso de lajes protendidas em residências populares até edifícios com vários andares. As lajes protendidas também encontraram espaço na execução de pisos comerciais, industriais e de radiers para fundações. (CAUDURO, 2002). No caso de pisos, Loureiro (2006) aponta que as lajes protendidas apresentam como vantagem a possibilidade de executá-los com uma grande extensão (em torno de 72m) sem necessidade de juntas de dilatação como exemplificado na figura 21. Isso se deve a pré-compressão aplicada pela protensão, que evita a fissuração proveniente da retração do concreto. A redução na quantidade de juntas implica na facilidade de execução e manutenção da estrutura do piso, além da redução de trincas e manifestações patológicas.

Figura 21 – Piso com laje protendida



Fonte: PINI (2011).

Outra vantagem ofertada por este sistema trata-se da sua durabilidade em relação a ambientes agressivos como, por exemplo, regiões marítimas e indústrias com agentes químicos que podem atacar a estrutura. A ausência de fissuras nessas lajes e a utilização de concretos com maiores resistências, aliados a cobrimento adequado, tornam as lajes protendidas adequadas para os locais das classes de agressividade ambiental forte (marinha) e muito forte (respingos de maré), classificadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) como classe de agressividade ambiental III e IV (LOUREIRO, 2006).

Hupalo (2016) verificou em seu estudo que na ausência da força de protensão, a laje está submetida a tensões de flexão, possibilitando o aparecimento de fissuras no concreto. Com a aplicação de uma força de compressão longitudinal ao elemento, são eliminadas ou reduzidas as tensões de tração na seção propiciando uma maior capacidade de resistência e diminuição das fissuras.

Em edifícios de residências e comércios, a utilização das lajes lisas protendidas permite a diminuição o número de pilares, agregando dessa forma mais flexibilidade dos espaços na planta do projeto. Além disso, o uso de lajes protendidas pode reduzir de forma significativa a altura do edifício, já que exige uma menor altura de laje para resistir aos esforços aos quais é submetida (LOUREIRO, 2006). Essa vantagem garante um maior pé direito ao pavimento, podendo influenciar na altura total do empreendimento.

Uma das desvantagens apontadas na utilização das lajes protendidas, entende-se pelo fato de exigir um maior cuidado em relação a aberturas nas lajes após concretadas. A execução de aberturas ou chumbamento de peças deve ser evitada, pois se arrisca danificar ou

romper a cordoalha, perdendo conseqüentemente perda total da protensão no cabo (RUDLOFF, 2012).

Na escolha do sistema com protensão aderente nas lajes, deve se atentar a temperatura do local onde a obra será instalada. A operação de injeção da nata nas bainhas com tempo quente (temperatura ambiente maior que 30° C) deve ser realizada com cuidados especiais a fim de proporcionar uma maior vida útil da nata, reduzindo o índice de fluidez. Para facilitar esta execução faz-se necessário a utilização de aditivos, água em baixa temperatura e adição de gelo (EMERICK, 2002).

Pedrozo (2008) recomenda que seja evitado o posicionamento de pilares em bordos de lajes. Devem ser evitados também vãos isostáticos, pois neste caso a eficiência dos cabos de protensão sofre uma redução devido à falta de excentricidade geométrica na disposição do cabo.

De acordo com Cauduro (2002), desde que a protensão sem aderência (cordoalhas engraxadas) foi difundida no mercado brasileiro de construção, muitas empresas de protensão foram criadas em todos os estados do Brasil. A facilidade de execução que provoca esse interesse pode dar uma impressão equivocada de que qualquer pessoa habituada na área de construção pode executar sem maiores complicações uma obra de proteção. No entanto, a mão-de-obra envolvida deve ser treinada e orientada, fazendo-se necessário a presença de um profissional experiente dedicado exclusivamente à execução desta fase da obra.

De acordo com Castro (2011), as principais desvantagens para a aplicação dos sistemas com protensão referem-se á carência de mão de obra especializada, inviabilidade técnica ou financeira para alguns tipos de geometria e carência de projetistas e profissionais para cálculo estrutural.

O custo da aplicação de lajes protendidas deve ser avaliado principalmente em função das resistências a compressão do concreto empregadas no sistema de protensão (duas a três vezes maiores que as utilizadas no concreto armado), além dos aços utilizados nos cabos de protensão, que possuem resistência três a cinco vezes maiores às dos aços usuais do concreto armado (CASTRO, 2011). Dessa forma, o sentido econômico acarreta gastos a mais para a compra destes materiais, o que faz com que o contratante tenha uma rejeição no primeiro momento.

4.4 BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES TÉCNICAS DE LAJES NERVURADAS E PROTENDIDAS

Neste item são abordadas características das lajes nervuradas e protendidas em relação a vãos alcançados, influência na estabilidade global da estrutura e vinculações.

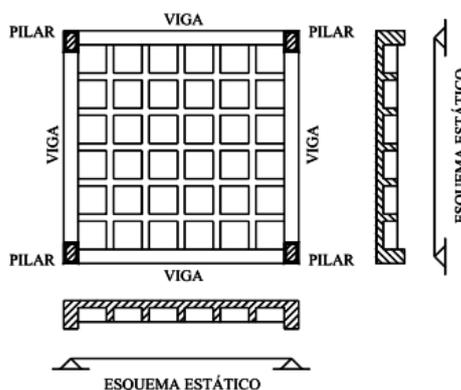
4.4.1 Benefícios e limitações técnicas de lajes nervuradas

De acordo com Araújo (2014), a redução do peso próprio da estrutura, devido à retirada do concreto, ou sua substituição por materiais leves não estruturais, na parte tracionada da laje, faz com que as lajes nervuradas sejam normalmente utilizadas para vencer vãos acima de 8 m. Isto torna possível a elaboração de projetos mais funcionais e com maior flexibilidade arquitetônica, dada a redução no número de pilares e vigas, podendo esta última ser dispensada com o uso de capitéis ou sendo a laje apoiada diretamente no pilar.

Para Viegas e Souza (2014 apud Barboza, 2008) as lajes nervuradas, devido ao alívio de carga, são recomendadas para vãos de 10 a 12 metros, podendo alcançar 15 metros em edifícios residenciais e comerciais. O autor afirma ainda que o sistema propicia um braço de alavanca maior (distância entre as resultantes das tensões de tração na armadura e compressão no concreto) que as lajes convencionais, fazendo com que possuam uma maior rigidez e suporte maiores esforços com um aproveitamento melhor de aço e concreto.

Quanto à vinculação de lajes nervuradas, Silva (2005) explica que as lajes nervuradas de concreto armado moldadas no local podem ser apoiadas em paredes de concreto ou de alvenaria estrutural, nas vigas ou diretamente em pilares. Quando apoiadas em paredes ou vigas, estas lajes podem ter bordas com apoios simples ou engastadas. A figura 22 mostra uma laje nervurada armada em duas direções com bordas simplesmente apoiadas.

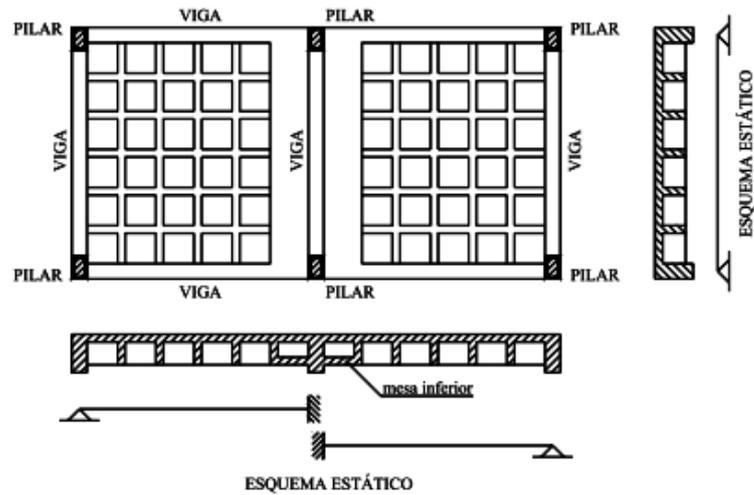
Figura 22 – Laje nervurada apoiada em vigas.



Fonte: Silva (2005)

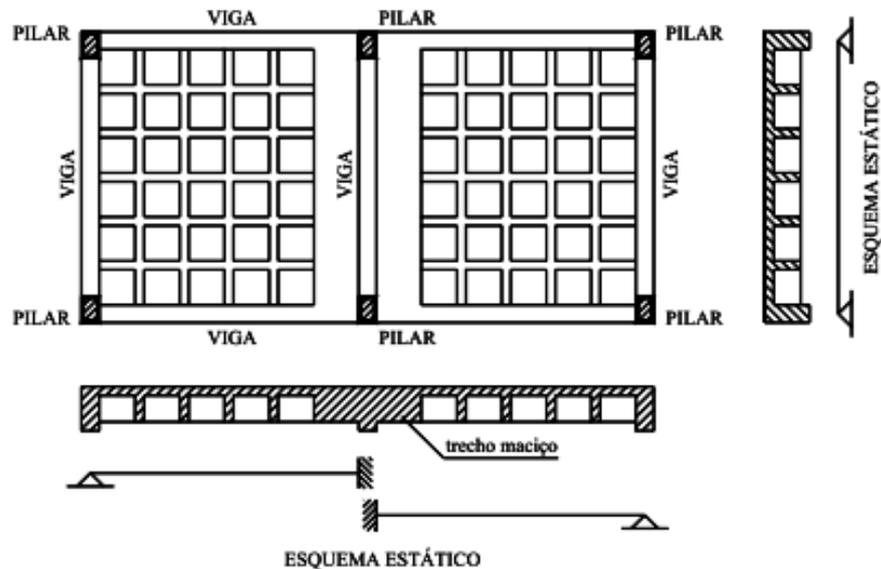
No entanto, para que uma laje nervurada seja considerada engastada no contorno pode ser preciso criar uma mesa de compressão inferior, para isso a concretagem ocorrerá em pelo menos duas etapas. Outra maneira de fazê-lo consiste em retirar, nas regiões do contorno, o material de enchimento, criando-se uma faixa maciça (Figura 23 e 24).

Figura 23 – Laje nervurada engastada com mesa inferior.



Fonte: Silva (2005)

Figura 24 – Laje nervurada engastada com trecho maciço.



Fonte: Silva (2005)

Apesar de conhecidos os benefícios da continuidade, como a redução dos momentos fletores positivos e dos deslocamentos transversais, esta pode em alguns casos agregar aumento do peso próprio da estrutura, do consumo de fôrmas, e de serviços a serem feitos. É

importante destacar, ainda, que no caso das lajes isoladas, ao engastá-las no contorno, surgirão momentos torsores nas vigas de apoio.

As lajes podem ainda ser dimensionadas de forma isolada, sendo que assim alguns critérios de execução devem ser avaliados. Silva (2005) aconselha que neste caso, por analisar como lajes isoladas e simplesmente apoiadas em seus contornos, dispensando criar a mesa de compressão na face inferior ou o segmento maciço, na região da face comum deve ser inserida uma armadura construtiva negativa, evitando fissuras na mesa de concreto.

No caso das lajes planas nervuradas com vigas, Henrichs (2003), explica que a laje é apoiada em vigas “chatas” (Figura 25), também denominadas vigas-faixa, que geralmente possuem armaduras bastantes “carregadas”, tanto no que se refere aos estribos quanto em armaduras longitudinais. Estas vigas exigem uma atenção especial á suas deformações, considerando que apresentam uma inércia reduzida em razão de sua pouca altura, que deve ser a mesma da laje. Porém o autor ressalta que, tais lajes propiciam maior rigidez no plano dos pavimentos da edificação, melhor travamento dos pilares, o que resulta em uma maior estabilidade global em comparação as lajes sem vigas.

Figura 25 – Laje plana nervurada com vigas: Universidade Mackenzie em São Paulo



Fonte: ATEX (2018).

Sacramento (2014), afirma que o uso de vigas-faixa tem sido bem aceito pelos projetistas, visto que proporcionam um único horizonte de fôrmas e escoramento, e ainda facilitam o embutimento de tubulações horizontais na face inferior da laje. O autor explica que em alguns casos é necessário o aumento da altura da viga-faixa com o intuito de combater

flechas excessivas no vão, evitar a verificação á punção e evitar momentos fletores elevados na ligação laje-pilar. Apesar disso, este acréscimo à altura da viga pode provocar alterações no fluxo de tensões na ligação da laje com viga, fazendo com que as nervuras sejam mais solicitadas que o previsto.

A laje nervurada permite ainda a elaboração de projetos sem a utilização de vigas, o que pode facilitar a execução e beneficiar a arquitetura da edificação. De acordo com Barboza (2008) a retirada de parte das vigas que compõe o pavimento permite projetar a chamada “laje lisa” ou laje sem vigas, como demonstrado na Figura 26. A vantagem da utilização dessas lajes consiste na ausência de vigas, o que proporciona uma maior flexibilidade no layout do pavimento, economia de fôrmas, e tempo de execução. No entanto, alguns fatores devem ser analisados, pois o emprego das lajes sem vigas solicitam maiores espessuras de laje. Esse fator pode ser minorado nos edifícios de múltiplos pavimentos normalmente mantendo as vigas do contorno do edifício e as vigas próximas à escada, elevadores e área de circulação comum.

Figura 26 – Laje plana nervurada sem vigas: Shopping Bretas em Montes Claros-MG



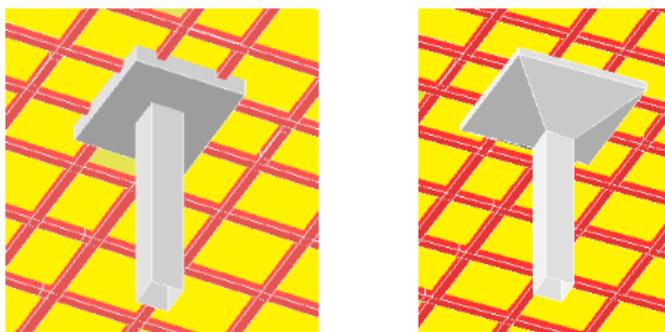
Fonte: ATEX (2018).

As lajes sem vigas são apoiadas diretamente nos pilares e são rigidamente ligados a eles, podendo apresentar vigas de bordo ou de contorno. No que se refere às lajes nervuradas, a região próxima aos apoios apresentam-se maciças, tendo como objetivo ofertar resistência aos efeitos de punção e melhoria do desempenho da laje em relação aos momentos negativos. Estas lajes exigem uma atenção especial na verificação da punção, nas deformações no meio do vão e na determinação dos momentos negativos das lajes sobre os pilares. A modelação inadequada da laje pode fazer com que os valores de momentos negativos sejam discrepantes

dos valores reais de serviço, podendo prejudicar a economia, bem como a segurança da obra (HENNRICHS, 2003).

Na região de momentos negativos, normalmente na região dos pilares, onde a capa de concreto é tracionada em função dos efeitos de punção torna-se inviável o uso de uma região nervurada do ponto de vista da segurança da ligação, sendo recomendável enrijecê-la. Este enrijecimento pode ser realizado através de alternativas como ábacos, capitéis como demonstrado na figura 27 (SACRAMENTO, 2014).

Figura 27 – Esquema de laje nervurada com ábaco (esquerda) e capitel (direita).



Fonte: Sacramento (2014).

Quanto á estabilidade global da estrutura, Spohr (2008) afirma que quando são utilizadas vigas de borda ligadas aos pilares nos limites dos pavimentos com lajes nervuradas são formados pórticos (Figura 28), que contribuem para resistência da estrutura á ações provenientes de esforços laterais, como por exemplo, o vento.

Figura 28 – Pavimentos de lajes nervuradas com utilização de vigas de borda.



Fonte: Spohr (2008).

De acordo com Albuquerque et. al (2002), com a utilização mais frequente das lajes lisas notou-se que utilização de vigas nas bordas do pavimento traziam uma série de vantagens, sem com isso prejudicar o conceito da ausência de recortes na forma do pavimento:

- Não prejudicam a arquitetura;
- Formam pórticos que resistem aos esforços laterais;
- Impedem deformações excessivas nos bordos;
- Eliminam a necessidade de verificação de punção em alguns pilares.

Em projetos com grandes vãos, as lajes nervuradas apresentam deslocamentos transversais (flechas) inferiores aos apresentados pelas lajes maciças (BOCCHI; GIONGO, 2007).

4.4.2 Benefícios e limitações técnicas de lajes protendidas

O sistema de protensão possibilita um melhor aproveitamento da área de concreto e conseqüentemente uma espessura reduzida da laje. Com isso, a laje protendida também proporciona uma diminuição do peso total do aço empregado no projeto, visto que os cabos têm uma resistência superior às das barras de aço convencionais. Em grandes vãos essa vantagem garante um aumento no espaço para instalações elétricas, hidráulicas e outras. As lajes protendidas mostram-se mais econômicas em vãos acima de 7,00 m, sendo recomendado seu emprego em vãos estruturais em próximos a este valor (de 6,00 a 8,00 m) (PEDROZO, 2008).

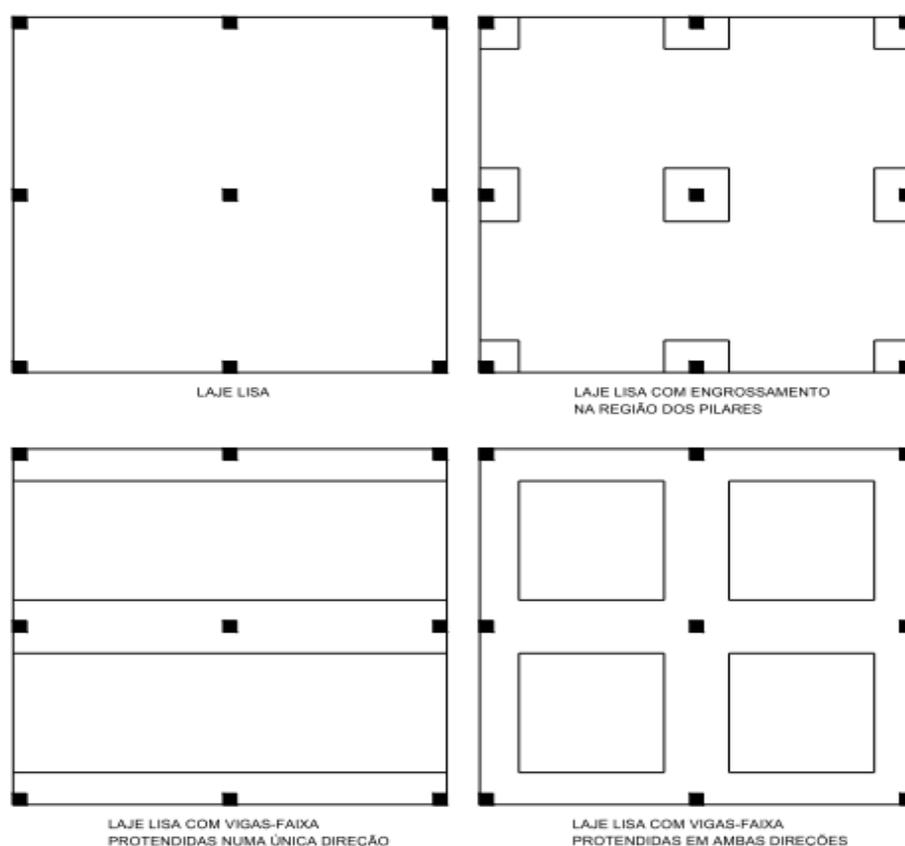
Os pilares que suportam lajes protendidas, sem vigas, devem ter dimensão mínima de 30 cm, e isto deve ser levado em conta no projeto arquitetônico. Se o edifício for alto, a estabilidade global deve ser garantida com paredes estruturais - caixas de elevadores e de escada (PEDROZO,2008).

Como este sistema é utilizado normalmente em elementos esbeltos, é necessário observar a necessidade de uma maior inércia ou rigidez, nos casos em que o vão ultrapasse 7,00m, devendo ter sua altura aumentada para viabilizar sua utilização. O efeito empenhado pelos cabos sujeitos á força de protensão equilibra os esforços solicitantes, resultantes em sua maioria de cargas permanente, proporcionando uma maior rigidez. Esse efeito dispensa então o aumento da espessura da laje, no entanto para que isso ocorra, o elemento protendido deve

ser constituído por um material que tenha bom desempenho quando submetido à compressão, a fim de que os esforços aplicados sejam mantidos (FERREIRA, 2013).

De acordo com Emerick (2002), para a execução de lajes protendidas lisas, sem ou com engrossamento na região dos pilares tem sido os principais esquemas estruturais utilizados (Figura 29). Sendo que estas apresentam vantagens quando comparadas às demais, principalmente no que diz respeito a sua execução. Porém, sua capacidade é regida pelo esforço cisalhante na ligação laje-pilar.

Figura 29 – Esquemas estruturais de lajes protendidas



Fonte: Pedrozo, 2008.

As lajes protendidas moldadas no local podem ser utilizadas ainda com vigas-faixas em uma ou duas direções. Sendo que quando posicionadas em uma única direção, são recomendadas para carregamentos inferiores a 5KN/m^2 e vãos até 12,00 m e quando a solicitação for superior a 5KN/m^2 são utilizadas em duas direções conseguindo vencer vão de até 14,00 m. As vigas-faixas podem ainda serem construídas de forma a ligar os pilares, neste caso, pode-se obter uma altura menor da laje em seu vão efetivo, ou seja, fora das faixas, quando comparada com as lajes de altura constante (PEDROZO, 2008).

Este sistema é geralmente utilizado quando um dos vãos da laje tem um comprimento significativamente maior que o vão que lhe é perpendicular, observando-se que o dimensionamento da viga faixa deve ser realizado levando em consideração o maior vão. Com isso a flecha do cabo é aumentada, o que proporciona uma maior eficiência da protensão. (ALMEIDA FILHO, 2002)

As lajes protendidas oferecem maior resistência ao puncionamento, em lajes lisas ou cogumelo, obtida pela colocação adequada dos cabos de protensão nas regiões próximas aos pilares (EMERICK, 2002).

Dornelles (2009), afirma que a concentração dos cabos em faixas passando sobre os pilares é a solução mais vantajosa, recomendando a concentração de 70 a 80% dos cabos nessas faixas. Dessa forma os demais cabos podem ser distribuídos regularmente na superfície da laje. Porém o valor recomendado por Dornelles (2009) é superior ao recomendado normalmente, que fica em torno de 50% dos cabos passando nas faixas dos pilares.

4.5 ANÁLISE E RECOMENDAÇÃO DE OPÇÃO MAIS SATISFATÓRIA ENTRE AS LAJES EM ESTUDO

Neste item são apresentadas as análises desenvolvidas com o objetivo de apontar, entre lajes nervuradas e protendidas, qual sistema possui melhor desempenho em relação às variáveis desta pesquisa e quais as principais limitações e vantagens em torno destas. Dessa forma, as lajes são comparadas em função de todo material coletado para o referencial teórico e resultados anteriores.

4.5.1 Análise e recomendação em relação aos aspectos técnicos de lajes nervuradas e protendidas

Os vãos alcançados por lajes nervuradas e protendidas são semelhantes, sendo que ambas se tornam vantajosas em relação ao sistema convencional quando são aplicadas em vãos a partir de 7 a 8m, podendo alcançar vãos em torno de 12 a 15m. Dessa forma, estes sistemas garantem uma redução significativa de pilares e vigas, o que além de facilitar as fases de execução e projeto, reduzem o peso próprio total da estrutura podendo gerar uma diminuição no custo das fundações.

No entanto, quando comparadas a lajes convencionais maciças, as lajes nervuradas solicitam maiores alturas para vencer estes vãos. Apesar do aumento de altura gerar uma redução da altura útil piso a piso da edificação, proporciona um maior braço de alavanca (distância entre as forças resultantes das tensões de tração na armadura e compressão no

concreto), atribuindo maior rigidez e resistência a cargas a qual será submetida. Já as lajes protendidas conseguem vencer estes vãos com uma altura reduzida, necessitando, no entanto ser comporta totalmente de concreto, ao contrário da nervurada que tem parte de sua composição substituída por vazios ou materiais leves.

Ambas as lajes podem dispensar a utilização de vigas permitindo a aplicação do sistema de laje lisa (*“flat plate”*). Sendo que as lajes nervuradas solicita que as regiões adjacentes aos pilares internos sejam concretadas maciçamente, demandando então um cuidado a mais no posicionamento das fôrmas. Quanto às lajes protendidas, estas apresentam como vantagem para o sistema de laje lisa, o fato de que a disposição dos cabos de protensão nas regiões que sofrem o efeito de punção, que é a complicação nesse esquema estrutural, pode contribuir no combate do mesmo.

Quanto à influência destas lajes na estabilidade global das edificações, a espessura reduzida da laje protendida e a redução do peso ofertada pela laje nervurada, tornam-nas mais susceptíveis a deslocamentos horizontais. Em uma análise realizada por Passos (2016), foi possível constatar a partir dos resultados de modelos de lajes protendidas e lajes nervuradas, que o aumento da espessura das lajes protendidas e o aumento da capa das lajes nervuradas proporcionaram reduções significativas no coeficiente de instabilidade da edificação. Outro fator que também pode contribuir para estabilidade das edificações é a redução do pé direito entre os pavimentos.

Para execução de lajes lisas, em ambas as lajes em estudo, recomenda-se manter as vigas do contorno do edifício, o que proporciona a formação de pórticos, bem como as vigas próximas à escada, elevadores e área de circulação.

4.5.2 Análise e recomendação em relação a aplicabilidades de lajes nervuradas e protendidas

Tanto as lajes protendidas como nervuradas tem sua utilização voltada para grandes vãos livres. No entanto, podem ser utilizadas para pequenos vãos devendo ser avaliado a relação custo-benefício desta aplicação. No caso das lajes protendidas, sua aplicação em obras com vãos de 3 a 5m geralmente é realizada com protensão não aderente isso se deve ao fato de que esta pode ser executada com equipamentos leves, permitindo seu uso com facilidade em obras de pequeno porte. Isso garante ao concreto protendido competitividade com o concreto armado em edifícios residenciais, o que não acontece com a protensão aderente.

A laje nervurada é bastante voltada para edifícios comerciais e residenciais, gerando uma economia significativa no volume de concreto empregado. Sua utilização em obras de

grande porte não é habitual em função da redução do volume de concreto e das diferentes configurações de esforços de tração que cada estrutura possui. Já a laje protendida é frequentemente utilizada para obras de grande porte como pontes e reservatórios, em função do ganho de resistência aos efeitos de tração e também da minoração ou eliminação de fissuras o que agrega uma maior estanqueidade, importante principalmente em reservatórios, e durabilidade.

O principal fator que pode dificultar a implantação de lajes protendidas está na exigência de mão de obra especializada e controle rigoroso em toda sua execução. Enquanto que as lajes nervuradas podem ser construídas com a mesma tecnologia empregada nas lajes maciças.

Na opção de utilizar a laje nervurada deve ser avaliada como disponibilidade de espaço no canteiro de obras para armazenar as fôrmas, cubetas plásticas ou blocos de material leve, até que estas sejam instaladas na laje. Esse fato não causa tantas interferências na execução de laje protendida, visto que os cabos e equipamentos de protensão não ocupam um espaço que possa afetar de forma significativa a liberdade espacial do canteiro.

Quando utilizadas em balanços as lajes nervuradas exigem um dimensionamento cauteloso, pois neste caso a face inferior da laje será submetida a esforços de compressão. Quanto ao dimensionamento de lajes protendidas, este é realizado de forma mais complexa que o sistema convencional, tanto em estruturas hiperestáticas quanto isostáticas.

Quanto ao uso dessas lajes para pisos, ambas podem ser utilizadas para esta função, sendo que as lajes protendidas resistem com maior eficiência em relação aos esforços de retração, o que se torna vantajoso permitindo a redução do número de juntas de dilatação.

Há ainda o aspecto em que o projeto de arquitetura pode inviabilizar um determinado sistema estrutural, devido a suas particularidades e imposições. As lajes nervuradas apresentam algumas desvantagens em relação a este critério, como por exemplo, a redução do pé direito da edificação e, quando utilizado o sistema com cubetas, superfície descontínua. Já as lajes protendidas não possuem essas desvantagens, pelo contrário, possibilitam aumento do pé direito da edificação e superfície maciça. No que diz respeito ao layout, ambas as lajes permitem uma flexibilidade semelhante em função dos vãos alcançados serem de valores próximos, como mencionado anteriormente.

4.5.3 Análise e recomendação em relação à produtividade de lajes nervuradas e protendidas

A produtividade das lajes protendidas é afetada pela cautela que o sistema solicita para o posicionamento dos cabos. Enquanto que nas lajes nervuradas, o sistema de armação é facilitado, isso porque as armaduras seguem o alinhamento das nervuras, e este é previamente marcado com o posicionamento das fôrmas.

O serviço de fôrmas das lajes nervuradas é o que consome mais mão de obra em função do posicionamento das cubetas ou blocos leves na face do assoalho ou plataforma metálica, além de implicar em uma retirada mais trabalhosa devendo fazer-se uso de produto desmoldante. Enquanto que na laje protendida maciça o serviço de fôrmas é executado de forma semelhante a convencional acrescentando somente o serviço de perfurações nas bordas das fôrmas para instalação das ancoragens.

A concretagem das lajes nervuradas solicita o cuidado de manter os blocos fixos em sua posição. Nas lajes protendidas, por sua vez os cabos são posicionados nas cadeirinhas o que impede sua movimentação, permitindo assim que a concretagem ocorra da mesma forma do sistema convencional de laje maciça com concreto armado.

Para a execução da laje nervurada, o mercado já possui mão de obra treinada o que gera melhores resultados quando comparada com a laje protendida, pois esta solicita uma mão de obra especializada para que se obtenha um desempenho satisfatório. Sendo que a contratação de mão de obra sem qualificação para execução de uma laje protendida, além de prejudicar a produtividade da obra, pode acarretar em erros de projeto e acidentes de trabalho.

Quanto à compatibilização de projetos, as lajes nervuradas garantem facilidade quando as tubulações são colocadas de forma externa na mesma, visto que estas podem ser fixadas acompanhando as nervuras depois de concluída a laje. No entanto, quando as tubulações forem embutidas, a espessura reduzida da mesa pode dificultar a instalação dos dutos. No caso da laje protendida, o embutimento de instalações após a conclusão torna-se um procedimento complicado em função do risco de danificar os cabos de protensão, principalmente em lajes onde se tem o sistema não aderente.

5 CONCLUSÃO

Na definição de qual sistema estrutural de laje a ser empregada em um determinado projeto, torna-se interessante avaliar, além do custo, as vantagens e desvantagens que sistemas apresentam em relação ao meio em que ele será instalado e aos seus processos de execução. O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise de lajes nervuradas e protendidas avaliando-as em função de aspectos técnicos, aplicabilidades possíveis e produtividade ofertada. Dessa forma, este material pode auxiliar profissionais de engenharia civil no momento da escolha de qual sistema utilizar, bem como acadêmicos, no entendimento de características das lajes em estudo.

Ao realizar um levantamento de dados a partir da realização de uma revisão bibliográfica, foi possível constatar que ambas as lajes permitem a execução de grandes vãos promovendo estruturas mais leves e com layout flexível. Além disso, averiguou-se que ambos os sistemas permitem a implantação do sistema de laje sem vigas, desde que sua estabilidade global não seja prejudicada.

A partir da literatura levantada foram avaliados os procedimentos de execução das lajes em estudo, identificando os pontos que interferem de forma positiva e negativa na produtividade da obra. Notou-se que enquanto nas lajes nervuradas o serviço de fôrmas é o fator que desfavorece seu rendimento, nas lajes protendidas é o serviço de armação que demanda mais mão de obra e tempo de execução.

No estudo verificou-se que as lajes protendidas tem uma maior versatilidade quando comparadas a lajes nervuradas. Obras de grande, médio e pequeno porte podem ser executadas com eficiência utilizando a técnica de protensão, agregando como vantagem uma resistência elevada e maior desempenho estrutural. Vale ressaltar que, apesar de não ser comumente utilizada para obras de grande porte, as lajes nervuradas apresentam como vantagem maior mão de obra disponível para execução, isso se deve pelo fato de sua execução assemelhar-se com o sistema convencional, o que é uma desvantagem das lajes protendidas que solicitam mão de obra especializada em protensão.

A coleta de informações e a análise realizada conseguiu atender ao objetivo geral da pesquisa. Analisando as características das lajes nervuradas e protendidas apontando suas semelhanças e confrontando suas vantagens e desvantagens no que diz respeito a aspectos técnicos, aplicabilidade e produtividade. Constatando que em relação aos aspectos técnicos as lajes não se diferenciam muito, quanto a produtividade cada uma delas têm particularidades que devem ser avaliadas em função de mão de obra disponível, e quanto a aplicabilidade as lajes protendidas têm melhores resultados.

Em função da importância do tema torna-se relevante o desenvolvimento de novas pesquisas abordando outros tipos de laje, como por exemplo, lajes bubble deck e steel deck. Notou-se com a realização do presente estudo que há uma escassez de indicadores de produtividade destas lajes, o que torna necessário a realização de levantamento destes a partir de acompanhamento de obras em execução.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira de ; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Viabilidade Econômica De Alternativas Estruturais De Concreto Armado Para Edifícios**. 2002. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 19, p. 1-19, 2002.

ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes de. **Estruturas De Pisos De Edifícios Com A Utilização De Cordoalhas Engraxadas**. 2002. 191f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

ARAÚJO, Anderson da Rosa. **Estudo Técnico Comparativo Entre Pavimentos Executados Com Lajes Nervuradas E Lajes Convencionais**. 2008. 111f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Cidade Nova: Dunas, 2014. 303p.

ARAÚJO, TATIANA MARTINS. **Análise dos processos de planejamento e execução de uma laje nervurada com utilização de ferramentas computacionais**. 2007. 45 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ação e segurança nas estruturas - procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estrutura de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

BARBÁN, Vladimir Villa Verde. **Punção Em Lajes Cogumelo De Concreto Protendido Com Cabos Não - Aderentes Na Ligação Laje-Pilar De Borda**. 2008. 337 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2008.

BARBOZA, Marcos Robiati. **Concepção E Análise De Estruturas De Edifícios Em Concreto Armado**. 2008. 161f. Relatório Final de Iniciação Científica - Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil, Bauru, 2008.

BOCCHI, C. F., Jr.; GIONGO, J. S. **Concreto Armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas**. 2007. 53 f. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2007.

CAUDURO, Eugenio Luiz. **Manual Para a Boa Execução de Estruturas Protendidas usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas**. 2. ed. 2002. Disponível em <

http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/protendido/arquivos/manual_para_a_boa_execucao_de_estruturas_protendidas.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2018.

CARVALHO, Roberto Chust. **Estruturas em Concreto Protendido: Cálculo e Detalhamento**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2012.

CASTRO, Sérgio Vannucci de. **Concreto Protendido - Vantagens E Desvantagens Dos Diferentes Processos De Protensão Do Concreto Nas Estruturas**. 2011. 46f. Monografia (Especialização em Construção Civil - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Belo Horizonte, 2011.

DORNELLES, Francisco Lunardi. **Estudo Sobre A Modelagem Da Protensão Em Lajes Lisas Com O Uso De Analogia De Grelhas**. 2009. 120f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Santa Catarina, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Florianópolis, 2009.

EMERICK, Alexandre Anozé. **Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. Brasília, 2002. Disponível em: <http://www.deecc.ufc.br/Download/TB812_Estruturas%20de%20Concreto%20Protendido/LP.pdf> Acesso em: 15 mar. 2018.

FARIA, Marcel Poeta. **Estruturas para edifícios em concreto armado: análise comparativa de soluções com lajes convencionais, lisas e nervuradas**. 2010. 97 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

FERREIRA, Wagner Badke. **Estudo de Desempenho e Critérios de Abordagem para Lajes Lisas Parcialmente Protendidas com Armaduras Ativas não Aderentes**. 2013.140f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Vitória, 2013.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.

GRAFF, Samantha. **Análise Comparativa De Sistemas Estruturais Compostos Por Vigas E Lajes Maciças Ou Nervuradas Em Edifícios**. 2015. 121f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HENNRICHS, Carlos Alexandre. **Estudos Sobre a Modelagem de Lajes Planas de Concreto Armado**. 2003. 201f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

HUPALO, Cristiane; LAGO, Fernanda Scussiato. **Estudo De Laje Lisa Protendida Com Monocordoalhas De Aço Engraxadas Pelo Software Sap2000**. 2016. 111F. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, Pato Branco, 2016.

LACERDA, R. T. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. **Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho**. Gestão & Produção, v. 19, n. 1, 2012.

LINCK, Bruna Rodrigues. **Lajes Lisas Protendidas Por Cordoalhas Engraxadas: Avaliação Do Processo Executivo Em Comparação Ao Do Concreto Armado Convencional Em Edificações Residenciais**. 2013. 79f. Trabalho de Diplomação (Graduação) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Escola De Engenharia, Departamento De Engenharia Civil, Porto alegre, 2013.

LOPES, André Felipe de Oliveira. **Estudo Comparativo Entre Lajes Nervuradas Moldadas No Local Com Fôrmas De Polipropileno E Lajes Pré- Fabricadas Treliçadas**. 2015. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil E Ambiental, Caruaru, 2015.

LOUREIRO, Giordano José. **Projeto De Lajes Protendidas Com Cordoalhas Engraxadas**. In: Simpósio Escola Politécnica da Universidade de São Paulo sobre Estruturas de Concreto, 6., 2006, São Paulo. Anais... São Paulo, 2006.

MELO, Paula Rodrigues de. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos**. 2013. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

MONCAYO, Winston Junior Zumaeta. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. 221f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PACHECO, Débora. *et al.* **Considerações Sobre Análise E Modelagem De Barragens De Enrocamento Com Face De Concreto**. 2003. 22f. Comitê Brasileiro De Barragens - XXV Seminário Nacional De Grandes Barragens, Salvador, 2003.

PEDROZO, David Guillermo Esteche. **Estudo De Modelos Para Projeto De Lajes Lisas Protendidas**. 2008. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Florianópolis, 2008.

PINHEIRO, Libânio M. ; RAZENTE, Júlio A. **Fundamentos do concreto e projetos de edifícios**. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2007.

RAMOS, Bruno Baptista. **Análise Da Produtividade Da Mão De Obra Em Estrutura De Concreto Armado – Com Laje Nervurada**. 2014. 128f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2014.

RUDLOFF. **Concreto Protendido**. 2012. 31f. Catálogo Técnico. rev.5. São Paulo, 2012.

SACRAMENTO, Paulo Victor Prazeres. **Análise Experimental De Lajes Nervuradas De Concreto Armado Com Viga Faixa De Altura Variável**. 2014. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Belém, 2014.

SCHEIBLER, Matheus. **Estudo Comparativo Entre Estruturas Em Concreto Convencional E Estruturas Em Lajes Planas Protendidas Para Edifícios Com Múltiplos Pavimentos: Análise do ponto de vista executivo, econômico e produtivo**. 2012. 29 f. Revista da Graduação, Rio Grande do Sul. v.5 . n.1, 2012.

SCHMID, Manfred Theodor. **Lajes Planas Protendidas**. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Rudloff Sistema de Protensão Ltda., 2009. Publicação técnica n. 1.

SCHWETZ, Paulete Fridman. **Análise numérico-experimental de lajes nervuradas sujeitas a cargas estáticas de serviço**. 2011. 214 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia , Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2011.

SILVA, Andréia Rodrigues da. **Análise Comparativa De Custos De Sistemas Estruturais Para Pavimentos De Concreto Armado**. 2002. 211f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal De Minas Gerais, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Estruturas, Belo Horizonte, 2002.

SILVA, Guilherme Veber Moisés da. **Estudo de distribuição de esforços em lajes nervurada com aberturas através da Analogia da Grelha**. 2015. 93 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 239f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, Programa de pós-graduação em construção civil, São Carlos, 2005.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL (SINAPI). **Cadernos Técnicos De Composições Para Fôrmas Para Estruturas De Concreto Armado**. Lote 1 , Versão 008. 2015.

SOUZA, Ubiraci Espinelli Lemes de. **Como Medir A Produtividade Da Mão-De-Obra Na Construção Civil**. 2004. 08f. Universidade de São paulo, 2004.

SPOHR, Valdi Henrique. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

STUCCHI, Fernando Rebouças. **Pontes E Grandes Estruturas**. 2006. 103f. Notas de Aula - Universidade De São Paulo Escola Politécnica - Departamento De Estruturas E Fundações, São Paulo, 2006.

TECHNE. **Como Construir:** Laje nervurada. 2017. Disponível em <<https://techne.pini.com.br/2017/03/como-construir-laje-nervurada/>> Acesso em: 30 de agosto de 2018.

TENÓRIO, D. A.; GOMES, P. C.; BARBOZA, A. S.; UCHÔA, E. L. **Aspectos Técnicos e Econômicos de Lajes Nervuradas Unidirecionais e Bidirecionais.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 51., 2009. Curitiba. Anais... Curitiba, 2009.

ZANETTE, Diogo Schreiner. **Projeto De Vigas De Pequeno Porte Parcialmente Protendidas Com Monocordalhas Engraxadas.** 2006. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2006.