

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDERSON DE OLIVEIRA SÁ

**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO E EXECUÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE
CONCRETO ARMADO**

São Luís
2018

ANDERSON DE OLIVEIRA SÁ

**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO E EXECUÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE
CONCRETO ARMADO**

Monografia apresentada ao curso de engenharia civil da Universidade Estadual do Maranhão como requisito a obtenção do grau de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Msc. Clodoaldo Cesar Malheiros Ferreira.

São Luís

2018

Sá, Anderson de Oliveira.

Contribuição ao projeto e execução de lajes nervuradas de concreto armado / Anderson de Oliveira Sá. – São Luís, 2018.

82 p.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Me. Clodoaldo Cesar Malheiros Aguiar.

1. Estruturas de concreto armado. 2. Lajes nervuradas.
3. Projeto. 4. Execução. 5. Edifícios de apartamentos. I. Título.

CDU 624.012.45

ANDERSON DE OLIVEIRA SÁ

CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO E EXECUÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE
CONCRETO ARMADO

Monografia apresentada ao curso de
engenharia civil da Universidade Estadual
do Maranhão como requisito a obtenção do
grau de bacharel em engenharia civil.

Aprovada em: 25/06/18

BANCA EXAMINADORA



Prof. Msc. Clodoaldo César Matheiros Ferreira
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Luciano Carneiro Pires
Universidade Estadual do Maranhão

À minha querida mãe, Judite, que me deu a vida, amor e me ensinou a ser uma pessoa de caráter.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me proporcionar saúde, por ter me concedido a oportunidade de cursar engenharia civil e me dado forças para enfrentar os inúmeros desafios durante os cinco anos vividos na UEMA. Agradeço ainda a toda a minha família pelo apoio que sempre me foi dado, em especial ao meu avô, Antônio, que me deu a oportunidade de morar em São Luís. Também à minha amada mãe, Judite, que juntamente com meu pai não pouparam recursos e estiveram sempre empenhados em me ajudar nos momentos difíceis. Agradecimento especial também a minha namorada, Thaisa, que está sempre ao meu lado e é o meu refúgio de paz.

Por todo meu desenvolvimento proporcionado pelos cinco anos como acadêmico e pela realização deste trabalho, gostaria aqui de agradecer aos meus professores. Em especial, ao meu orientador prof. Clodoaldo Cesar Malheiros Ferreira e àqueles da área de estruturas, pois tive a oportunidade de receber conhecimento de ilustres profissionais, figuras de grande destaque na engenharia maranhense.

RESUMO

O presente trabalho trata dos aspectos mais importantes do projeto e da execução de lajes nervuradas em concreto armado apoiadas sobre vigas, com utilização em edifícios residenciais. Analisa-se assim o assunto de forma abrangente e sistêmica, apresentando as diversas interdependências entre o sistema estrutural estudado e os demais sistemas prediais que fazem parte do edifício. É feita revisão bibliográfica sobre a literatura disponível que possa contribuir ao estudo. Na sequência, são feitas as considerações sobre os pontos mais importantes a serem analisados no projeto e na execução de lajes nervuradas. Além disso, é feita uma análise de uma obra em andamento na cidade de São Luís utilizando esse tipo de laje.

Palavras chave: Estruturas de concreto armado. Lajes nervuradas. Projeto. Execução. Edifícios de apartamentos

ABSTRACT

The following work has as its main purpose to demonstrate the most important aspects of the execution of reinforced concrete ribbed slabs placed on beams, and its application to residential buildings. The subject is analysed in an embracing and systemic way, showing the many codependencies between the structural system studied here and all the other building systems that compose the building. The literature review is based on the available literature that contributes to the study. In sequence, it is made to deliberate the most important points analysed in the project and in the execution of the ribbed slabs. In addition, an analysis has been done of a building progress in São Luís city where the ribbed slabs are being used.

Keywords: Reinforced concrete structural. Ribbed slabs. Project. Execution. Apartment buildings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - viga em concreto armado.....	24
Figura 2 – viga em concreto protendido	24
Figura 3 - modelagem de estrutura em ambiente BIM	25
Figura 4- exemplo de laje maciça apoiada sobre vigas.....	28
Figura 5 - exemplo de laje cogumelo	29
Figura 6 - exemplo de laje lisa.....	29
Figura 7 - exemplo de laje nervurada.....	30
Figura 8 - exemplo de elementos considerados no peso próprio	31
Figura 9 - ONUMA Planning System	34
Figura 10 - modelagem tridimensional em BIM	35
Figura 11 - caminhamento das ações em estrutura usual.....	39
Figura 12 - ações horizontais em barra engastada	42
Figura 13- exemplo de laje armada em uma direção com nervuras transversais	45
Figura 14- lajes pré-moldadas alveolar e duplo t (ou π)	47
Figura 15- lajes moldadas no local com blocos de concreto celular (esquerda) e com cubas de polipropileno (direita).	47
Figura 16- lajes nervurada lisa (esquerda) e com vigas chatas (direita)	48
Figura 17 - vão efetivo de lajes	49
Figura 18 - dimensões de lajes nervuradas	50
Figura 19 - laje nervurada com armadura transversal.....	52
Figura 20- furos em laje	53
Figura 21 – Equação diferencial das placas.....	57
Figura 22 – Malha de elementos finitos em peça	58
Figura 23 – Grelha equivalente	59
Figura 24 – Capacidades requeridas ao usuário.....	60
Figura 25 – Propriedades geométricas da seção em T.....	61
Figura 26 – Equilíbrio na seção T.....	61
Figura 27 – Sistema metálico de escoramento	63
Figura 28 – Escoramento de estrutura	63
Figura 29 – Vista superior de pavimento em lajes nervuradas.....	65
Figura 30 – Telas de aço.....	66
Figura 31 – Retirada de molde	67
Figura 32 – Maquete do edifício	69
Figura 33 – Planta-baixa do pavimento tipo	70
Figura 34 – Planta de forma do pavimento tipo.....	70
Figura 35 – Laje maciça com instalações embutidas	71
Figura 36 – Vazios na laje	72
Figura 37 – Cimbramento e escoramento metálicos	73
Figura 38 – Detalhe das nervuras da laje.....	73
Figura 39 – Formas e armaduras da laje	74
Figura 40 – Vista inferior da laje.....	75
Figura 41 – Concretagem de laje	76
Figura 42 – Vazamentos de concreto pelas cubas.....	77
Figura 43 – Serviço de acabamento na superfície da laje.....	77

Figura 44 – Laje após desforma 78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Tema e delimitação	17
1.2 Justificativa do tema	17
1.3 Problema de pesquisa	18
1.4 Objetivos geral e específicos	18
1.5 Metodologia	19
1.6 Ordenação do trabalho	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 Contexto histórico do concreto armado no Brasil	21
2.2 Aspectos conceituais importantes	22
2.1.1 Estruturas de concreto armado.....	23
2.1.2 Concepção e análise estrutural	25
2.1.3 Lajes de concreto armado	26
2.1.4 Ações atuantes em lajes de concreto armado	31
2.1.5 Estados limites ultimo e de serviço	32
2.1.6 Compatibilização de projetos e tecnologia BIM	33
2.3 Considerações gerais sobre edifícios residenciais	37
2.3.1 Sistemas estruturais mais utilizados	38
2.3.2 Ação do vento e estabilidade global	40
2.3.3 Sistemas complementares de edifícios.....	43
2.4 Lajes nervuradas de concreto armado	44
2.4.1 Lajes com nervuras em uma e duas direções	44
2.4.2 Lajes pré-moldadas e moldadas in loco.....	46
2.4.3 Lajes com apoios contínuos e apoios discretos.....	47
2.5 NBR 6118: recomendações gerais para lajes nervuradas	48
2.5.1 Vãos efetivos	48
2.5.2 Dimensões limites.....	49
2.5.3 Análise estrutural	50
2.5.4 Verificação ao cisalhamento	51
2.5.5 Aberturas e furos	52
3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO E EXECUÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO	55
3.1 PROJETO	55
3.1.1 Análise Estrutural.....	55

3.1.2 Dimensionamento	60
3.2 EXECUÇÃO	62
4 EXEMPLO DE EDIFÍCIO COM PAVIMENTOS EM LAJES DE CONCRETO	
ARMADO.....	69
4 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema e delimitação

Atualmente vem se mostrando como alternativa bastante atrativa o uso de lajes nervuradas em edifícios de vários pavimentos, essa tendência se justifica pelas diversas vantagens atribuídas a esse sistema estrutural. Dessa forma, o presente trabalho tem como tema: contribuição ao projeto de lajes nervuradas de concreto armado.

No referente a essa temática, que engloba uma vasta gama de assuntos de grande interesse ao meio técnico, procurou-se fazer uma delimitação no que diz respeito ao estudo dos aspectos teóricos e construtivos relacionados a lajes nervuradas que mais influem na elaboração de projetos e execução de pavimentos de edifícios de múltiplos andares destinados a uso residencial.

1.2 Justificativa do tema

Uma vez observada a crescente utilização de lajes nervuradas nos edifícios de vários pavimentos, em função das diversas vantagens que essa solução apresenta e que serão tratadas no presente trabalho, é de grande interesse ao meio técnico estudos que tratem do assunto. Além disso, é de valia um tratamento de forma holística do mesmo, ou seja, a análise do tema em seu contexto como um todo, considerando tanto os fatores técnicos relacionados ao dimensionamento e execução de pavimentos dessa tipologia, quanto a averiguação de todas as diferentes variáveis que acabam por influenciar o sucesso de um empreendimento residencial quando se adota a solução estrutural de lajes nervuradas em seus pavimentos.

Nessa linha de raciocínio este trabalho pode servir como referência para projetistas e construtores que trabalhem nesse particular segmento da construção civil, principalmente aqueles menos experientes e que necessitem de norteamento inicial no aprofundamento dos seus conhecimentos. Com isso, aqui se encontrará uma fonte de consulta que ajudará na avaliação de viabilidade de empreendimentos, pela consideração das particularidades e necessidades referentes ao uso de lajes nervuradas em edifícios residenciais.

1.3 Problema de pesquisa

A proposta desse trabalho envolve se concentrar na seguinte problemática: quais os principais aspectos teóricos e construtivos referentes a lajes nervuradas que mais contribuem na elaboração de projetos e na execução de pavimentos de edifícios de vários andares para uso residencial?

1.4 Objetivos geral e específicos

A pesquisa científica referente à monografia em questão, dentro da temática anteriormente exposta e frente ao problema de pesquisa citado, leva à elaboração de objetivos que o autor propõe a serem atingidos. Desta forma, temos como objetivo geral da pesquisa: analisar os principais aspectos teóricos e construtivos relacionados a lajes nervuradas e que tem impacto direto na elaboração e execução de projetos de pavimentos de edifícios de uso residencial.

Podemos ainda dizer que o material aqui a ser apresentado visa constituir-se em fonte de consulta de utilidade a projetistas e construtores da nossa região. Para ser atingido o objetivo geral apresentado, passaremos pela proposição de alguns objetivos específicos listados a seguir.

- Realizar um estudo sobre os aspectos teóricos e construtivos relacionados a pavimentos em lajes nervuradas.
- Fazer uma análise da interferência e interdependência com demais sistemas complementares de um edifício.
- Levando em consideração todos os aspectos teóricos e construtivos estudados, relacioná-los de forma sistêmica e sequenciada.
- Trazer o exemplo da obra de um edifício executado em concreto armado com lajes nervuradas, localizado em São Luís – MA, na qual o autor estagiou durante oito meses.

1.5 Metodologia

Este trabalho científico, para fazer a análise dos dados tratados, fará uso de metodologias e ferramentas adequadas às finalidades propostas. Podemos dizer que se constitui em uma pesquisa de caráter exploratório e descritivo, com apresentação de análises qualitativas e quantitativas. Serão utilizados como fontes bibliográficas, livros, artigos, normas e trabalhos de relevância nacional ou estrangeira, serão ainda tomados como mecanismos de pesquisa entrevistas com projetistas e construtores, além de visita de campo em canteiro de obra.

1.6 Ordenação do trabalho.

O desenvolvimento desta monografia, após o exposto neste primeiro tópico, segue com uma revisão bibliográfica feita no item 2. Neste sentido, parte-se dos contextos históricos importantes (item 2.1) e a seguir são trabalhados no item 2.2 conceitos importantes ao nosso trabalho. Estes conceitos envolvem definições que estão arranjadas na seguinte sequência: estruturas de concreto, concepção e análise estrutural, lajes de concreto armado, ações atuantes em lajes, estados limites ultimo e de serviço e, por fim, compatibilização de projetos.

No item 2.3 do referencial teórico são feitas considerações gerais sobre edifícios residenciais de múltiplos andares. Assim, sequencialmente trataremos dos sistemas estruturais utilizados, da ação do vento, estabilidade global e sistemas prediais.

Em 2.4, estudaremos as lajes nervuradas de concreto armado, discutindo as diversas tipologias existentes. Dessa forma serão apresentadas agrupadas em três tipos de classificações: as lajes unidirecionais e bidirecionais, lajes pré-moldadas e moldadas in loco, lajes em apoios contínuos e apoios discretos. No item 2.5, encerraremos a revisão bibliográfica elencando as principais considerações que a NBR 6118/2014 faz em relação às lajes nervuradas.

Com base no referencial teórico apresentado, serão feitas as considerações e contribuições ao projeto e execução de lajes nervuradas em concreto armado no item 3. A seguir, o item 4 traz o exemplo de uma obra executada em São Luís utilizando lajes nervuradas. E finalmente, o último tópico faz as considerações finais do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Apresentaremos adiante a base teórica que o presente trabalho utiliza como referência e exploraremos os principais conceitos necessários ao desenvolvimento da pesquisa. É importante ainda lembrar que atualmente encontramos grande conhecimento acumulado pelo homem no que diz respeito ao concreto armado e sistemas estruturais. Isso foi resultado do desenvolvimento tecnológico e surgimento da informática, que ocasionou um aumento exponencial na quantidade de informações disponíveis oriundas de diversos estudos realizados nos últimos anos.

Desta forma, frente a enorme quantidade de informações, faremos um direcionamento e trataremos aqui da base bibliográfica de conteúdo hoje disponível e imprescindível ao nosso estudo em questão, que é a análise de lajes nervuradas de concreto armado aplicadas em pavimentos de edifícios residenciais.

2.1 Contexto histórico do concreto armado no Brasil

As estruturas de concreto armado fazem parte do cotidiano do homem, pois o cercam em todo o ambiente urbano. Desde o século XIX, quando se iniciou o desenvolvimento dessa tecnologia, diversos estudos foram realizados visando entender as propriedades desse material, objetivando sua utilização nas obras civis.

Em se tratando do desenvolvimento histórico do concreto, encontramos conteúdo relevante no trabalho de Kaefer (1998) onde são apresentados os acontecimentos históricos mais importantes relacionados ao concreto. Na verdade, este autor traz uma visão mais ampla e interessante sobre esse desenvolvimento histórico, podemos observar no trecho a seguir.

Desta forma, constatamos que a história do concreto armado não começou no século passado, mas com a própria civilização humana, pois a partir do momento que o homem existe sobre a terra, ele tem a necessidade básica de morar e morar melhor a cada dia, desenvolvendo novas tecnologias para isto (KAEFER, 1998, p. 2).

Todavia, foi no início do século XX que passou a se ter um incremento de obras em concreto armado no Brasil, inicialmente devido a vinda de firmas estrangeiras de concreto que possuíam patentes, como afirma Santos (2008). Este autor, em sua tese de doutorado, faz uma excelente explanação dos aspectos históricos da disseminação do concreto armado em nosso país. Um ponto importante a destacarmos é fato da relativa rapidez na difusão do concreto armado no Brasil,

desde sua introdução na indústria da construção à criação de normas nacionais relativas a projeto e execução. O trecho a seguir faz uma síntese:

A partir da instalação das cimenteiras, em meados dos anos 1920, inicia-se o processo de difusão da tecnologia do concreto, determinando um período crítico de instalação dessa tecnologia no Brasil ao longo dos anos 1930. Nos anos 1940, o concreto está, de certa forma, estabilizado, já tinha uso normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, já estava regulado pelas atribuições profissionais do sistema CONFEA-CREAs e fazia parte dos currículos das escolas de engenharia e arquitetura (SANTOS, 2008, p. 15).

Desta forma, percebemos o quão rápido foi a inserção do concreto nos métodos construtivos nacionais, passando a possuir posição de destaque em relação a outras alternativas e fomentando o desenvolvimento da “escola brasileira do concreto armado”, onde tivemos formação profissionais especializados nessa área e a realização de diversas obras de destaque, com a conquista de diversos recordes mundiais.

E neste cenário, com grandes realizações da engenharia nacional, através da aplicação do concreto armado em diversas obras de arte como pontes e viadutos, proporcionados por grandes investimentos em infraestrutura, teve-se um grande desenvolvimento científico-tecnológico com a implementação de novas estruturas curriculares nas faculdades do país, adequadas à nova realidade das construções.

Tal desenvolvimento tecnológico, associado ao processo de urbanização, com adensamento populacional nos grandes centros, possibilitou um aumento na verticalização das edificações. Assim, os escritórios de cálculo estrutural, atendendo às necessidades dos arquitetos, passaram a ousar cada vez mais nas estruturas. São diversos os arranha-céus famosos construídos no século XX.

Em se tratando de lajes nervuradas, Silva F^o (2002) destaca que as mesmas surgiram na terceira década do século passado, como busca de alternativa às lajes maciças, buscando redução de custos.

2.2 Aspectos conceituais importantes

Para o desenvolvimento deste trabalho, em vista dos objetivos propostos e do problema de pesquisa, trataremos de assuntos que necessitam de prévia definição para melhor situação de leitor. Deste modo, faremos uma revisão bibliográfica de assuntos teóricos e de práticas construtivas relacionados ao contexto das lajes nervuradas.

2.1.1 Estruturas de concreto armado

A princípio, o que seria de fato uma estrutura? Na verdade, esse é um conceito de caráter intuitivo, segundo Barboza (2008 apud Rebello, 2001) “estrutura é tudo aquilo que sustenta, tal qual o esqueleto humano. Está em tudo que nos rodeia, nas plantas, no ar e nas pessoas, nos objetos e nas ideias”.

Além disso, vimos anteriormente que o concreto possui uma posição de destaque nas metodologias construtivas utilizadas em todo o mundo e particularmente aqui no Brasil. A grande maioria dos edifícios construídos aqui é projetada com estrutura de concreto armado, em vista das facilidades que o mesmo ainda apresenta para nossa realidade em relação ao concreto protendido, a estruturas metálicas, e etc. Relacionado a isso existe ainda um certo comodismo em relação a adoção de alternativas inovadoras, ocasionado pelo próprio ambiente do mercado, relacionado à mão de obra e materiais necessários, o que torna as outras alternativas tecnológicas menos viáveis financeiramente em relação ao concreto.

Assim, é fato que o concreto armado domina quando se trata de estruturas de edifícios em nosso país e as questões levantadas no parágrafo anterior seriam assuntos interessantes a outros trabalhos de pesquisa. Na verdade, encontramos em Santos (2008) muitas reflexões sobre essas questões.

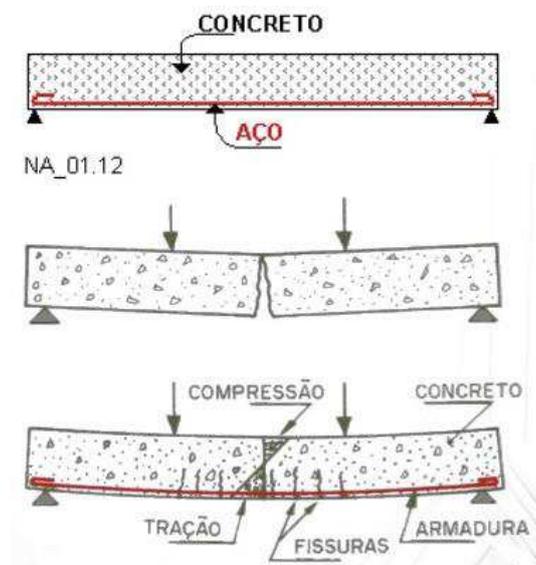
Partindo-se agora para o estudo mais técnico referente a nosso tema, começaremos a tratar de definições básicas. Assim, como já falamos do concreto armado e do seu uso no contexto nacional, faremos algumas considerações importantes sobre esse material.

O concreto armado é obtido por intermédio da associação do concreto simples e do aço, uma vez que o primeiro resiste de forma excelente a esforços de compressão, mas não aos de tração. Logo o aço vem a suprir essa necessidade, sendo adequadamente alocado nas peças estruturais de forma a trabalhar solidariamente ao concreto (conceito de aderência). A armadura presente no concreto armado (figura 1) é chamada de passiva, sendo diferenciada daquela usada nas estruturas protendidas (armaduras ativas). Carvalho (2007), ressalta ainda o fato de o concreto e o aço terem coeficientes de dilatação térmica próximos ($1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o concreto e $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o aço) e que o envolvimento do aço pelo concreto o protege contra oxidação e temperaturas elevadas. Este último fato é tratado pela NBR

6118 com o relacionamento de condições de agressividade ambiental e cobrimentos mínimos a serem tomados sobre as armaduras das peças estruturais.

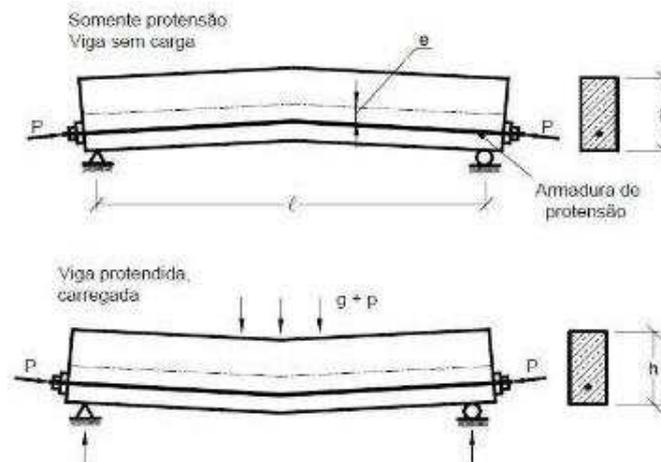
O concreto protendido (figura 2) é uma evolução do concreto armado, na qual se pode obter estruturas que resistam de forma mais eficiente aos esforços devido aos carregamentos. Ainda segundo Carvalho (2007), o concreto protendido é obtido associando-se concreto simples a armaduras ativas (cordoalhas de aço) e com aplicação da tração na armadura antes que se tenha o carregamento atuando na estrutura, de tal forma que essas forças especiais contribuam para a eliminação ou redução dos esforços de tração na peça quando a mesma estiver em serviço.

Figura 1 - viga em concreto armado



Fonte: internet

Figura 2 – viga em concreto protendido



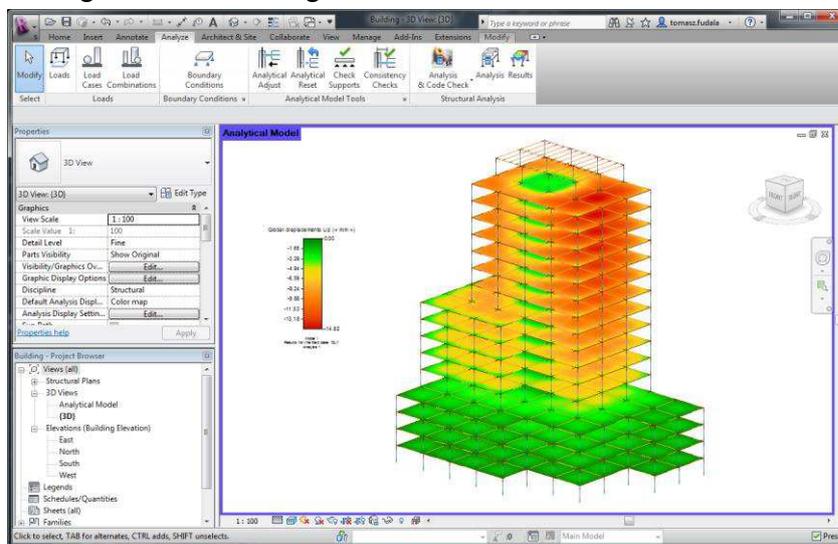
Fonte: internet

2.1.2 Concepção e análise estrutural

No desenvolvimento de projetos de edifícios, a concepção estrutural é uma das etapas mais importantes e que define o desempenho final da estrutura frente as finalidades do empreendimento. Para uma mesma arquitetura, são infinitas as possibilidades de soluções estruturais, logicamente umas sendo mais adequadas que outras, e a escolha do modelo estrutural mais satisfatório na fase de concepção depende muito dos conhecimentos provindos da experiência do projetista. Podemos dizer ainda que a concepção estrutural se relaciona às metodologias construtivas adotadas e a necessidade de harmonia com os projetos arquitetônicos e complementares. De forma simples podemos fazer uma definição como a seguir:

A concepção da estrutura de um edifício consiste no estabelecimento de um arranjo ou combinação adequada dos diversos elementos estruturais existentes e definição das ações a serem consideradas, com o objetivo de atender simultaneamente os requisitos de segurança, durabilidade, estética, funcionalidade, entre outros, que as construções devem apresentar (Barboza, 2008, p. 8).

Figura 3 - modelagem de estrutura em ambiente BIM



Fonte: internet

A exigência de compatibilização entre os diversos sistemas que compõe um edifício, levou ao desenvolvimento da tecnologia BIM (Building Information Modeling) que está em alta hoje em dia e sem dúvidas veio a revolucionar a construção civil. Assim, essa tecnologia auxilia o engenheiro na fase de concepção estrutural (figura 3), permitindo um fluxo e compartilhamento de informações com os e projetistas de outras especialidades e como resultado pode se ter uma estrutura que atenda

estritamente aos requisitos de funcionamento do edifício e acelera o processo de construção pela eliminação de paradas por incompatibilizações e outros imprevistos.

Logo, como se pode ver, o BIM é uma tecnologia muito poderosa e de grande utilidade no desenvolvimento de projetos estruturais, muitos softwares comerciais de cálculo estrutural hoje estão inseridos nessa linha de tecnologia.

Na verdade, o contexto e as possibilidades de aplicação do BIM vão muito além do comentado, porém não é o objetivo aqui tratar especificamente desta ferramenta, existem várias e excelentes literaturas referente ao assunto, caso seja interesse do leitor.

No que se refere ao projeto estrutural, como foi dito, parte da concepção da estrutura e segue por posteriores etapas de análise, compatibilizações e dimensionamentos. Segundo Martha (2010), são inúmeras e muito complexas as etapas de um projeto de uma estrutura, com a previsão do comportamento do modelo o mais próximo das condições reais de trabalho. A seguir citamos trecho na qual o autor reflete sobre a fase de análise estrutural.

A análise estrutural é a fase do projeto estrutural em que é feita a idealização do comportamento da estrutura. Esse comportamento pode ser expresso por diversos parâmetros, tais como pelos campos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura. De modo geral, análise estrutural tem como objetivo a determinação de esforços internos e externos, e das correspondentes tensões, bem como a determinação dos deslocamentos e correspondentes deformações na estrutura que está sendo projetada. (MARTHA, 2010, p. 1).

2.1.3 Lajes de concreto armado

Anteriormente tratamos do concreto armado e da concepção estrutural, com vista em inserir o leitor no contexto do nosso tema. Porém, antes de falarmos de lajes nervuradas, precisamos entender primeiramente o que é uma laje perante a estrutura.

Para se ter ideia da importância das lajes em relação aos custos devido consumo de material, Barboza (2008 apud Giongo, 2007), afirma que esses elementos representam 50% do concreto empregado na edificação, sendo as lajes maciças as que apresentam maior consumo.

Em termos geométricos, as lajes são classificadas como elementos planos ou bidimensionais, onde temos duas dimensões da mesma ordem de grandeza e bem maiores que a terceira (espessura). Como o carregamento é de modo geral

perpendicular ao plano da peça, dizemos que a laje se comporta como um elemento do tipo placa.

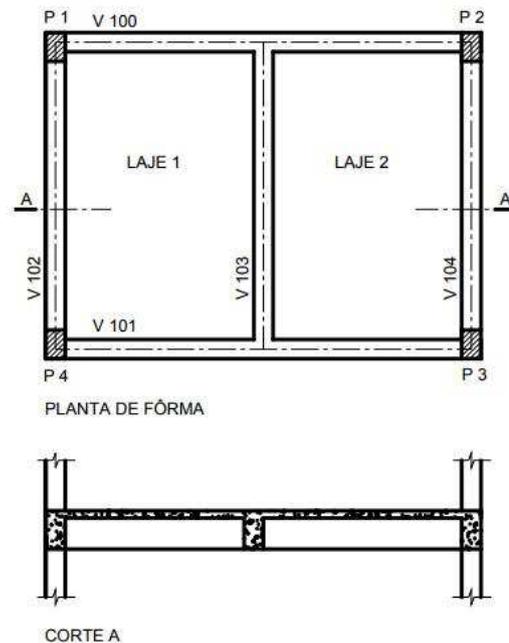
De acordo com Pinheiro (2007), “lajes são placas que, além das cargas permanentes, recebem as ações de uso e as transmitem para os apoios; travam os pilares e distribuem as ações horizontais entre os elementos de contraventamento”.

Borowski (2005) afirma que além da função de resistência estrutural, a laje tem a função de isolamento térmico e acústico dos edifícios. Ainda segundo este autor, podemos ter uma classificação baseada em dois grupos, lajes moldadas in loco e lajes pré-moldadas, além de classificações relacionadas à forma, a natureza, quanto ao tipo de apoio e quanto ao tipo de armação.

Segundo Bastos (2006), as lajes são os elementos planos que se destinam a receber a maior parte das ações aplicadas numa construção, como o peso de pessoas, móveis, pisos, paredes, e os mais variados tipos de carga que podem existir em função da finalidade de uso do pavimento que a laje faz parte. As cargas atuantes nas lajes, de acordo com as condições particulares, podem ser distribuídas em sua área, linearmente distribuídas ou ainda concentradas. Posteriormente trataremos especificamente das ações que atuam nas lajes de edifício e que devem ser consideradas no seu dimensionamento.

Na figura 4 temos um exemplo de laje maciça apoiada sobre vigas em todo o seu contorno. Assim, outra característica importante a se analisar são as condições de apoios, de modo geral podemos ter lajes apoiadas em vigas ou paredes (apoios contínuos) ou apoiadas diretamente sobre pilares (apoios discretos). No item 2.3 trataremos com mais profundidade cada tipo.

Figura 4- exemplo de laje maciça apoiada sobre vigas



Fonte: Barboza (2008)

As lajes são solicitadas basicamente à flexão, assim nas seções no meio dos vãos, as tensões variam de compressão nas fibras superiores à tração nas inferiores, existindo a uma certa altura a linha neutra. Desta forma, as armaduras principais de aço, que são dimensionadas para esses esforços de flexão são posicionadas nas regiões tracionadas. Além das armaduras de flexão, são utilizadas também armaduras secundárias de distribuição e, quando necessário, armaduras transversais de cisalhamento.

Nas lajes usuais, em apoios contínuos, temos basicamente três tipos de vinculações nas bordas das lajes: borda livre, borda simplesmente apoiada e borda engastada. Dessa forma:

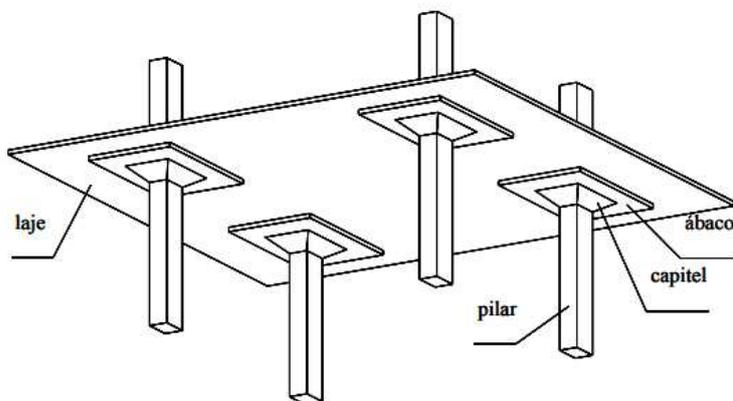
A borda livre caracteriza-se pela ausência de apoio, apresentando, portanto, deslocamentos verticais. Nos outros dois tipos de vinculação, não há deslocamentos verticais. Nas bordas engastadas, também as rotações são impedidas. Este é o caso, por exemplo, de lajes que apresentam continuidade, sendo o engastamento promovido pela laje adjacente (PINHEIRO, 2007, p. 11.3).

Segundo Bastos (2006), as lajes comumente utilizadas nos edifícios são: maciça apoiada nas bordas, nervurada, lisa e cogumelo. Ainda segundo este autor, laje maciça é um termo que se usa para as lajes sem vazios (espessura constante) apoiadas em vigas nas bordas, já as lajes lisas e cogumelo também não têm vazios, porém, as do tipo cogumelo são apoiadas diretamente em pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são as apoiadas nos pilares sem capitéis. Além dos capitéis, que

são engrossamentos em forma de tronco de pirâmide nos pilares na região de encontro com a laje, pode se ter também o uso de ábacos, que são engrossamentos na laje nessa mesma região. A finalidade da utilização de ábacos e capitéis está associada à necessidade de combater os esforços de punção que ocorrem nas regiões de encontro da laje com o pilar.

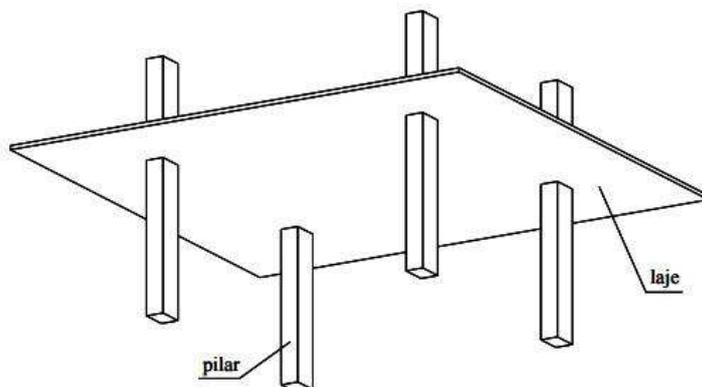
Todavia, uma ressalva importante sobre o uso de capitéis e ábacos, conforme indica Silva (2005) é que além de resultarem em tetos não lisos, impõem dificuldades na sua construção, principalmente no que se refere à montagem das fôrmas. Neste sentido o autor aponta como alternativa a possibilidade de se utilizar armadura específica para combater os esforços de punção na região de encontro laje-pilar. Indica como fonte de consulta, com diversos tipos de armadura de cisalhamento comumente utilizados para combater à punção nesses tipos de lajes, os trabalhos de FIGUEIREDO FILHO (1989), CORDOVIL & FUSCO (1995), MELGES (2001) e SILVA et al. (2003).

Figura 5 - exemplo de laje cogumelo



Fonte: Silva (2005)

Figura 6 - exemplo de laje lisa

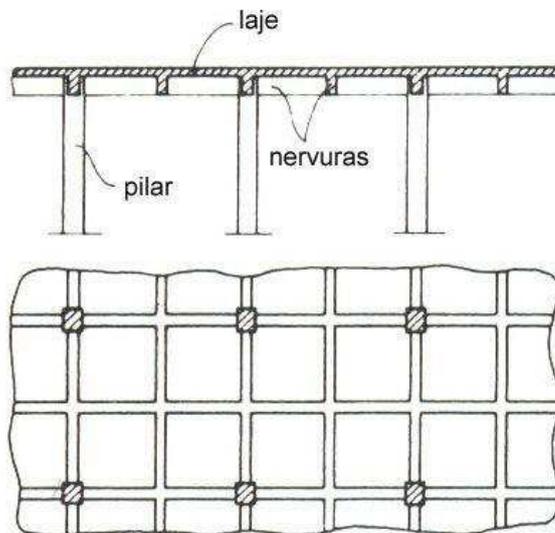


Fonte: Silva (2005)

“As lajes podem ter o consumo de concreto e menor peso próprio diminuídos com a utilização de blocos de enchimento (ou moldes plásticos), dando origem à chamada laje nervurada” (BARBOZA, 2008). Adicionado a isso, Carvalho e Pinheiro (2009) afirmam que para grandes vãos, as lajes maciças apresentam uma pequena região de concreto comprimido, ou seja, grande parte do concreto encontra-se abaixo da linha neutra (região tracionada), não colaborando assim para a resistência à flexão. Logo, a ideia é substituir o concreto dessa região por material inerte leve ou simplesmente utilizar formas que deixem vazios entre as nervuras

Conforme define a NBR 6118/14, “lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte”. Este é o tipo de laje o qual trataremos neste trabalho, os diversos tipos particulares de lajes nervuradas serão estudados no item 2.3.

Figura 7 - exemplo de laje nervurada



Fonte: internet

VIEGAS e SOUSA (2004) recomendam o uso de lajes nervuradas para vãos de 10 a 12 m, sendo possível até 15 m em edifícios residenciais e comerciais. Nesse tipo de laje, as armaduras positivas para os momentos fletores são posicionadas nas nervuras, onde ainda é alocado em casos necessários armaduras de cisalhamento. Na região das mesas, se tem uma armadura de distribuição, geralmente em tela.

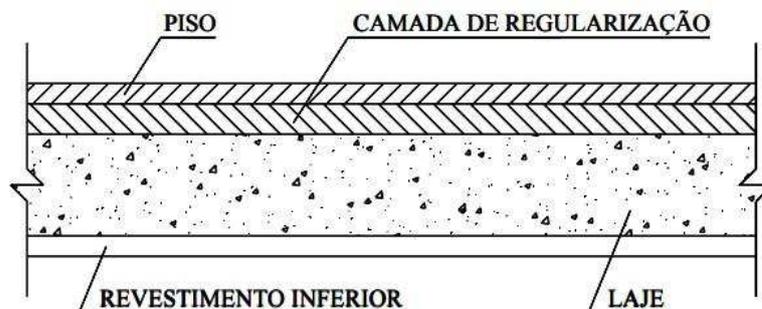
2.1.4 Ações atuantes em lajes de concreto armado

No dimensionamento dos elementos estruturais é preciso determinar as ações atuantes a serem consideradas nos cálculos, de forma que se tenha uma modelagem mais próxima das condições reais de trabalho. Conforme cita Silva (2005) a norma define as “ações como sendo causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas”. Dessa forma, se interpreta na norma que “as forças e as deformações impostas pelas ações são consideradas como se fossem as próprias ações. As deformações impostas são por vezes designadas por ações indiretas e as forças, por ações diretas” (Silva 2005 apud NBR 6118, 2003). As ações a serem consideradas em projetos, segundo a NBR 6118/14, podem ser divididas em três categorias: permanentes, variáveis e excepcionais.

“Ações permanentes são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida da construção. Também são consideradas permanentes as ações que aumentam no tempo, tendendo a um valor-limite constante” (NBR 6118, 2014, p. 56). Estes tipos de ações são divididos em diretas e indiretas, conforme o item 11.3.

As ações permanentes diretas, conforme este item, “são constituídas pelo peso próprio da estrutura, pelos pesos dos elementos construtivos fixos, das instalações permanentes e dos empuxos permanentes”. Para o peso próprio, admite-se que nas construções usuais sejam utilizados os valores de 2400 kgf/m^3 para o concreto simples e 2500 kgf/m^3 para o concreto armado (Carvalho, 2007).

Figura 8 - exemplo de elementos considerados no peso próprio



Fonte: Silva (2005)

Já as ações permanentes indiretas, de acordo com a norma, “são constituídas pelas deformações impostas por retração e fluência do concreto, deslocamentos de apoio, imperfeições geométricas e protensão”. A maneira de se proceder na

consideração das ações permanentes diretas e indiretas está disposta nos itens 11.3.2 e 11.3.3 da norma.

As ações variáveis são aquelas que ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção, também são classificadas em diretas e indiretas, conforme o disposto nos itens 11.4.1 e 11.4.2. Sobre as ações variáveis diretas a serem consideradas, essas “são constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção, pela ação do vento e da água, devendo-se respeitar as prescrições feitas por Normas Brasileiras específicas” (NBR 6118, 2014, p. 61). As ações variáveis indiretas são designadas por variações uniformes e não uniformes de temperatura, e ações dinâmicas, ou seja, quando a estrutura está sujeita a choques ou vibrações, com a possibilidade de fadiga assim devendo ser considerada.

Por fim, no item 11.5 a norma trata das ações excepcionais, afirmando que “no projeto de estruturas sujeitas a situações excepcionais de carregamento, cujos efeitos não possam ser controlados por outros meios, devem ser consideradas ações excepcionais com os valores definidos, em cada caso, por Normas Brasileiras específicas” (NBR 6118, 2014, p. 63). Neste sentido, conforme vemos em Silva (2005), essas ações são aquelas que tem duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, mas que tem um alto impacto nocivo à estrutura e devem ser consideradas em certos projetos. O autor cita, como exemplos, as ações decorrentes de causas como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes, ou sismos excepcionais.

2.1.5 Estados limites ultimo e de serviço

No dimensionamento das estruturas de concreto, atualmente se utilizam os métodos baseados em estados limites. Pinheiro (2007) define que esses estados “são situações em que a estrutura apresenta desempenho inadequado à finalidade da construção, ou seja, são estados em que a estrutura se encontra imprópria para o uso”. Dessa forma, a segurança é garantida com a adoção de limites que ao serem ultrapassados levariam a estrutura a ruptura ou então a perda de sua funcionalidade.

Ainda, conforme Carvalho (2007), esta metodologia é chamada de semiprobabilística, pois “o método dos estados-limites é um processo simplificado de verificação de segurança, visto que uma análise probabilística completa seria difícil e

complicada, até mesmo impossível”. Este autor resume a metodologia em dois pontos reproduzidos abaixo:

- Adoção de valores característico para resistência e ações. Aceitação de que as resistências efetivas apresentariam valores inferiores aos característicos e que as ações efetivas possam ser superiores aos valores característicos.
- Cobrir os demais elementos de incerteza existentes no cálculo estrutural pela transformação dos valores característicos em valores de cálculo: minoração das resistência e majoração das ações.

Neste contexto, estes estados limites são divididos em dois tipos: ultimo e de serviço. De acordo com Carvalho (2007), a ideia do estado limite último é fazer com que as solicitações correspondentes às cargas majoradas sejam menores que as solicitações ultimas, que determinam a ruptura da estrutura quando as resistências reais dos materiais são minoradas. A NBR 6118 (2014), elenca em seu item 10.3 os estados limites últimos que devem ser considerados e que determinam a segurança das estruturas.

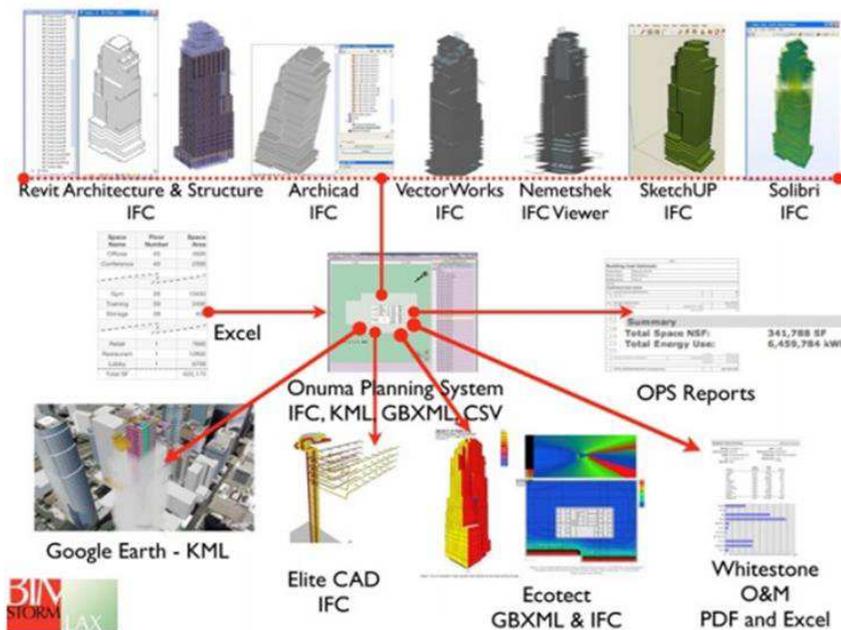
Neste sentido, a estrutura é dimensionada no estado limite último, que viria a caracterizar o colapso da mesma. Em seguida é feita a verificação em relação ao estado limite de serviço, aqui garante-se o bom funcionamento e a durabilidade da estrutura, através da limitação em relação a presença de fissuras, deformações e vibrações excessivas. No item 10.4 da norma se define que “estados-limites de serviço são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas”.

2.1.6 Compatibilização de projetos e tecnologia BIM

Além do estrutural, um edifício demanda o desenvolvimento de diversos outros projetos, como arquitetônico, elétrico, hidráulico, esgotos, incêndio, gás, comunicações e etc. Estes diversos sistemas devem estar em harmonia, necessitando assim de uma atividade chamada de compatibilização. Segundo Graziano (2003), a compatibilidade é definida como atributo do projeto cujos componentes dos sistemas ocupam espaços que não conflitam entre si e, além disso, que possui dados compartilhados com consistência e confiabilidade até o final do processo de projeto e obra. Mikaldo e Scheer (2008) afirmam que a compatibilização de projetos é a

atividade que torna os projetos compatíveis, proporcionando soluções integradas entre as diversas áreas que tornam um empreendimento factível. Citando ainda Mikaldo e Scheer (2008 apud Picchi, 1993), podemos dizer que a compatibilização compreende a atividade de sobrepor os vários projetos e identificar as interferências, bem como programar reuniões, entre os diversos projetistas e a coordenação, com o objetivo de resolver interferências que tenham sido detectadas.

Figura 9 - ONUMA Planning System



Fonte: ONUMA, disponível em: www.onuma.com

Encontramos ainda definições, formuladas por diversos autores, em que a ideia de compatibilização vai além da verificação de interferências física. Assim, os autores citados anteriormente, fazem as seguintes considerações:

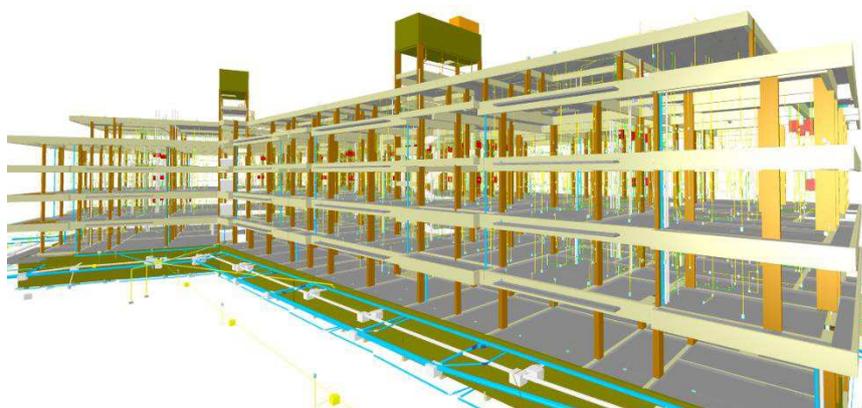
Contudo, mesmo não havendo consenso na literatura a respeito do escopo da compatibilização, observa-se que a necessidade de verificar interferências físicas e discutir informações que interligam as características de cada projeto, são tópicos abordados por diversos autores, que citam a utilização de sobreposição de projetos 2D em softwares de CAD, integração de modelos 3D e a aplicação do método FMEA (Análise do Modo e Efeito de Falha) como ferramentas para compatibilização de projetos. (MIKALDO E SCHEER, 2008, p. 83)

Para Andrade e Ruschel (2009), a utilização de práticas operacionais baseadas na tecnologia BIM pode ter papel decisivo na melhoria das fases do projeto e auxilia na geração de propostas coerentes com as solicitações dos clientes, na

integração dos projetos, entre si e com a construção, na redução do tempo e do custo da construção. Sobre o BIM, podemos ainda trazer as seguintes considerações:

Os sistemas baseados na tecnologia BIM podem ser considerados uma nova evolução dos sistemas CAD, pois gerenciam a informação no ciclo de vida completo de um empreendimento de construção, através de um banco de informações inerentes a um projeto, integrado à modelagem em três dimensões (COELHO E NOVAES, 2008, p. 2).

Figura 10 - modelagem tridimensional em BIM



Fonte: internet

Neste contexto de desenvolvimento de metodologias e conceitos referentes à etapa de planejamento e projeto, vem se desenvolvendo a chamada engenharia simultânea, que é um conceito muito interessante ao cenário da construção civil como podemos observar a seguir.

Ida (1998) apud SCPD (2004) define que a Engenharia Simultânea é uma abordagem sistemática para integrar, simultaneamente projeto do produto e seus processos relacionados, incluindo manufatura e suporte. Essa abordagem é buscada para mobilizar os desenvolvedores (projetistas), no início, para considerar todos os elementos do ciclo de vida da concepção até a disposição, incluindo controle da qualidade, custos, prazos e necessidades dos clientes (MIKALDO E SCHEER, 2008, p. 91).

Face às diversas possibilidades quanto às formas estruturais possíveis, que se aplicam a diferentes situações particulares e com vista a redução de custos com retrabalhos e imprevistos que corriqueiramente ocorrem nas obras brasileiras, é de extrema importância uma tomada de postura por parte dos engenheiros e arquitetos de forma a valorizar e priorizar a etapa de planejamento das obras. É fato conhecido que em países desenvolvidos muito tempo dos trabalhos são dedicados à fase de

planejamento, devido a sua grande importância, porém em nosso país o que se observa é uma cultura de se resolver problemas com o andar da obra, é a famosa ideia do “tocador de obras”.

Mesmo diante desse quadro de atraso no setor da construção civil, a tendência é uma industrialização do canteiro de obras. Embora a passos lentos, observa-se a inserção gradual de tecnologias no setor da construção, como por exemplo, uso de concretos usinados, utilização peças em concreto pré-moldado, armaduras entregues no canteiro já cortadas e dobradas conforme projeto e etc.

Porém, podemos dizer que as tecnologias mais impactantes inseridas nesse setor foram aquelas relacionadas a geração e compartilhamento de informação. São o caso dos softwares de gestão de obras, de plataformas de elaboração de orçamentos, os programas de CAD, softwares de cálculo estrutural e também aqueles destinados a elaboração de projetos complementares. Todavia, o ápice do impacto tecnológico na construção civil se deu com o surgimento do BIM, que basicamente reúne todas as tecnologias citadas anteriormente e possibilita o trabalho conjunto, com a modelagem do empreendimento e todas as suas informações e características. Dessa forma, se pode prever interferências e problemas de incompatibilizações, além da possibilidade de se trabalhar com diversas frentes alternativas possivelmente viáveis, tudo isso antes do “calor da obra”.

Toda essa revolução tecnológica que vem acontecendo recentemente, mas que já faz parte da nossa realidade, exige uma nova postura e uma nova visão sobre a etapa de planejamento e projeto por parte dos engenheiros. Logo, apesar da ciência por trás da engenharia ainda ser a mesma, as práticas e rotinas de trabalho, adequadas às novas tecnologias, são totalmente diferentes daquelas desenvolvidas no final do século passado.

Os melhores softwares comerciais de cálculo estrutural hoje disponíveis trabalham na plataforma BIM, dessa forma, há uma possibilidade de integração maior entre calculista e os demais projetistas, com o compartilhamento de informações. Assim, com o desenvolvimento concomitante das diversas disciplinas, o modelo do empreendimento é constantemente atualizado e as diversas interferências que surgem são alertadas e postas em discussão para serem solucionadas. Isso traz uma maior segurança ao projetista estrutural, uma vez que se modela uma estrutura mais próximas das condições reais.

2.3 Considerações gerais sobre edifícios residenciais

Os edifícios residenciais de apartamentos são apenas uma particularidade dentre o vasto campo que envolve a construção civil. Porém é notório o papel de destaque desta tipologia de construção no contexto urbano, uma vez que as médias e grandes cidades brasileiras tem recebido um rápido incremento populacional nos últimos anos. Essa dinâmica, impacta fortemente os ambientes urbanos e geram necessidades, que na maioria dos casos ainda não foram atendidas devidamente.

De todas as necessidades que surgem devido à crescente urbanização, uma das mais importantes diz respeito à moradia. Todavia, devido a inúmeros fatores, como por exemplo a escassez de infraestrutura adequada, criam-se áreas urbanas mais valorizadas e que propiciam maior conforto ao uso residencial. Assim, é de se esperar que nessas áreas de alto valor econômico, ocorra uma verticalização das edificações, para maior aproveitamento dos espaços físicos.

Tende-se assim ao surgimento de edificações de caráter multifamiliar, compostas por apartamentos. Para Mattar (2007, apud Gobbo e Rosso, 2002), o apartamento é uma adequação às necessidades culturais modernas baseadas na “funcionalidade, refletindo-se inclusive, na configuração interna dos ambientes, pequenos, mas com superposição de funções, passando a ser fator de orientação de projeto de arquitetura”.

Desta forma, com o crescimento na demanda de edifícios de uso residencial proporcionado pelas dinâmicas de urbanização criou-se um forte nicho no mercado imobiliário, resultando no surgimento de inúmeros empreendimentos. Para Fabricio (2002), “a demanda por edificações se mostra altamente variável e complexa, influenciada por questões conjunturais, pela disponibilidade de financiamento, etc., marcando um mercado altamente variável em relação ao volume de produção”. Além disso, conforme se encontra em Barboza (2008, p. 6):

Conforme aumenta a complexidade do empreendimento, cresce a necessidade da integração entre as atividades técnicas de projeto (arquitetura, estrutura, instalações prediais, iluminação, comunicação visual, paisagismo, impermeabilização, entre outras) para a construção de um edifício. Esta integração permite a troca de informações entre os projetistas a fim de otimizar soluções técnicas e econômicas.

Neste sentido, frente aos objetivos do nosso trabalho, se faz justo, tratarmos das particularidades destes tipos de construções, mesmo de forma breve e geral.

Assim estaremos mais aptos a entendermos as variáveis envolvidas no projeto e na execução de obras de edifícios deste tipo.

2.3.1 Sistemas estruturais mais utilizados

A estrutura de um edifício é composta por uma série de elementos, dentre os mais comuns temos lajes, vigas, pilares, paredes estruturais e elementos de fundação. As ações decorrentes da utilização atuam nos pavimentos e, nas situações mais comuns, as tensões decorrentes das solicitações são transmitidas das lajes para as vigas, destas para os pilares e posteriormente às fundações. Apesar de esse ser o arranjo estrutural mais comum, existem outras inúmeras formas de arranjos estruturais. Hoje em dia, segundo alguns autores, há uma tendência no uso das lajes lisas e cogumelo, onde as tensões são transmitidas diretamente das lajes aos pilares. Mas, conforme afirma Pinheiro (2007), tem uso mais corrente nos edifícios “lajes maciças ou nervuradas, moldadas no local, pré-fabricadas ou ainda parcialmente pré-fabricadas. Em casos específicos de grandes vãos, por exemplo, pode ser aplicada protensão para melhorar o desempenho da estrutura”. Podemos notar dessa forma a variabilidade quanto às diversas possibilidades estruturais, o trecho a seguir traz mais considerações:

A estrutura portante para edifícios residenciais ou comerciais pode ser constituída por elementos estruturais de concreto armado; de concreto protendido ou por uma associação dos dois materiais; alvenaria estrutural - armada ou não; por associação de elementos metálicos para pórticos e grelhas com painéis de laje de concreto armado, com fechamento em alvenaria; e, com elementos pré-fabricados de argamassa armada. Em algumas regiões do País se encontra a utilização de estruturas de madeira na construção de edifícios de pequena altura (GIONGO, 2007, p. 1).

Contudo, as diversas opções que existem, tanto na concepção do pavimento (tipos de lajes e suas vinculações) quanto na concepção vertical (sistema de contraventamento adotado), apresentam diversas vantagens e desvantagens, que as vezes são intrínsecas ao próprio sistema ou surgem no confronto aos sistemas prediais complementares.

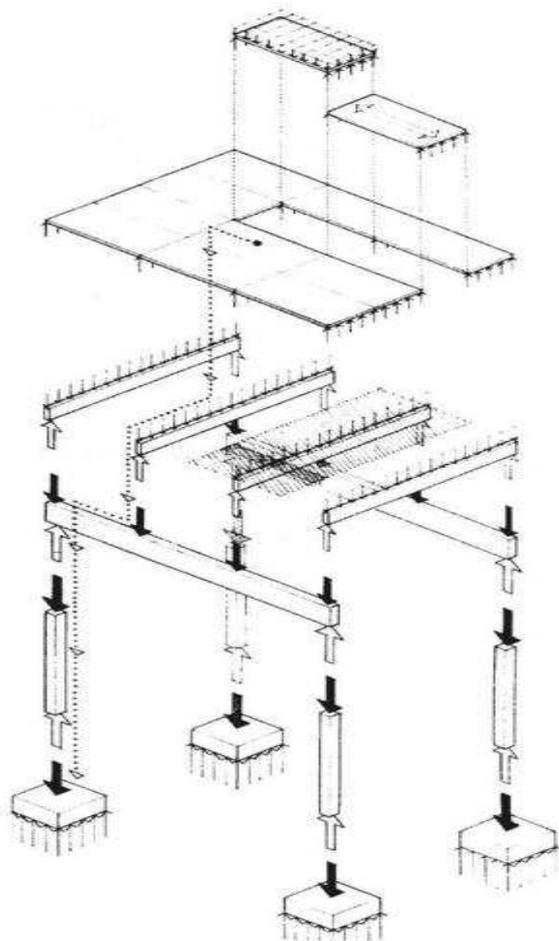
Desta forma, as particularidades do empreendimento devem determinar a solução a ser utilizada, considerando-se os aspectos técnicos e econômicos. As soluções disponíveis são de conhecimento solidificado na engenharia e a escolha da solução tende a ser determinada por fatores de custos, que estão relacionados à

disponibilidade de fornecimento de material na região, da existência de profissionais especializados para projetar e executar a solução adotada, entre outros fatores.

As exigências arquitetônicas também têm grande influência no tipo de estrutura a ser usado, porém qualquer que seja a dificuldade imposta pela arquitetura, pode ser contornada com soluções adequadas que por sua vez apresentam custos. Logo, em um raciocínio sistêmico, se confirma a ideia que as análises de viabilidade que determinam a escolha da solução estrutural se pautam fundamentalmente nos aspectos financeiros.

Nas estruturas mais comuns, as tensões que surgem nos elementos devido às solicitações “caminham” pelas lajes que, por flexão e cisalhamento, as transmitem às vigas e estas, também sujeitas a flexão e cisalhamento, encaminham-nas aos pilares. Estes, geralmente por flexão composta oblíqua, transmitem as tensões para as fundações. Esta sequência de caminhamento pode ser vista na figura 11.

Figura 11 - caminhamento das ações em estrutura usual.



Fonte: Barboza (2008)

No item 2.1.3, tratamos dos tipos de lajes de concreto mais usuais em pavimentos de edifícios, a escolha do tipo mais adequado é feita na concepção estrutural do pavimento, onde se determinam os elementos e as formas nas quais estarão arrançados. Entre alguns fatores que determinam essa escolha, Barboza (2008) cita: “finalidade da construção, magnitude dos carregamentos, vãos, facilidade e rapidez de execução, disponibilidade e qualidade da mão-de-obra, localização, estética, funcionalidade, disponibilidade de equipamentos, e principalmente o custo”.

Além da concepção horizontal, que determina as características do pavimento e os elementos que o compõem, outro aspecto fundamental a se analisar nos edifícios é sobre a composição vertical, que está relacionada a resistência a ação do vento e a estabilidade global do prédio. Na concepção vertical entram como elementos estruturais da análise os pórticos planos e tridimensionais, os núcleos de rigidez e diversas estruturas de contraventamento.

As lajes nervuradas, além de fazer parte da composição dos pavimentos, tem uma boa rigidez transversal devido a maior altura na sua seção, dessa forma contribuem no contraventamento da estrutura.

Outro fator a ser considerado em relação a escolha do sistema estrutural, diz respeito as tecnologias construtivas necessárias, mas não apenas sobre a sua disponibilidade regional, mas a aplicabilidade às condições da obra em questão. Esse fato é de extrema importância, pois os edifícios de apartamentos são construídos em áreas densamente urbanizadas, geralmente disponibilizando de pouco espaço físico no canteiro, além disso deve-se levar em conta o possível incômodo gerado à vizinhança durante a construção.

São esses e outros aspectos que vão limitando o leque de opções viáveis a serem aplicadas à obra. Por exemplo, as estruturas pré-moldadas de concreto, apesar de proporcionar rapidez à execução, necessitam do deslocamento vertical até as suas posições finais, o que torna extremamente difícil a aplicação dessa tecnologia em edifícios mais altos.

2.3.2 Ação do vento e estabilidade global

A ação do vento deve ser considerada no desenvolvimento do projeto, pois como sabemos, quanto maior a altura, maior é a velocidade das correntes de ar que circulam. Além da altura, a força decorrente da ação do vento é proporcional a área

de incidência. Logo, em edifícios de maior altura ocorrem esforços consideráveis devido a ações horizontais causadas por correntes de ar incidentes na estrutura. Pinheiro (2007), indica que “o caminho dessas ações tem início nas paredes externas do edifício, onde atua o vento”. Essas ações são transmitidas e “resistidas por elementos verticais de grande rigidez, tais como pórticos, paredes estruturais e núcleos”, ou seja, a estrutura de contraventamento do edifício.

Em vista disso, Pinheiro (2007) adiciona que “ações horizontais, onde não há ocorrência de abalos sísmicos, constituem-se, basicamente, da ação do vento e do empuxo em subsolos”. Ou seja, além da ação do vento, outro esforço horizontal importante são os empuxos laterais de terra.

Barboza (2008), tratando dessas ações horizontais que incidem nas estruturas, faz as seguintes considerações:

As ações horizontais, constituídas basicamente por ações do vento e empuxos do solo, também devem ser absorvidas pela estrutura e transmitidas ao solo pela fundação. As ações do vento são recebidas pelas paredes externas e transmitidas à estrutura de contraventamento, formada por elementos verticais de grande rigidez (pórticos, pilares-parede, núcleos de rigidez, etc.). A estrutura de contraventamento transmite as ações aos elementos de fundação (BARBOZA, 2008, p. 71).

Conforme destaca a NBR 6118, os esforços relativos a ação do vento devem ser considerados de acordo com a NBR 6123. Esta última norma apresenta as diretrizes para a consideração das forças devido a da ação do vento, de acordo com a velocidade característica na região, a topografia e condições da vizinhança (obstruções à passagem do vento).

Deste modo, em relação às ações que atuam horizontalmente nos edifícios, tem-se impactos mais significativos nas estruturas que adotam lajes lisas e cogumelo, uma vez que não existem as vigas para formar os pórticos com os pilares.

Além disso, no item 15.4.3 da NBR 6118 diz que, “é possível identificar, dentro da estrutura, subestruturas que, devido à sua grande rigidez a ações horizontais, resistem à maior parte dos esforços decorrentes dessas ações”. A norma se refere a essas subestruturas como de contraventamento. Os demais elementos da estrutura então são ditos contraventados.

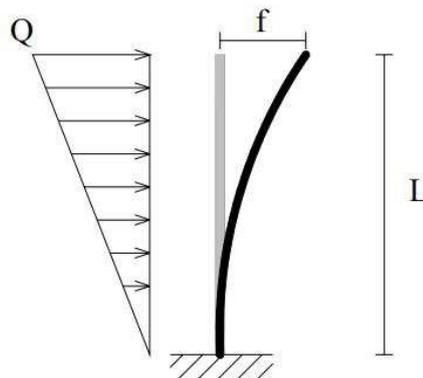
O desalinhamento do eixo vertical da estrutura, implica o aparecimento de excentricidades e faz com que as aplicações das cargas gerem deslocamentos

maiores que aqueles obtidos com a análise da condição indeformada (CHINEM, 2010). Este mesmo autor ainda indica que:

A análise que leva em conta os efeitos de 2ª ordem é uma análise não linear geométrica e é feita por um processo iterativo. Os resultados dos esforços e deslocamentos assim calculados podem convergir para um valor limite (estrutura estável) ou aumentarem indefinidamente (estrutura instável) (CHINEM, 2010, p. 20).

Giongo (2007) diz que a “análise da estabilidade global da estrutura de um edifício avalia a "sensibilidade" da mesma em relação aos efeitos de 2.a ordem. Essa "sensibilidade" é tradicionalmente medida por um coeficiente α ”. Além desse coeficiente, existe o γ_z , que conforme indica o mesmo autor, “também é usado para avaliar a sensibilidade da estrutura de um edifício aos efeitos da não-linearidade geométrica”.

Figura 12 - ações horizontais em barra engastada



Fonte: Bastos (2006)

Na verdade, segundo a NBR 6118/14, a determinação dos parâmetros α e γ_z constituem processos aproximados que são utilizados para verificar a dispensa da consideração dos esforços globais de 2ª ordem. Se, devido à rigidez às ações horizontais, os deslocamentos laterais são pequenos e conseqüentemente os esforços de 2.ª ordem globais, a estrutura é dita de nós fixos, caso contrário é de nós móveis.

As estruturas são consideradas, para efeito de cálculo, de nós fixos, quando os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos e, por decorrência, os efeitos globais de 2ª ordem são desprezíveis (inferiores a 10 % dos respectivos esforços de 1ª ordem). Nessas estruturas, basta considerar os efeitos locais e localizados de 2ª ordem. As estruturas de nós móveis são aquelas onde os deslocamentos horizontais não são pequenos e, em decorrência, os efeitos globais de 2ª ordem são importantes (superiores a 10 % dos respectivos esforços de 1ª ordem). Nessas estruturas devem ser considerados tanto os esforços de 2ª ordem globais como os locais e localizados (NBR 6118, 2014 p. 103).

2.3.3 Sistemas complementares de edifícios

Os edifícios que compõem o ambiente urbano, conforme sua finalidade, apresentam características e necessidades próprias. Logo, prédios destinados a hospitais, presídios, escolas, hotéis e escritórios, por exemplo, apresentam exigências distintas que implicam particularidades em seu projeto e na sua execução. Desta forma, edifícios destinados ao uso residencial apresentam particularidades decorrentes das necessidades de seus usuários. Assim, surgem diversos sistemas prediais com a finalidade de atender essas necessidades. É importante falarmos sobre esses sistemas, uma vez que se relacionam entre si e com a estrutura do edifício e deve haver uma harmonia.

Dentre os diversos projetos complementares que compõem os chamados sistemas prediais e que surgem das necessidades dos usuários. Vale lembrar que quanto maior o padrão da edificação maior é a quantidade de sistemas e o grau de sofisticação dos mesmos. A seguir listaremos sei grupos que, segundo Farina (2017), englobam os principais sistemas prediais que surgem em decorrência das necessidades dos seus usuários.

- Água: relacionado ao fornecimento e recebimento de água. Inclui os projetos de água fria, água quente, esgoto sanitário, águas pluviais e sistemas de aproveitamento de água de chuva.
- Energia: Podemos incluir aqui os projetos elétricos e de gás.
- Comunicação: Sistemas de TV, telefonia e internet.
- Segurança: Projeto de combate a incêndio, sistemas de proteção a descargas atmosféricas (SPDA) e sistemas de segurança patrimonial.
- Conforto: Sistemas que propiciem o conforto térmico, acústico e visual, como sistema de ar-condicionado, ventilação e luminotécnica.
- Gerenciamento: Há uma tendência no uso de sistemas de automação em relação ao controle dos sistemas prediais.

Como podemos observar são diversos os sistemas presentes e que influenciam no projeto estrutural uma vez devem ser previstas, por exemplo, aberturas para shafts e passagem de tubulações horizontais, além do fato que diversas tubulações são embutidas em lajes e vigas da estrutura. Assim devem ser analisadas as influências no comportamento estrutural. Todas essas situações são observadas e discutidas durante a compatibilização dos projetos, como foi visto no item 2.1.6.

2.4 Lajes nervuradas de concreto armado

Em vista dos objetivos do trabalho, a seguir estudaremos as lajes nervuradas de concreto armado e os seus diversos tipos de classificações. Este tipo de laje vem sendo amplamente difundido nas obras desenvolvidas no Brasil, devido as suas diversas vantagens em relação às lajes maciças e as possibilidades de aplicação em edifícios de diferentes especialidades como escolas, hospitais, shoppings, prédios de apartamentos, edifícios garagem e etc.

Além disso, o que temos na verdade aqui é um grupo de vários tipos de lajes adequadas a diversas situações, com a finalidade de atendimento a necessidades específicas. A seguir apresentaremos as diferentes tipologias, classificadas de acordo com alguns critérios que serão vistos.

2.4.1 Lajes com nervuras em uma e duas direções

Em relação à sua geometria, as lajes de modo geral podem ser armadas em uma ou duas direções e o critério considerado é a relação entre os tamanhos dos vãos. Assim considera-se que a laje é armada em uma direção quando a relação entre o maior e o menor vão for maior que dois, caso contrário a laje será armada em duas direções. Na verdade, o fato de se ter nervura unidirecionais ou bidirecionais, decorre de a laje ser armada em uma ou duas direções. Vale lembrar o que:

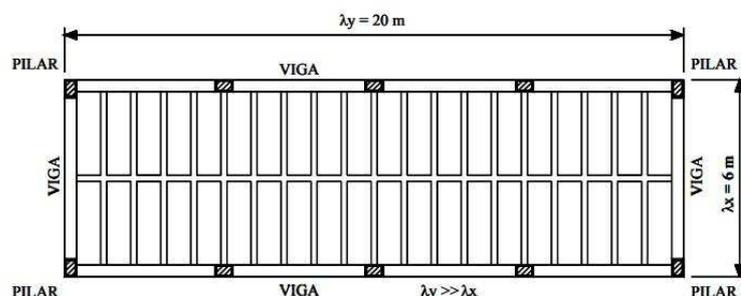
Nas lajes armadas em duas direções, as duas armaduras são calculadas para resistir os momentos fletores nessas direções. As ditas armaduras em uma direção, na realidade, também têm armaduras nas duas direções, pois na direção do maior vão, coloca-se armadura de distribuição, com objetivo de solidarizar as faixas de laje da direção principal. Nesse caso, a armadura principal, na direção do menor vão, é calculada para resistir o momento fletor nessa direção, obtido ignorando-se a existência da outra direção. Portanto, a laje é calculada como se fosse um conjunto de vigas-faixa na direção do menor vão (PINHEIRO, 2007, p. 11.3).

Quanto ao uso de lajes nervuradas em edifícios de vários pavimentos, é mais adequado o uso de lajes com nervuras em duas direções, as lajes unidirecionais são usadas em edifícios de pequeno porte. O tipo mais comum de laje nervurada unidirecional é aquela construída com o uso de vigotas pré-moldadas de concreto.

Como vimos, nas lajes nervuradas armadas em uma direção as nervuras normalmente são dispostas na direção do menor vão teórico, e admite-se que apresentam comportamento estrutural de vigas simplesmente apoiadas. Contudo,

Silva (2005) cita ainda que, dependendo das dimensões dos vãos, utilizam-se nervuras dispostas transversalmente às principais com objetivo de travamento.

Figura 13- exemplo de laje armada em uma direção com nervuras transversais



Fonte: Silva (2005)

Assim, podemos resumir que neste tipo de laje (unidirecional), quando se faz a análise estrutural, segue-se o seguinte:

O cálculo dos esforços solicitantes (momento fletor e força cortante) e dos deslocamentos transversais para as lajes nervuradas armadas em uma direção normalmente é feito considerando as nervuras como um conjunto de vigas paralelas que trabalham praticamente independentes, adotando-se a seção transversal em forma de “T” para as mesmas; normalmente não se considera a continuidade entre lajes vizinhas, analisando as nervuras como vigas simplesmente apoiadas nas extremidades (SILVA, 2005, p. 66).

Como foi dito, a laje de vigotas pré-moldadas é um tipo de laje nervurada unidirecional, neste sistema as armaduras principais de flexão são alojadas nas vigotas que são produzidas fora do canteiro de obras e compõem as nervuras. Entre as vigotas são posicionados materiais inertes, geralmente blocos cerâmicos ou placas de isopor (EPS). A laje é completada com a concretagem de uma capa de concreto de pequena espessura e que compõe as mesas. Outro tipo de laje nervurada unidirecional é aquela chamada de “tipo π ”, que é pré-moldada e muito utilizada em galpões e estruturas industriais.

Porém, como já salientado, em edifícios de vários pavimentos, é mais adequado se utilizar lajes com nervuras em duas direções, geralmente ortogonais, moldadas no canteiro da obra. Este é o tipo de laje que é o foco do nosso trabalho.

Para este caso, Silva (2005) indica que normalmente se emprega, para o cálculo dos esforços solicitantes e dos deslocamentos transversais, o método da grelha equivalente, também conhecido como processo de Analogia de Grelha. Todavia, a NBR 6118/14 (item 14.7.7), indica que as prescrições relativas às lajes

maciças podem ser consideradas válidas para as lajes nervuradas, desde que sejam obedecidas algumas condições. Este último tipo de análise é chamado de processo simplificado. No item 2.5 falaremos sobre as indicações da NBR 6118.

Barboza (2008) aponta que, se necessário o projeto de modo mais refinado que aquele proporcionado pelo “cálculo simplificado”, deve-se calcular os esforços solicitantes e os deslocamentos considerando-se a laje como uma grelha, ou, o que é ainda mais refinado, considerar o método dos Elementos Finitos. Silva (2005), aponta que o mais adequado é que se use o método simplificado apenas no pré-dimensionamento estrutural.

2.4.2 Lajes pré-moldadas e moldadas in loco

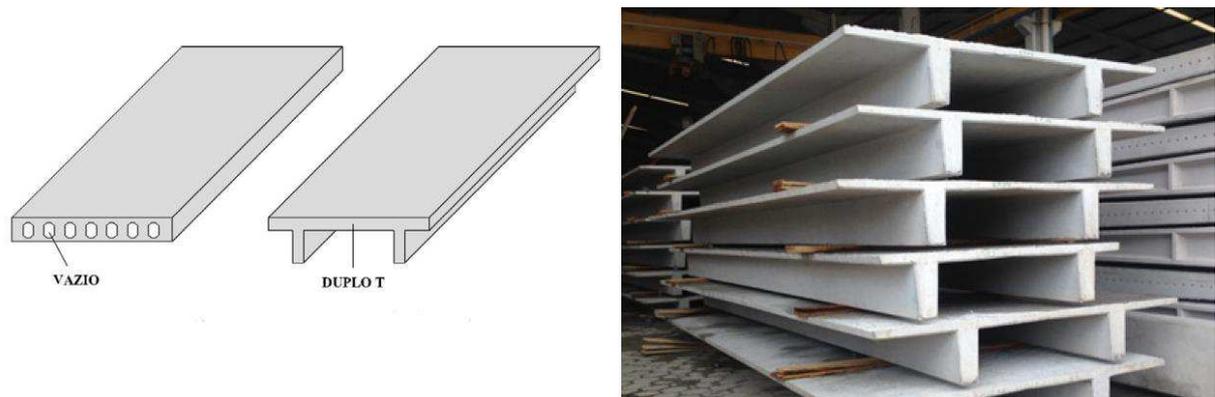
Outra diferenciação é pelo local de moldagem da laje, as lajes pré-moldadas são produzidas (em segmentos-faixa) em fabricas especializadas e transportadas ao local da obra, onde são içadas até sua posição. Logicamente devem ser dimensionadas adequadamente considerando-se a sua locomoção.

Todavia, lajes pré-moldadas não são adequadas a edifício altos, em virtude das dificuldades de movimentação vertical. Logo, o caso mais indicado é o de pavimentos moldados no canteiro. Como afirmam Pinheiro e Razente (2003), é necessário o uso de fôrmas e de escoramentos, além do material de enchimento. Além disso, segundo os autores, pode-se utilizar fôrmas para substituir os materiais inertes. Essas fôrmas já são encontradas em polipropileno ou em metal, com dimensões moduladas, devendo-se utilizar desmoldantes para facilitar sua remoção.

No caso de lajes moldadas no canteiro, deve-se ter ciência que a qualidade final da estrutura está relacionada ao rigor adotado na fase de montagem das formas e alocação das armaduras. Logo, deve se ter o pavimento adequadamente escorado, a estrutura do cimbramento deve ser nivelada com boa precisão, as armaduras alocadas nas posições corretas e com os seus espaçadores e aplicação de desmoldante caso se use cubas plásticas.

Junto a isso, como as dimensões das cubas plásticas utilizadas como forma das nervuras são produzidas em tamanhos padronizados, cabe ao projetista consultar os tipos disponíveis no mercado regional e escolher aquele mais adequados as condições do projeto.

Figura 14- lajes pré-moldadas alveolar e duplo t (ou π)



Fonte: Bastos (2006)

Figura 15- lajes moldadas no local com blocos de concreto celular (esquerda) e com cubas de polipropileno (direita).



Fonte: Barboza (2008)

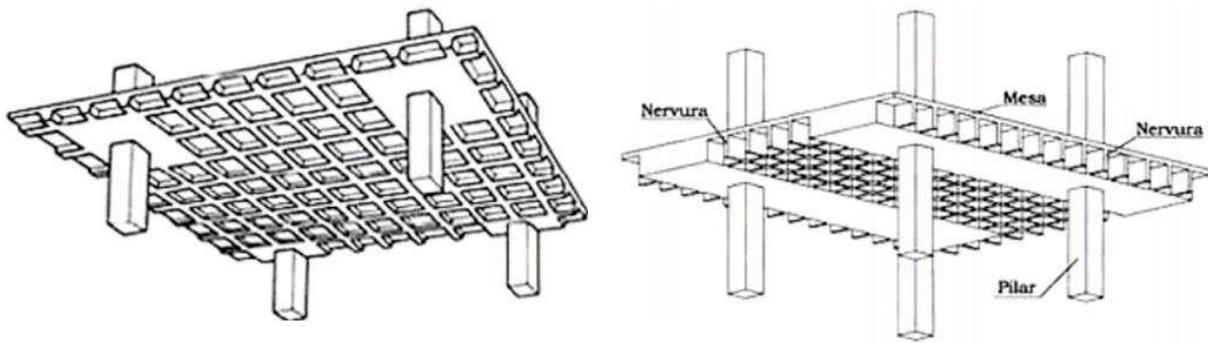
2.4.3 Lajes com apoios contínuos e apoios discretos

Podemos ainda ter tipologias de lajes diferindo em relação aos seus tipos de apoio. É mais comum, que se utilizem as lajes nervuradas se apoiando em vigas, com a possibilidade ainda de se optar por vigas chatas ou faixas vigas, neste caso as vigas ficam embutidas nas lajes, obtendo-se assim um teto livre e contínuo. Outra possibilidade é de se ter as lajes apoiadas em paredes estruturais. Nestes dois casos, lajes apoiadas sobre vigas ou paredes, temos exemplos de apoios contínuos.

A situação de apoio discreto ocorre quando se opta por utilizar a laje nervurada apoiada diretamente sobre pilares, podendo haver ou não a presença de capitéis. Porém, a região da laje próxima ao pilar deve ser maciça para resistir efetivamente aos esforços de punção. Alguns autores chamam essas lajes de

nervuradas lisas ou nervuradas cogumelo. Borowski (2005 apud Albuquerque e Pinheiro, 1998) afirma que a tendência dos projetos de estruturas é que se adotem cada vez mais lajes nervuradas cogumelo, reduzindo o consumo de concreto e trabalho com formas. O trabalho citado é uma excelente fonte de consulta sobre o assunto.

Figura 16- lajes nervurada lisa (esquerda) e com vigas chatas (direita)



Fonte: Barboza (2008)

2.5 NBR 6118: recomendações gerais para lajes nervuradas

A norma brasileira NBR 6118/2014, *Projeto de estruturas de concreto – procedimento*, traz as recomendações referentes às estruturas a serem projetadas em concreto armado, incluindo as lajes nervuradas. Assim, listaremos a seguir as principais considerações que devem ser feitas, segundo esta norma.

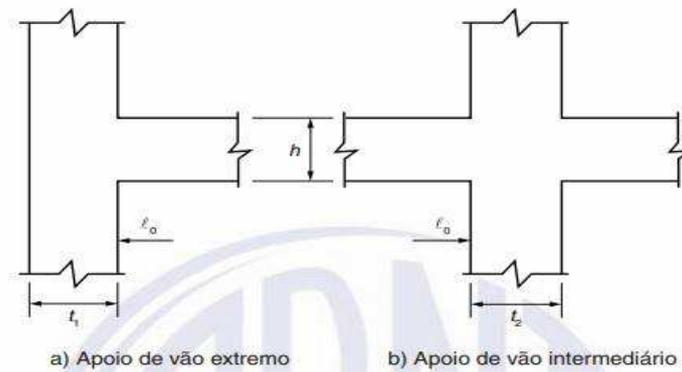
2.5.1 Vãos efetivos

No item 14.7.2.2, sobre o valor do vão a ser considerado, a norma diz que “quando os apoios puderem ser considerados suficientemente rígidos quanto à translação vertical, o vão efetivo deve ser calculado pela seguinte expressão”:

$$L_{ef} = L_0 + a_1 + a_2$$

Com a_1 igual ao menor valor entre $t_1/2$ e $0,30 \cdot h$. Assim como a_2 é igual ao menor valor entre $t_2/2$ e $0,30 \cdot h$. Conforme a figura a seguir, extraída da norma:

Figura 17 - vão efetivo de lajes



Fonte: NBR 6118 (2014)

2.5.2 Dimensões limites

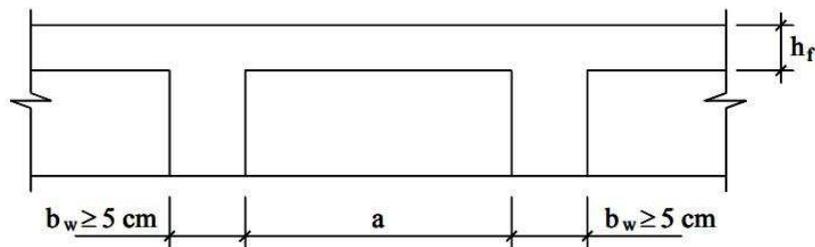
A norma elenca algumas características geométricas que devem ser consideradas e apresenta valores limites a serem respeitadas. Conforme consta em seu item 13.2.4.2, devem ser atendidos os seguintes requisitos nas lajes nervuradas:

- A espessura da mesa, h_f (figura 18), se não houver tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces nervuras (a) e não menor que 4 cm, veja a figura.
- Quando existirem tubulações embutidas de diâmetro máximo 10 mm, o valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser de 4 cm acrescido do valor do diâmetro ou duas vezes o diâmetro, em caso de cruzamento de tubulações.
- O mínimo a ser adotado para a espessura das nervuras (b_w) é de 5 cm.
- Não deve haver armadura de compressão em nervuras com espessura menor que 8 cm.
- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, além disso, a norma permite que se utilize os critérios de laje para a verificação do cisalhamento na região das nervuras.
- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras ($a+b_w$) entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas. Todavia, se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que

12 cm, há a possibilidade de verificação do cisalhamento nas nervuras adotando-se os critérios de laje.

- Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura de lajes maciças.

Figura 18 - dimensões de lajes nervuradas



Fonte: Silva (2005)

Os referidos limites mínimos de espessuras para lajes maciças, são listados no item 13.2.4.1 da norma e são reproduzidos a baixo:

- 7 cm para cobertura não em balanço.
- 8 cm para lajes de piso não em balanço.
- 10 cm para lajes em balanço.
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN.
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN.
- 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de $L/42$ para lajes de piso biapoiadas e $L/50$ para lajes de piso contínuas.
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

2.5.3 Análise estrutural

Segundo a norma, todas as prescrições relativas às lajes podem ser consideradas válidas, desde que sejam obedecidas as condições de 13.2.4.2, as quais foram citadas anteriormente. “Quando essas hipóteses não forem verificadas, deve-se analisar a laje nervurada considerando a capa como laje maciça apoiada em uma grelha de vigas” (NBR 6118, 2014). Sobre as lajes nervuradas unidirecionais,

ainda afirma que “devem ser calculadas segundo a direção das nervuras, desprezadas a rigidez transversal e a rigidez à torção”. Ainda continua, “lajes nervuradas bidirecionais (conforme ABNT NBR 14859-2) podem ser calculadas, para efeito de esforços solicitantes, como lajes maciças”.

A análise da laje nervurada admitindo-se os critérios de placa elástica de espessura constante, ou seja, como se fosse uma laje maciça, constitui a chamada análise simplificada.

2.5.4 Verificação ao cisalhamento

Outro ponto interessante na norma, conforme o seu item 17.4.1.1.2 – b), é que se pode dispensar o uso de armaduras específicas para combater o cisalhamento. No item 19.4.1, se confirma: “as lajes maciças ou nervuradas podem prescindir de armadura transversal para resistir as forças de tração oriundas da força cortante”. A dispensa das armaduras transversais de cisalhamento, obedece a seguinte condição referente a força cortante de cálculo:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1}$$

Sendo a força cortante resistente de cálculo dada por:

$$V_{Rd1} = [T_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) + 0,15 \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

Onde

$$T_{Rd} = 0,25 f_{ctd}$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c$$

$$\rho_1 = A_{s1} / (b_w \cdot d) , , \text{ não maior que } 10,021$$

$$\sigma_{cp} = N_{Sd} / A_c$$

Segundo a norma, nos casos de se utilizar armadura transversal de cisalhamento para resistir as tensões de tração oriundas da força cortante, aplicam-se os critérios estabelecidos no item 17.4.2, que tratam da verificação do estado limite último de cisalhamento em elementos lineares com $b_w < 5 \cdot d$. Logo, adota-se:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2}$$

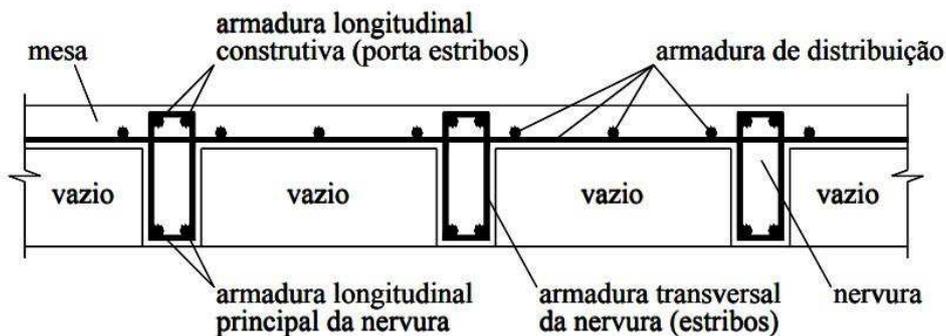
$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$$

Onde

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo, na seção. V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto, de acordo com os modelos indicados em itens na norma. Por fim, $V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$ é a

força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal, onde V_c é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça e V_{sw} a parcela resistida pela armadura transversal, de acordo com os modelos indicados na norma. Quanto ao espaçamento, é recomendado que os estribos em lajes nervuradas (armadura de cisalhamento), quando necessários, não devem ter espaçamento superior a 20 cm.

Figura 19 - laje nervurada com armadura transversal



Fonte: Bastos (2006)

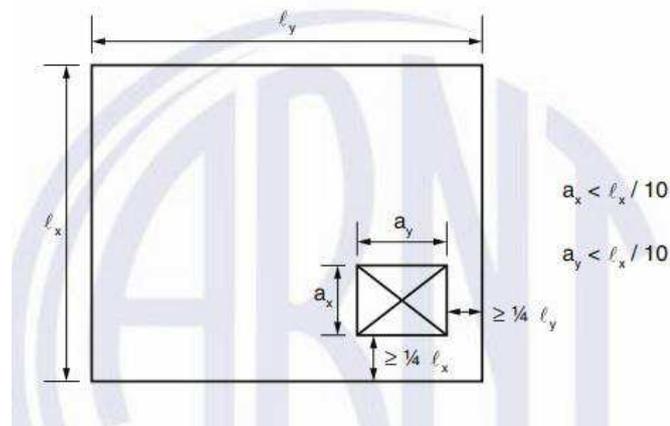
2.5.5 Aberturas e furos

Conforme salientam Carvalho e Pinheiro (2009), “furos e aberturas executados em qualquer estrutura dão origem a concentração de tensões que podem ser prejudiciais”. No item 13.25, a norma diz que:

Quando forem previstos furos e aberturas em elementos estruturais, seu efeito na resistência e na deformação deve ser verificado e não podem ser ultrapassados os limites previstos nesta Norma, obedecido o disposto em 21.3. De maneira geral os furos têm dimensões pequenas em relação ao elemento estrutural enquanto as aberturas não. Um conjunto de furos muito próximos deve ser tratado como uma abertura (NBR 6118, 2014, p.75).

Seguindo as considerações sobre o assunto, é dito na norma que “em lajes lisas ou lajes-cogumelo, a verificação de resistência e deformação previstas em 13.2.5 deve sempre ser realizada. Toda via, é dada a possibilidade de dispensa dessa análise em outros tipos de laje quando armadas em duas direções, desde que sejam respeitadas as seguintes condições:

Figura 20- furos em laje



Fonte: NBR 6118 (2014)

- As dimensões da abertura devem corresponder no máximo a 1/10 do vão menor (l_x).
- A distância entre a face de uma abertura e o eixo teórico de apoio da laje deve ser igual ou maior que 1/4 do vão, na direção considerada.
- A distância entre faces de aberturas adjacentes deve ser maior que a metade do menor vão.

Sobre tubulações embutidas em elementos estruturais, a norma diz que “consideram-se canalizações embutidas as que resultem em aberturas segundo o eixo longitudinal de um elemento linear, contidas em um elemento de superfície ou imersas no interior de um elemento de volume”. Sabendo disso, não se permite tubulações embutidas nos seguintes casos:

- Canalizações sem isolamento adequado, quando destinadas à passagem de fluidos com temperatura que se afaste em mais de 15 °C da temperatura ambiente, a menos que seja realizada uma verificação específica do efeito da temperatura.
- Canalizações destinadas a suportar pressões internas maiores que 0,3 Mpa.
- Canalizações embutidas em pilares de concreto, quer imersas no material ou em espaços vazios internos ao elemento estrutural, sem a existência de aberturas para drenagem.

3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO E EXECUÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO

Com base na teoria estudada ao longo do nosso trabalho, faremos algumas considerações importantes referentes às lajes nervuradas e que merecem atenção na etapa de projeto e na execução da estrutura. A nossa finalidade é elencar os aspectos mais relevantes e relacioná-los de forma sistêmica, com o intuito de se ter diretrizes que levam ao sucesso da construção da estrutura.

3.1 PROJETO

De posse do conhecimento das características do empreendimento e das necessidades decorrentes da sua utilização, os estudos do projeto estrutural passam por diversas fases com o gradual aumento no nível de detalhamento das informações. Esses estudos e análises devem ser desenvolvidos sempre de forma compartilhada com as demais disciplinas de projetos, com a finalidade de que todas as necessidades sejam atendidas da melhor forma possível, resultando numa harmonia entre os diversos sistemas que fazem parte do edifício.

3.1.1 Análise Estrutural

Uma das etapas iniciais do projeto é a concepção da estrutura portante do edifício, particularmente nos interessa aqui tratar da concepção do pavimento. Esta última, obviamente deverá estar em coerência com a concepção vertical. Na análise do pavimento, o projetista se defronta com diversas possibilidades quanto aos tipos de soluções para os painéis de lajes. A opção do uso de lajes nervuradas está baseada nas suas diversas vantagens para certas situações, porém deve-se também analisar as desvantagens decorrentes de sua aplicação.

Hoje em dia, contudo, há uma exigência arquitetônica cada vez maior pelo desenvolvimento de pavimentos com layout flexível, de forma a possibilitar diferentes usos aos ambientes. As lajes nervuradas são bem indicadas para essa finalidade, uma vez que permitem vãos maiores, reduzindo o número de vigas e pilares. Outra questão que viabiliza seu uso é a possibilidade de redução de peso e melhor desempenho mecânico, devido à alta inércia da seção transversal.

A ideia das lajes nervuradas é que as nervuras (onde estão as armaduras positivas) sejam tracionadas e as mesas comprimidas, sendo a seção transversal em forma de T. Assim, muitos autores sugerem que os painéis de laje sejam calculados como simplesmente apoiados no seu contorno, pois a seção T apresenta menor eficiência para resistir a momentos negativos. Quando as lajes são admitidas como engastadas (continuidade), as vezes se deixam trechos maciços próximos aos apoios, para evitar o uso de mesa inferior. Todavia, como o uso dos métodos mais avançados incorporados nos softwares comerciais, tem-se conseguido modelagens mais refinadas e análises mais detalhadas do comportamento da estrutura. Desta forma pode-se analisar o pavimento de forma contínua e detalhar armaduras específicas aos momentos negativos insurgentes, sem o uso de mesas inferiores.

Outro aspecto importante a se considerar na concepção estrutural usando lajes nervuradas, diz respeito à suas dimensões características como as espessuras da nervura e da mesa e o espaçamento entre nervuras. Conforme foi visto anteriormente, essas dimensões determinam a necessidade ou não de armaduras transversais. É interessante então seguir as indicações da NBR 6118/14 visando-se a dispensa dessas armaduras, uma vez que acarretam mais trabalhos na execução. Todavia, observa-se que dificilmente são utilizadas armaduras transversais nas lajes que estamos analisando, nervuradas bidirecionais apoiadas sobre vigas, sendo os esforços absorvidos pela grelha sem essas armaduras e transmitidos aos apoios.

Ressalta-se, ainda, que as lajes nervuradas com cubas plásticas apresentem algumas desvantagens como problemas acústicos, pois as mesas são de pequena espessura e formam cochas juntamente com as nervuras. Assim impactos na região da mesa, são sentidos acusticamente no pavimento inferior. Esse problema já não ocorre quando se tem o uso de blocos de material inerte, como EPS, concreto celular ou cerâmica.

Deve-se ainda ter em mente que, no caso de uso de cubas plásticas, o seu tamanho determina o distanciamento entre nervuras. As cubas são fabricadas em tamanho padronizado e os fabricantes fornecem diversos dados da seção transversal obtida com o uso dos moldes. Além disso, a determinação das dimensões da seção transversal é necessária para avaliação do peso próprio.

O uso do cálculo fazendo as considerações de laje maciça pode se justificar para obras pequenas, que muitas vezes são construídas com lajes unidirecionais com vigotas pré-moldadas. Entretanto, hoje possuímos de forma comercial um grande

desenvolvimento em softwares computacionais baseados em metodologias de cálculo mais sofisticados como a analogia da grelha e o MEF.

Figura 21 – Equação diferencial das placas

Equação Diferencial Fundamental das Placas

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = - \frac{\hat{p}(x, y)}{D}$$

ação aplicada

↑

rigidez à flexão da placa

↓

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \nu^2)}$$

↓

Onde a função $w(x,y)$ representa a deformada da placa

Fonte: Adaptado de Silva (2005)

Ou seja, no que se refere à análise do comportamento das lajes, devemos lembrar que são elementos do tipo placa e cuja solução exata da integração da equação diferencial (figura a cima) que relaciona os momentos ao carregamento aplicado, é praticamente impossível na maioria dos casos correntes. Desta forma alguns métodos foram desenvolvidos a partir da equação diferencial. Podemos citar os simplificados, que resolvem o problema a partir do processo de cálculo de placas elásticas por séries simples ou por séries duplas trigonométricas, que substituem $p(x,y)$ na equação.

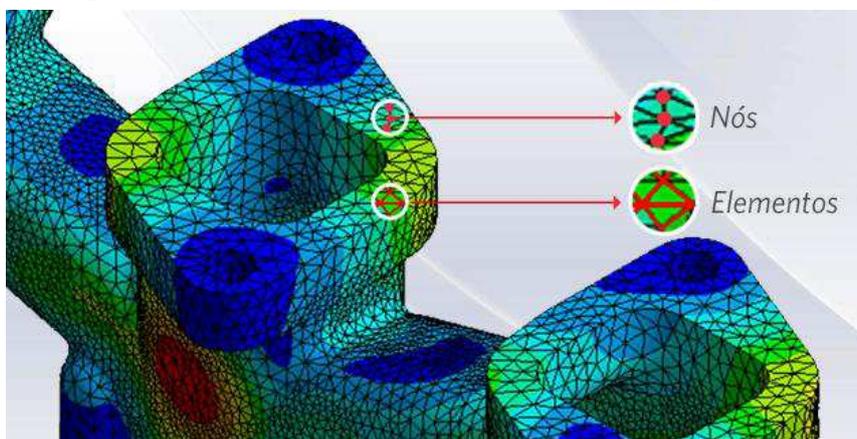
Com a resolução da equação por esse processo, foram implementadas tabelas de cálculo, como as de Marcus, Czerny e Bares, que foram amplamente utilizadas no passado e até hoje apresentam boa aplicação. Toda via, por esse processo, considera-se o concreto como um material de comportamento linear, não sendo considerados os fenômenos de fissuração e fluência, que devem ser posteriormente considerados.

Estas tabelas foram montadas em virtude da realidade vivida à sua época, com a limitação tecnológica para processamento de dados. Os métodos de cálculos mais sofisticados citados nesse trabalho, é importante ressaltar, tiveram sua teoria base desenvolvida também a essa mesma época (anos 40), porém não tiveram como ser implementados na prática devido a falta do recurso computacional. Após a

revolução tecnológica da década de 60, com o desenvolvimento do computador, foi-se possível trabalhar com procedimentos de cálculo como o método da grelha equivalente, o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos. Estes métodos, apesar de não apresentarem a solução exata da equação citada, dão soluções muito aproximadas.

Além da maior precisão na análise do comportamento elástico, esses métodos permitem a análise do pavimento de forma integrada, fazer as considerações da não linearidade física do concreto e das deformações por forças cortantes, além da possibilidade de trabalho com placas de geometria diversas.

Figura 22 – Malha de elementos finitos em peça



Fonte: ESSS, 2016, disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>

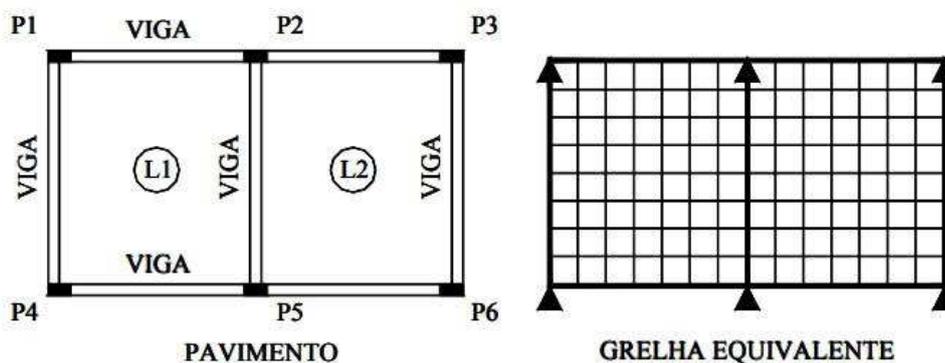
Dentre estes métodos, apresentam maior uso e implementação em softwares o método da grelha equivalente e o dos elementos finitos. No MEF, a placa contínua que representa a laje é discretizada em pequenos elementos interconectados em nós, a configuração obtida nesse arranjo é chamada de malha. A precisão relacionada ao método depende da quantidade de nós e do tamanho dos elementos, algo até intuitivo de se perceber. É certamente, o método mais utilizado nos softwares de cálculo e permite analisar lajes de qualquer geometria e tipo (lisas, apoiadas em vigas, maciças, nervuradas e etc.). Sobre esse contexto, adiciona-se o trecho a seguir:

Os softwares de simulação computacional vêm evoluindo e buscam aprimorar as análises abordadas pelo método, melhorando a escolha dos tipos e a geração da malha de elementos, as técnicas de modelagem, os critérios de aceitação, erros e a apresentação dos resultados, facilitando a utilização desta ferramenta. Dessa maneira, o conhecimento dos fundamentos do método é essencial para que juntamente com o domínio dos softwares sejam desenvolvidas boas práticas para uma aplicação consistente deste poderoso recurso no desenvolvimento e avaliação de produtos e projetos (MIRLISENNA, 2016, s/p).

O processo da grelha equivalente se baseia em dividir a laje numa malha de barras, compondo uma grelha. Assim como o MEF, possibilita uma análise integrada do pavimento, a consideração a influência da flexibilidade dos apoios e da rigidez à torção das vigas e das lajes. As ações então são consideradas atuando nas barras da grelha de forma distribuída ou, em outros casos, concentradas nos nós. As barras que compõem a grelha passam pelos centros geométricos das vigas e das nervuras, sendo que as vigas são consideradas com geometria retangular e as nervuras com seção em T. É uma metodologia amplamente implementada em programas computacionais, pois apresenta diversas vantagens, como:

Com o processo de analogia de grelha adequadamente programado para uso em microcomputador é possível analisar pavimentos de edifícios com grandes dimensões em planta, contornos não regulares, vazios internos (poços de elevadores, caixas de escada, etc.) e lajes com ou sem vigas (SILVA, 2005 apud CARVALHO 1994, p. 165).

Figura 23 – Grelha equivalente



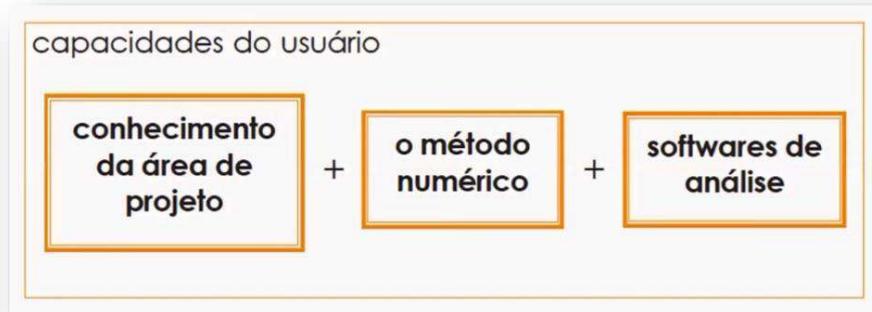
Fonte: Silva (2005)

Logo, com o apresentado, é justo que os engenheiros façam uso desses poderosos recursos disponíveis. Porém, ao contrário do senso comum, essa sofisticação tecnológica disponível não faz com que se exija menos conhecimentos teóricos do engenheiro. Muito pelo contrário, essas metodologias mais sofisticadas exigem a aplicação de conceitos mais complexos (que outrora não eram possíveis de serem aplicados por limitações tecnológicas) que devem ser de pleno domínio por parte do projetista. A figura 24 relaciona os conhecimentos necessários ao projetista.

É necessário ainda se ter consciência das limitações de cada software disponível, pois os programas comerciais têm seus algoritmos baseados em modelos de cálculo que atendam bem as estruturas mais utilizadas no mercado. Em caso de

estruturas complexas, deve-se fazer uma análise mais cuidadosa. Contudo, conclui-se que os softwares comerciais de cálculo, permitem maior agilidade no processo de projeto e com o tempo ganho pode-se ainda testar diferentes soluções estruturais cabíveis.

Figura 24 – Capacidades requeridas ao usuário



Fonte: ESSS, 2016, disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>

Além ainda das vantagens em relação ao desenvolvimento do projeto da estrutura em si, os melhores softwares comerciais trabalham utilizando a tecnologia BIM, o que permite ter uma compatibilização eficiente dos diversos sistemas e a conexão com softwares de outras disciplinas como gestão, orçamento, arquitetura e sistemas prediais.

Como já foi visto, a existência de diversos sistemas prediais faz surgir a necessidade de furos e aberturas nas lajes e embutimento de dutos. A análise pode ser feita de forma limitada pelas considerações indicadas na NBR 6118/14, ou de forma mais detalhada, com o auxílio de software computacional, que fornece o comportamento mais próximo ao real.

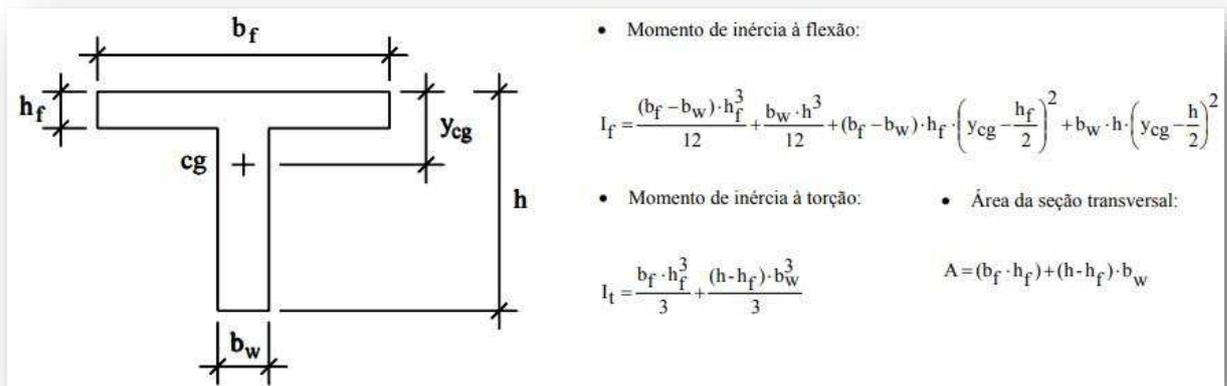
3.1.2 Dimensionamento

Como vimos, para se obter os esforços e deslocamentos da estrutura é preciso se definir a metodologia de cálculo adotada, que varia desde os processos simplificados indicados na NBR 6118, a analogia à grelha equivalente ou uma análise baseada no método dos elementos finitos (MEF). Vimos ainda que diversos autores indicam o uso do método simplificado apenas para o pré-dimensionamento das lajes, uma vez que podem ocorrer consideráveis diferenças nos esforços e deslocamentos, se compararmos com outros métodos.

O detalhamento das armaduras deve ser feito seguindo as indicações da NBR 6118/14 com vista aos aspectos construtivos, proporcionando facilidades na execução e garantindo características como cobrimento mínimo e espaçamento adequado entre as armaduras, uma vez que impactam diretamente na qualidade da estrutura.

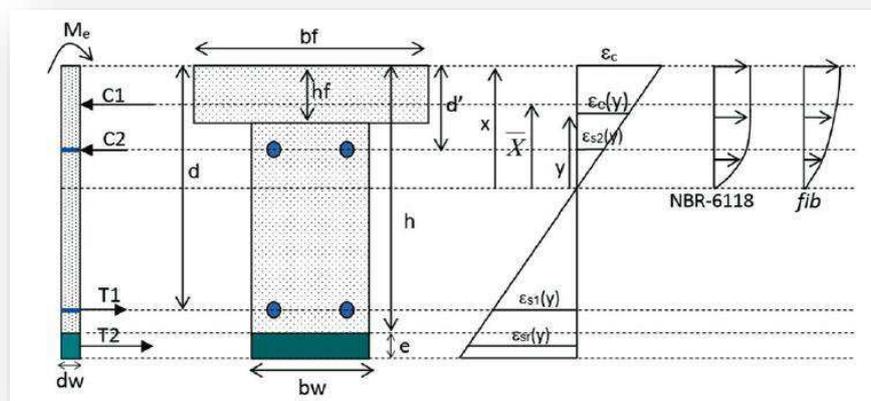
Como foi dito, a estrutura montada com a malha de elementos finitos ou com a grelha equivalente da laje, tem os elementos de barra que representam as nervuras com características de seção transversal em T. Podemos ver na figura abaixo a seção transversal considerada nos elementos de nervuras, com as expressões de cálculo da área da seção transversal e dos momentos de inércia, desconsiderando a presença das armaduras.

Figura 25 – Propriedades geométricas da seção em T



Fonte: Adaptado de Silva (2005)

Figura 26 – Equilíbrio na seção T



Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952016000100022&script=sci_arttext&tlng=pt

Assim deve-se ter que, mesmo a norma permitindo valores mínimos para a espessura das nervuras, deve-se considerar a adequada acomodação das armaduras nestes espaços, com seus espaçamentos e cobrimentos. Outro ponto a se destacar é que, mesmo os softwares atuais fornecendo relatórios e gerando os detalhamentos das armaduras, é vital a verificação pelo engenheiro. Essa questão se relaciona ao citado anteriormente sobre as limitações de cada ferramenta. Certos programas podem especificar armaduras que atendam às áreas de aço requeridas, mas que as bitolas escolhidas sejam incompatíveis com os locais de posicionamento na peça.

Entretanto, um projeto feito seguindo as recomendações citadas sobre concepção, análise estrutural e detalhamento, não tem muito valor se não é apresentado de forma clara nas pranchas e forneça todas as informações necessárias no canteiro para a execução. Desta forma, é de suma importância a geração de pranchas de desenhos com indicações claras das informações e que não gerem dúvidas durante a construção.

3.2 EXECUÇÃO

Como vimos, um projeto bem elaborado e apresentado em pranchas de forma clara e completa é de fundamental importância para a execução em canteiro. Nesta etapa serão utilizadas as técnicas construtivas mais viáveis em vista das peculiaridades do empreendimento. O bom resultado final, com a aplicação dessas técnicas, está relacionado ao grau de capacitação dos profissionais envolvidos, de uma boa administração dos recursos e coordenação das equipes.

Para um bom entendimento dos aspectos relacionados à execução de pavimentos em lajes de concreto armado, trataremos de diversas etapas importantes como montagem dos escoramentos, da estrutura de cimbramento, formas, posicionamento de passagens de instalações, colocação de armaduras, concretagem e desescoramento.

Sobre os materiais utilizados na estrutura para moldagem da laje (como escoras, cimbramento e cubas), podemos ter o caso de serem de propriedade da própria construtoras ou alugadas em empresas especializadas. A definição de qual dos casos é mais viável é feita em análises na fase de projeto. Para o caso de edifícios de vários andares, as estruturas utilizadas atualmente são metálicas em sua maioria. Os

escoramentos e cimbramentos em madeira ficaram restritos a obras de pequeno porte e em regiões que não se tenha fácil acesso a outras opções.

Convém ressaltar que as cubas plásticas têm um elevado índice de reutilização, ainda mais quando se adotam cuidados no manuseio. Maior ainda é a vida útil de escoramentos e cimbramentos metálicos. Assim, para empresas que trabalham especificamente no setor de edificações e utilizem corriqueiramente lajes nervuradas, pode ser mais interessante a compra desses elementos.

O escoramento da estrutura deve ser feito de forma adequada e em quantidade suficiente a resistir às cargas incidentes na execução. Preferencialmente deve-se seguir a um projeto elaborado pelo projetista estrutural, que elabora também um planejamento para a retirada das escoras. Algumas empresas que alugam as estruturas de escoramento e cimbramento, fornecem o serviço de elaboração do projeto para o escoramento da estrutura e sua posterior retirada.

Figura 27 – Sistema metálico de escoramento



Fonte: Metax, disponível em: <http://www.metax.com.br/escoramentos-id-2>

Figura 28 – Escoramento de estrutura



Fonte: simbratex, disponível em: <http://www.simbratex.com.br/equipamentos/escoramentos.html>

Para a execução da laje, quando apoiadas em vigas, inicialmente procede-se ao escoramento, montagem e nivelamento das formas das vigas as quais a laje se apoia. Na sequência, parte-se para a montagem do cimbramento da laje com seu adequado escoramento e nivelamento. No caso de uso de material inerte para preenchimento dos vazios, deve-se ter, sobre a estrutura de cimbramento, um tablado de madeira no qual se apoiaram os blocos de enchimento. Tratando-se de cubas plásticas, as mesmas se apoiam diretamente na estrutura metálica, sendo fácil seu manuseio devido pequeno peso.

Uma vez que se tenha a estrutura metálica de apoio montada (e o tablado, no caso de blocos inertes), faz-se a colocação das formas da laje, que são os blocos ou as cubas de polipropileno. A aplicação dos blocos tende a ser mais demorada, uma vez que deve-se ter um cuidado para não quebrá-los e a alocação deve garantir o espaçamento adequado entre eles, facilitado pelo uso espaçadores especiais, que também tem a finalidade de manter os blocos fixos durante a concretagem.

As cubas são fáceis de serem colocadas sobre o cimbramento e pelo seu confinamento lateral, encaixando-se entre suas as bordas, mantêm-se fixas durante as movimentações de trabalho. Importante em seu uso é a aplicação de desmoldante para facilitar a retirada dos elementos e permitir maior durabilidade. Deve-se evitar também a utilização de pregos nas formas. Não é recomendável o uso de cubas velhas e com defeitos como buracos ou trincas, uma vez que resultam em vazamentos de concreto. Às vezes quando o formato da laje não é retangular, é necessário cortar as cubas em formas diferentes para se ter uma conformação ao contorno. Ainda, antes de serem colocadas as armaduras, é necessário deixar as passagens referentes a instalações elétricas, hidráulica e etc. Geralmente essas passagens são feitas em tubos de PVC e caixilhos de madeira. Pode ser que se tenha também eletrodutos embutidos na mesa da laje.

Figura 29 – Vista superior de pavimento em lajes nervuradas

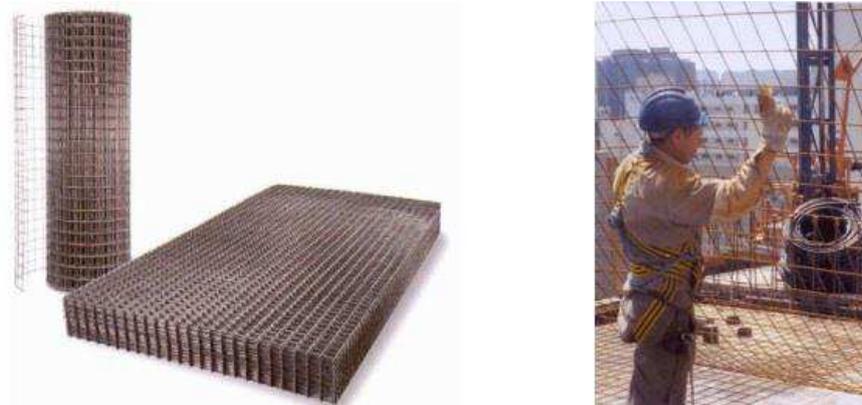


Fonte: Pini (2011), disponível em: <http://equipedeobra17.pini.com.br/construcao-reforma/38/lajes-nervuradas-225239-1.aspx>

Terminada toda a etapa anterior, que basicamente envolve os serviços dos carpinteiros, procede-se à montagem das armaduras. Primeiramente coloca-se as armaduras positivas que são alojadas nas nervuras, todavia pode-se ter o caso de utilização de armadura transversal, logo deve-se fazer a montagem do conjunto composto pelas armaduras positivas, estribos e porta-estribos. Depois de montado o conjunto, é posicionado nas nervuras.

Existem ainda as armaduras destinadas aos momentos negativos devido à continuidade ou então armaduras construtivas para evitar fissuração excessiva. Estas armaduras são posicionadas nos contornos, sobre os apoios e devem ser bem amarradas para evitar que se soltem durante a concretagem. Na verdade, antes dessas armaduras, coloca-se as telas (armaduras de distribuição) sobre as mesas das lajes. Em todos os casos deve-se ter o emprego dos espaçadores para garantir os cobrimentos necessários às armaduras.

Figura 30 – Telas de aço



Fonte: Bastos (2006)

Uma boa construção deve sempre prezar pela limpeza, assim devem ser retiradas as sujeiras que inevitavelmente ficam sobre as formas, tais como pregos, restos de arame e pedaços de madeiras ou tubos de PVC. A permanência destes materiais nas formas da estrutura pode incorrer no surgimento de “bicheiras”, que são nichos onde o concreto não se adensa adequadamente.

A concretagem, de preferência, só deve iniciar após a conclusão das etapas anteriores, com atendimento de todas as condições necessárias à sua realização. Isto é importante para evitar que se tenha, em uma mesma área, o trabalho de carpinteiros e armadores concomitantemente à concretagem, o que causa vários transtornos. Além disso, como se viu em outros tópicos, as lajes correspondem a grandes volumes de concreto e dessa forma é necessário um bom planejamento das concretagens, devendo-se começar pelo início da manhã. Esse planejamento deve ser feito pelo engenheiro, o qual solicitará os caminhões betoneira da usina de concreto de acordo com o volume programado e com a velocidade prevista na execução, evitando-se a falta ou o excesso de caminhões na obra.

Este aspecto é importante pois, se por um lado a falta de caminhões betoneira gera o atraso da concretagem, o excesso de carros estacionados pode levar ao vencimento do concreto, o qual inicia a pega antes do lançamento. Desta forma, o primeiro caso gera problemas relacionados a horário de trabalho, seja por extrapolar as jornadas dos operários ou por causar incomodo à vizinhança durante a noite. Os dois casos devem ser evitados, pois podem resultar em problemas judiciais. Já no caso de se ter um excesso de caminhões por falta de planejamento, pode-se ter um grande prejuízo financeiro devido à perda de concreto.

O planejamento também serve para se prever a ocorrência das juntas de concretagem, que devem ser evitadas sempre que possível. Essas juntas surgem devido ao interrompimento da concretagem por algum motivo, tendo a sequência em outro dia. É indicado que essa questão seja discutida com o projetista estrutural, que deve sugerir os locais mais adequados para essas juntas.

Além do mais, deve-se ter na concretagem cuidados referentes ao lançamento e adensamento, com adequada vibração do concreto para evitar que se tenham vazios nas peças. No caso das lajes nervuradas, cuidado maior deve ser dado na região das nervuras, uma vez que são regiões estreitas, propícias à ocorrência de vazios na região inferior.

Após a concretagem finalizada, é indicado que se siga com o molhamento da laje para colaborar na cura do concreto e evitar a formação de fissuras por retração. Muitas vezes se utilizam jornais dispostos ao logo da superfície da laje e que são molhados algumas vezes por dia, por cerca de três a quatro dias.

A desforma da estrutura é facilitada quando se aplicam adequadamente os desmoldantes nas cubas, além de se ter um melhor acabamento. Na figura abaixo, mostra-se a retirada da cuba com uso de “pé de cabra”, o qual deve ser manuseado com cuidado para não danificar a forma. Já o escoramento deve ser retirado de forma adequada em etapas sucessivas, conforme o desenvolvimento da resistência do concreto, assim deve-se seguir o recomendado no projeto estrutural. Dessa forma visa-se garantir a segurança estrutural e também evitar a ocorrência de deformações excessivas na estrutura.

Figura 31 – Retirada de molde



Fonte: Pini (2011), disponível em: <http://equipedeobra17.pini.com.br/construcao-reforma/38/lajes-nervuradas-225239-1.aspx>

4 EXEMPLO DE EDIFÍCIO COM PAVIMENTOS EM LAJES DE CONCRETO ARMADO

Neste momento apresentaremos o exemplo de uma obra localizada na cidade de São Luís – MA. Trata-se de um edifício residencial de apartamentos executado em estrutura de concreto armado e com lajes do tipo nervuradas apoiada em vigas. O autor participou da execução durante oito meses como estagiário e de acordo com as observações de campo, conversas com engenheiros da construtora e projetistas, além do registro de imagens durante o decorrer da construção, serão apresentadas as características da obra e feitas algumas considerações importantes frente ao tema do nosso trabalho.

O edifício tomado como objeto de estudo está localizado na rua Olimpo no bairro Renascença, é um empreendimento da Construtora Constans Ltda, empresa ludovicense que atua basicamente no seguimento de prédios de apartamentos de alto padrão. O edifício é composto por subsolo destinado a garagem, pavimento térreo destinado a áreas de lazer, dois pavimentos garagens, quatorze pavimentos tipos e um duplex, a figura 32 apresenta a imagem da maquete. A estrutura, em concreto armado, foi projetada pela Azevedo Engenharia Ltda. O início da obra se deu em meados de junho de 2017 e atualmente está na fase de execução da estrutura.

Figura 32 – Maquete do edifício



Fonte: Autor

As lajes que compõem a estrutura são, em sua maioria, nervuradas e apoiadas em vigas. Em alguns trechos dos pavimentos, tem-se pequenas lajes maciças. Nos pavimentos tipos, tem-se quatro apartamentos por andar, como se pode ver na figura 33. A estrutura, na verdade, possui uma junta no meio, trabalhando então como duas torres independentes. Na figura 34, mostra-se a planta de forma deste mesmo pavimento. As lajes maciças se encontram nas regiões próximo aos elevadores, nas varandas e em lajes destinadas ao suporte de condensadores de ar-condicionado. A figura 35 mostra uma laje maciça na região do hall dos elevadores com as instalações elétricas já embutidas.

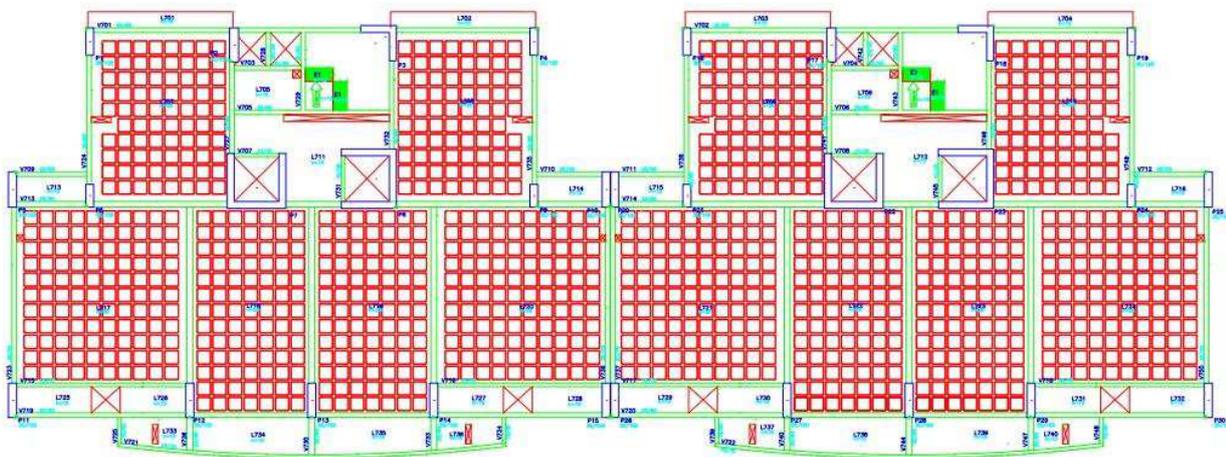
Figura 33 – Planta-baixa do pavimento tipo



Fonte: Construtora Constans

Figura 34 – Planta de forma do pavimento tipo

FORMAS TIPO – N700 a N713 – Níveis 37,87 a 79,99



Fonte: Construtora Constans

Figura 35 – Laje maciça com instalações embutidas



Fonte: Autor

No que diz respeito ao cálculo estrutural, as lajes dos pavimentos foram analisadas pelo método da grelha e também por método dos elementos finitos, com auxílio do software comercial TQS. Conforme indicou o projetista, essas ferramentas permitem uma otimização do processo de análise e apontou ainda como, ponto importante, a questão de adequação às dimensões mínimas segundo a norma para as nervuras, no sentido de se ter um bom desempenho e maior durabilidade da estrutura. A rigidez da laje quanto resistência aos esforços horizontais que atuam no edifício não foi considerada nos cálculos, mas poderia.

A questão da durabilidade citada a cima, envolve a questão dos cobrimentos mínimos das armaduras. Como as nervuras geralmente são esbeltas, deve-se ter atenção à garantia do alojamento das armaduras necessárias, com o espaçamento e cobrimento adequados. Caso não se tenha esse controle, podem ocorrer situações inadequadas durante a execução, como não envolvimento completo das armaduras pelo concreto e aparição de nichos vazios. A justificativa às ressalvas anteriores está nas condições ambientais agressivas de nossa região, devido à proximidade do mar, com alto potencial corrosivo do ar que circula na atmosfera.

Quanto ao traço do concreto a ser utilizado na moldagem das lajes, deve-se ter um estudo específico às condições da estrutura, com vista a se ter um fácil lançamento e bom adensamento nas nervuras, que são regiões esbeltas e propícias

ao surgimento de vazios, na falta de cuidado. Na figura 26, pode-se ver o problema do surgimento de vazios (chamadas no canteiro de “bicheiras”) na região da nervura.

Figura 36 – Vazios na laje



Fonte: Autor

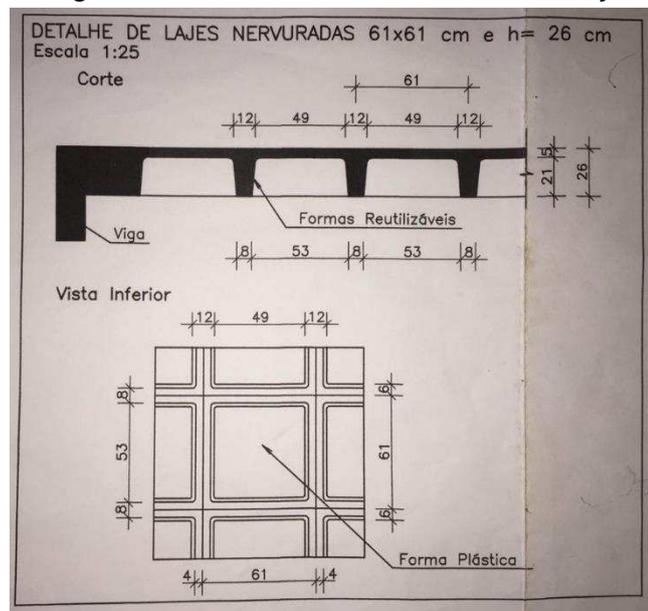
Desta forma, os pavimentos da obra em questão temos lajes nervuradas em duas direções e foram utilizadas formas de polipropileno para a moldagem das nervuras. Para fazer o escoramento, utilizou-se escoras metálicas de propriedade da construtora (assim como as cubas). Já o cimbramento é feito com o uso de uma estrutura metálica alugada, todavia, em alguns casos usou-se cimbramento de madeira com tablado de compensado sobre o mesmo. O sistema de cimbramento metálico usado (figura 37) é de montagem relativamente rápida e fácil. De acordo com o projeto estrutural, foi especificado concreto com 30 Mpa de resistência, o qual é fornecido por empresas especializadas. Já o aço é fornecido cortado e dobrado ao canteiro.

Figura 37 – Cimbramento e escoramento metálicos



Fonte: Autor

Figura 38 – Detalhe das nervuras da laje



Fonte: Construtora Constans.

Devido às dimensões características da seção transversal (veja a figura 38) e o espaçamento entre nervuras, foi dispensada a presença de armaduras de cisalhamento nas nervuras conforme os critérios da norma, o que foi confirmado na análise estrutural. Estas armaduras, na verdade, dificilmente são utilizadas nas lajes nervuradas apoiadas em vigas, devido às inúmeras dificuldades construtivas. Além disso, com a disponibilidade de ferramentas sofisticadas de cálculo, que permitem modelagens precisas, consegue-se desenvolver a grelha sem uso de armaduras transversais.

A imagem 39, mostra a execução de uma laje, com as formas e armaduras prontas. Podemos observar ainda outro ponto importante, que é a questão dos rebaixos na laje para regiões de banheiros. Nessas regiões, não se tem o uso de nervuras, mas de lajes maciças. Na figura 40, mostra-se como fica o lado inferior da laje após a desforma. Todavia essa questão de rebaixo deve ser prevista e analisada em projeto, podemos dizer ainda que faz parte do processo de compatibilização dos sistemas e como vimos a tendência futura é o uso intensivo da tecnologia BIM. O software estrutural, nesse caso, faz uma discretização da região maciça diferente da região nervurada.

Figura 39 – Formas e armaduras da laje



Fonte: Autor

Figura 40 – Vista inferior da laje



Fonte: Autor

No que se refere à execução do pavimento, geralmente procedia-se conforme o exposto no item 3.2, montando-se primeiramente as vigas de contorno e depois as lajes, como se pode ver na figura 37 à esquerda. Neste sentido, o trabalho era feito em duas etapas para cada pavimento, ou seja, da junta até as extremidades.

Obviamente, porém, nem sempre era possível a conclusão da concretagem para tal etapa no mesmo dia, dando-se continuidade no dia seguinte. Desta forma, conforme discutido anteriormente, surgiam juntas de concretagem, as quais devem ser previamente planejadas e evitadas. Todavia, problemas no planejamento, incorreram no surgimento de diversas juntas. Esses problemas eram relacionados, por exemplo, a atrasos no início de concretagens ou à concretagens marcadas sem o término completo das atividades de formas e ferragens. Outro problema também verificado no que diz respeito a concretagem, relaciona-se à deficiência na programação dos caminhões betoneira na obra, causando falta ou excesso de concreto para lançamento.

Esses inconvenientes infelizmente ainda fazem parte do ambiente da construção civil em geral e estão presentes na maioria dos canteiros de obra do Brasil. Não é nosso intuito aqui tratar do contexto de desenvolvimento da construção civil, mas pode-se afirmar que faz parte da luta do engenheiro de obras enfrentar esses desafios e gerenciar os recursos disponíveis que geralmente são reduzidos.

Sobre a concretagem, deve-se ter os cuidados gerais para evitar problemas. Primeiramente, como foi dito anteriormente, o concreto a ser utilizado deve ter um traço adequado às condições geométricas das peças. No lançamento, evitar altura excessiva na queda do concreto, o que pode ocasionar segregação da mistura, além do fato de o impacto do concreto no pavimento provocar o despontamento das armaduras. Cuidado maior deve-se ter no adensamento, que exige vibração adequada para preenchimento do concreto principalmente nas nervuras. A estrutura do cimbramento das formas deve estar devidamente nivelada e travada, além de apresentar estanqueidade para evitar vazamentos. A imagem 41 mostra a execução de uma concretagem. Como se indicou no tópico 3 do trabalho, não se deve usar cubas velhas com furos ou rachaduras, caso contrário pode ocorrer o que se mostra na figura 42.

Figura 41 – Concretagem de laje



Fonte: Autor

Figura 42 – Vazamentos de concreto pelas cubas



Fonte: Autor

Nas lajes de garagem, optou-se por não fazer a execução do contra piso. Em vez disso, aumentou-se na espessura da laje e foi feito o polimento da superfície, a qual apresenta-se como piso acabado. Nessas lajes, o serviço de lançamento do concreto e seu acabamento foi feito por uma empresa terceirizada especializada em execução de pisos. O polimento é feito algumas horas após o lançamento do concreto, com máquina específica para a tarefa, conforme podemos ver na figura 43.

Figura 43 – Serviço de acabamento na superfície da laje



Fonte: Autor

Na imagem abaixo (fig. 44), podemos ver o resultado final de um pavimento após a desforma.

Figura 44 – Laje após desforma



Fonte: Autor

4 CONCLUSÃO

Com base no exposto ao longo do trabalho, podemos observar que a grande utilização de lajes nervuradas em nossa região ultimamente, se justifica pelas diversas vantagens que esse sistema apresenta. Todavia, o sucesso em sua utilização depende do atendimento a vários fatores que se iniciam desde a fase de projeto à execução.

Assim, com o devido crescimento nas demandas por moradia e a conseqüente verticalização de áreas mais valorizadas do meio urbano, tem-se utilizado muito esse sistema estrutural nos edifícios residenciais. Estes tipos de edifícios, como se viu no item 2.3, apresentam particularidades devido aos diversos sistemas prediais existentes e que se relacionam com a estrutura. Junto a isso, vimos que surgem diversos desafios quanto ao processo de compatibilização entre as diversas disciplinas e que hoje possuímos a nossa disposição a chamada tecnologia BIM que se propõem a facilitar esses entraves.

Sobre os principais critérios teóricos relacionados às lajes nervuradas, deve-se ter atenção as indicações da NBR 6118/14, as quais tratamos dos principais aspectos no item 2.5. Diante das recomendações normativas, o projetista tem condições de desenvolver seu trabalho de forma orientada e segura. No cálculo estrutural, pode-se hoje trabalhar com métodos mais sofisticados de cálculo como a analogia de grelha e método dos elementos finitos que estão implementados nos melhores softwares computacionais do mercado.

No processo construtivo, é necessária uma postura de maior comprometimento por parte dos engenheiros de obra no que diz respeito ao controle tecnológico, buscando sempre a aplicação rigorosa de sistemas de qualidade e a boa prática da engenharia, tudo isso no intuito de atender os padrões de desempenho requeridos ao empreendimento e com os menores custos possíveis.

Desta forma, esta era a proposta do nosso trabalho, possibilitar uma visão holística e sistêmica ao leitor sobre o projeto e a execução de lajes nervuradas, a partir da consideração dos aspectos referentes ao próprio sistema em si, a forma como se relaciona com os demais projetos e as metodologias utilizadas para sua materialização no canteiro de obra.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR. 6118: **Projeto de estruturas de concreto—Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR. 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR. 6123: **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681:2003. **Ações esesegurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR. 8953: **Concretos para fins estruturais- Classificação por grupos de resistência**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR. 14860-1: **Laje pré-fabricada – Pré-laje – Requisitos, Parte 1: Lajes unidirecionais**. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR. 14860-2: **Laje pré-fabricada – Pré-laje – Requisitos, Parte 2: Lajes bidirecionais**. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR. 12655: **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- ALBUQUERQUE, A. T. & PINHEIRO, L. M. **Análise de alternativas estruturais para edifícios**. In: 40º Congresso Brasileiro do Concreto, 1998, Rio de Janeiro. Anais 13p.
- ANDRADE, Max Lira Veras de X.; RUSCHEL, Regina Coeli. **BIM: conceitos, cenário das pesquisas publicadas no Brasil e tendências**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.
- BARBOZA, Marcos Robiati. **Concepção e análise de estruturas de edifícios em concreto armado**. Relatório Final de Iniciação Científica, n. 07, 2008.
- BASTOS, Paulo. **Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado**. São Paulo, 2006.
- BOROWSKI, Gustavo da Costa. **Calculo de deslocamento em lajes nervuradas**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Calculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 3. Ed. Edufscar: São Carlos, 2007.
- CARVALHO, Roberto Chust; DE FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118: 2003**. EdUFSCar, 2014.
- CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Calculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 2. Ed. Pini: São Paulo, 2009.

COELHO, Sérgio Salles; NOVAES, Celso Carlos. **Modelagem de Informações para Construção (BIM) e ambientes colaborativos para gestão de projetos na construção civil**. In: Anais do VIII Workshop Nacional de Gestão do Processo de Projeto na Construção de Edifícios, São Paulo, 2008.

CORDOVIL, F. A. B.; FUSCO, P. B. **Armadura de cisalhamento para punção em placas de concreto**. In: XXVII JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 1995, Tucumán. Anais.

CHINEM, RODOLPHO MENDONÇA. **AValiação da Estabilidade Global de Edifícios**. Monografia. Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2010.

FABRICIO, Márcio Minto. **Projeto simultâneo na construção de edifícios**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, v. 350, 2002.

FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Sistemas estruturais de lajes sem vigas: subsídios para o projeto e execução**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1989.

GIONGO, José Samuel. **Concreto armado: Projeto estrutural de edifícios**. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

GRAZIANO, Francisco Paulo. **Compatibilização de projetos**. Instituto de Pesquisa Tecnológica–IPT. Tese de Doutorado. São Paulo, 2003.

KAEFER, Luís Fernando. **A evolução do concreto armado**. São Paulo, p. 43, 1998.

MARTHA, Luiz Fernando. **Métodos básicos da análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Campus, 2010.

MELGES, J. L. P. **Análise experimental da punção em lajes de concreto armado e protendido**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

MIKALDO JR, Jorge; SCHEER, Sergio. **COMPATIBILIZAÇÃO DE PROJETOS OU ENGENHARIA SIMULTÂNEA: QUAL É A MELHOR SOLUÇÃO?** Gestão & tecnologia de projetos. 3. Ed. N. 1. P. 79-99, 2008.

SILVA, M. A. F.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; CARVALHO, R. C. **Principais tipos de armadura de cisalhamento de lajes sem vigas: vantagens e desvantagens de cada um deles**. In: V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2003, São Paulo.

PICCHI, F.A. **Sistemas da qualidade: uso em empresas de construção de edifícios**. 1993. 462 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

SANTOS, Roberto Eustaquio dos. **A Armação do Concreto no Brasil: história da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. 2008. 336 f. Dissertação (Pós-Graduação em Educação: “Conhecimento e Inclusão Social”) - Faculdade de Educação da UFMG, Belo Horizonte.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 239 f. Dissertação (Pós-Graduação: “Construção Sivil”) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SOCIETY OF CONCURRENT PRODUCT DEVELOPMENT (SCPD). Disponível em: <<http://www.soce.org/>>. Acesso em: 15 set. 2017.

