



**FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DÊNIS JOSÉ RODRIGUES DE SOUZA
JÂNIO SILVA JÚNIOR**

**ANALISE COMPARATIVA ENTRE O USO DE UM
SOFTWARE COMPUTACIONAL DO CÁLCULO MANUAL
NO DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS**

PUBLICAÇÃO Nº: 9

**GOIANÉSIA / GO
2020**



**DÊNIS JOSÉ RODRIGUES DE SOUZA
JÂNIO SILVA JÚNIOR**

**ANALISE COMPARATIVA ENTRE O USO DE UM
SOFTWARE COMPUTACIONAL DO CÁLCULO MANUAL
NO DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS**

PUBLICAÇÃO Nº: 9

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

ORIENTADOR: ROBSON DE OLIVEIRA FELIX

GOIANÉSIA / GO: 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, Dênis José Rodrigues de; SILVA JUNIOR, Jânio.

Estudo comparativo entre o uso do cálculo manual e de um software computacional no dimensionamento de lajes maciças. 2019, xvii, 46P, 297 mm (ENC/FACEG, Bacharel, Engenharia Civil, 2019).

TCC – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|-------------------|-------------------------|
| 1. Lajes Maciças | 2. Cálculo por Software |
| 3. Cálculo Manual | 4. Dimensionamento |
| I. ENC/FACEG | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, D. J. R; SILVA JUNIOR, J. Estudo comparativo entre o uso do cálculo manual e de um software computacional no dimensionamento de lajes maciças. TCC, Publicação ENC. PF-001A/20, Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, GO, xvii, 46p. 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Dênis José Rodrigues de Souza

Jânio Silva Junior

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo comparativo entre o uso do cálculo manual e de um software computacional no dimensionamento de lajes maciças.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2020

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

Dênis José Rodrigues de Souza
denistop1@hotmail.com
76385-370 - Goianésia/Go-Brasil

Jânio Silva Júnior
janiojsj@gmail.com
76380-184 – Goianésia/Go - Brasil

**DÊNIS JOSÉ RODRIGUES DE SOUZA
JANIO SILVA JUNIOR**

**ANALISE COMPARATIVA ENTRE O USO DE UM
SOFTWARE COMPUTACIONAL DO CÁLCULO MANUAL
NO DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS**

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

APROVADO POR:

**ROBSON DE OLIVEIRA FELIX, Especialista (FACEG)
(ORIENTADOR)**

**IGOR CÉZAR SILVA BRAGA, Mestre (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LUANA DE LIMA LOPES, Mestre (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: GOIANÉSIA/GO, 10 de JUNHO de 2020.

*Dedico este trabalho:
A Deus, pois, sem ele não teria forças para vencer essa longa jornada.*

Dênis José Rodrigues de Souza

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me agraciar de muita saúde, paz, sabedoria e paciência, somente por essa graça foi que consegui vencer a batalha e chegar até aqui mesmo à frente de muitas adversidades. A minha esposa Luciana, que sempre me apoiou nos momentos de dificuldades e nunca mediu esforços para ajudar no que fosse preciso e estivesse em teu alcance. A minha filhinha Isabela, que mesmo com tão pouca idade foi muito compreensiva ao entender que inúmeras vezes o papai tinha que estudar e não podia brincar. Aos meus pais Sidesil e Maria que pela graça de Deus me concederam a vida e sempre me ensinou o caminho certo e nunca me deixou desistir. A minha irmã Daniela e minha cunhada Lucélia pelo incentivo e motivação em suas palavras dizendo que eu era capaz de vencer esta luta.

A todos os professores que fizeram parte dessa jornada acadêmica em especial a nosso orientador Robson Felix que teve bastante paciência conosco e nos trilhou o caminho da vitória, que nunca mediram esforços para contribuir com nosso aprendizado dentro e fora da sala de aula, agradeço também ao Igor e Luana por terem aceito participar de nossa banca. Agradeço meus amigos de curso que também fizeram parte dessa luta, principalmente ao Jânio que desde de o início me apoiou nessa caminhada, inclusive faz parte desse trabalho. A todos meus amigos que já conhecia antes do início acadêmico, principalmente a Paulo Henrique que em momentos difíceis não mediu esforços para ajudar.

Por fim agradeço a todos os meus familiares e colegas de trabalho que fizeram parte dessa batalha, pois ninguém alcança a vitória sozinho.

Obrigado, Dênis José Rodrigues de Souza.

*Dedico este trabalho:
Ao Deus que sirvo e minha família.*

Jânio Silva Júnior

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Deus que sirvo, a minha saúde, paz, vida e minha família. Agradeço a meus pais, Jânio e Noêmia por me conceder a presente vida, por me fortalecer nos momentos difíceis e nos caminhos que trilhei e em inúmeras etapas e decisões tomadas. Agradeço a minha esposa Gabriela, pelo apoio e compreensão, a minha irmã Natane e meu Cunhado Laudimiro pelos momentos de fortalecimento e descontração.

Agradeço a todos professores que esteve presente em nesta jornada acadêmica, em especial, imensamente grato ao nosso orientador Robson Felix, que teve bastante sabedoria e compreensão conosco e nos deu grande auxílio e atenção nas dificuldades enfrentadas. Agradeço também aos professores Igor César e Luana por ter aceito o convite de estar em nossa banca. No decorrer acadêmico conheci diversas pessoas que de certa forma se tornaram especiais diversificadas mentes e inúmeros pensamentos, agradeço ao Dênis que sempre me fortaleceu em diversas ocasiões e juntos conseguimos finalizar esta graduação.

Do mais não poderia deixar de agradecer a FACEG que de certa forma faz parte da realização desta graduação.

Obrigado, Jânio Silva Júnior

“O mundo é fruto da nossa imaginação será que somos deuses ou a sua criação”

Baco Exu do Blues

RESUMO

Ao desenvolver o projeto de uma edificação, existem critérios e etapas fundamentais para a obtenção e fundamentação de uma edificação segura e sustentável. O desenvolvimento de um projeto estrutural, é conjugado como uma das principais etapas existente no projeto, pois nele está o cálculo de lajes, e a partir dela deslancha o dimensionamento de outros elementos presente na edificação. Os cálculos manuais para determinação estrutural de uma laje sempre foram muito utilizados, mas no presente vem sendo substituído por softwares computacionais. Os softwares nos trazem agilidade e segurança nos cálculos. Com as citações mencionadas, o presente trabalho tem por objetivo a realização de um estudo comparativo para o desenvolvimento de cálculo para laje maciça. Os métodos distintos utilizados, com a finalidade de se obter o cálculo de maior confiabilidade para o desenvolvimento do cálculo deste elemento. O presente comparativo foi entre o cálculo manual pela teoria das placas e por meio do software EberickV10, onde realizamos o cálculo pelos dois métodos, avaliando as reações de apoio, área de aço, momentos fletores e flechas das lajes de uma edificação. A presente verificação resultou em valores numéricos divergentes entre os dois métodos, apontando que ao se calcular com software se obtém um melhor comportamento estrutural da edificação.

Palavras-chave: Laje Maciça, Eberick, Cálculo Manual, Comparativo, Software Computacional.

ABSTRACT

When developing a building project, there are fundamental criteria and steps for obtaining and grounding a safe and sustainable building. The development of a structural project is conjugated as one of the main stages existing in the project, because it is the calculation of slabs, and from it the sizing of other elements present in the building. Manual calculations for structural determination of a slab have always been widely used, but in the present it has been replaced by computer software. The softwares bring us agility and security in the calculations. With the quotations mentioned, the present work aims at a comparative study for the development of a massive slab calculation. The different methods used, with the purpose of obtaining the most reliable calculation for the development of the calculation of this element. The present comparative study was between the manual calculation by the slab method and by means of the EberickV10 software, where we performed the calculation by both methods, evaluating the support reactions, steel area, bending moments, and slab arrows of a building. This verification resulted in divergent values between the two methods, pointing out that by calculating with software a better structural behavior of the building is obtained.

Keywords: Massive Slab, Eberick, Manual Calculation, Comparative, Computational Software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Definição de aglomerados do concreto (Pré Fabricados).....	5
Figura 2 -Laje Maciça.	8
Figura 3 -Laje Lisa (a) e nervurada (b)	9
Figura 4 - Laje Nervurada	10
Figura 5 - Tipos de apoio	10
Figura 6 -Função de vínculos nas bordas em determinados tipos de lajes.....	11
Figura 7 -Laje retangular unidirecional.....	12
Figura 8 -Laje retangular bidirecional.....	13
Figura 9 -Classe de agressividade ambiental segundo a NBR 6118/2014.....	14
Figura 10 -RelaçãoEntre Classe de Agressividade Ambiental e Cobrimento Nominal.....	15
Figura 11 - Limites de deslocamentos e deformação segundo NBR 6118/2014.	19
Figura 12 - Taxas mínimas de armaduras de flexão.....	22
Figura 13 - Valores mínimos para armaduras passivas aderentes conforme NBR 6118/14. ...	23
Figura 14 -Planta baixa do pavimento tipo	24
Figura 15 – Disposição das Lajes.....	25
Figura 16 -Definição usual, vão teórico.	26
Figura 17 -Vão livre e vão teórico.....	26
Figura 18 -Condições de contorno das lajes do pavimento tipo.....	28
Figura 19 – Laje apoiado em um lado e engastado no outro.....	32
Figura 20 - Reações de Apoio caso 2	32
Figura 21 - Janela de lançamento inicial do Software AltoQi EberickV10.....	36
Figura 22 - Janela lançamento de Cargas nas lajes	37
Figura 23 -Lançamento das cargas de parede.....	38
Figura 24 - Processamento da estrutura.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Agregados usuais (Brita).....	16
Tabela 2 - Valores mínimos para cargas verticais	21
Tabela 3 – Cargas adotadas no projeto estrutural	29
Tabela 4 - Cargas total dos revestimentos utilizados.....	30
Tabela 5 - Cargas totais dos revestimentos utilizados nas paredes.	30
Tabela 6 - Pré-dimensionamento da altura da laje.....	39
Tabela 7 - Valores de Flecha presente na edificação.....	40
Tabela 8 - Resultados de momentos fletores	41
Tabela 9 - Resultados do cálculo das áreas de aço das lajes	42
Tabela 10 - Resultados adotados para área de aço.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

FACEG – Faculdade Evangélica de Goianésia.

NBR - Norma Técnica Brasileira.

ELU – Estado limite último.

ELS – Estado limite de serviço.

ELS (F) – Estado limite de serviço com aparecimento de fendimento.

ELS (W) – Estado limite de serviço com fendimento próximo dos valores máximos estabelecidos.

ELS (DEF) – Limite onde as deformações atingem os limites de aproveitamento adequado.

ELS (D) – Limite onde surgem patologias visíveis ao olho.

ELS (VE) – Vibrações alcançam limites de utilização satisfatória.

LISTA DE SÍMBOLOS

lef – Vão efetivo

l – Intervalo entre vão

ly – Maior vão da laje

lx – Menor vão da laje

lo – Vãos livres

ψ_2 – Coeficiente de vinculação dos apoios

ψ_3 – Coeficiente referente ao tipo de aço adotado

h – Altura da laje

d – Representa a altura útil

c – Cobrimento nominal

ϕ – Diâmetro adotado na armadura.

Fds – Combinação de ações no estado limite de serviço

Fgk – Cargas permanentes

fqk – Cargas variáveis

Fd – Combinação de ações no estado limite útil

γ_f – Coeficiente

$\gamma_{concreto}$ – Peso Próprio do Concreto

λ – Relação entre lado maior e lado menor da laje

Kg – Quilo grama

kN – Quilo Newton

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	5
2.1 CONCRETO ARMADO	5
2.1.1 Vantagens e desvantagens da utilização do concreto armado	6
2.2 TIPOS DE LAJES	6
2.2.1 Laje Maciça.....	8
2.2.2 Lajes cogumelo e/ou lisas	9
2.2.3 Lajes Nervuradas	9
2.3 TIPOS DE APOIOS	10
2.4 CLASSIFICAÇÃO DA LAJE QUANTO A SUA DIREÇÃO	11
2.4.1 Lajes Unidirecionais	12
2.4.2 Lajes Bidirecionais	13
2.5 PREMISSAS PARA REALIZAR O CÁLCULO DE LAJES MACIÇAS	13
2.5.1 Classe De Agressividade	13
2.5.2 Cobrimento Mínimo	14
2.5.3 Estados Limites.....	16
2.5.4 Limites de deslocamentos	18
2.5.5 Ações a Considerar	20
2.5.6 Armaduras Mínima e Máxima	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.2 CÁLCULO PELO MÉTODO DAS PLACAS	25
3.2.1 Análise do Pavimento	25
3.2.2 Altura útil das Lajes	27
3.2.3 Carregamentos Existentes.....	28
3.2.4 Cálculo das flechas, reações e momentos	30
3.3 LANÇAMENTO EM SOFTWARE EBERICK	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

4.1 COMPARATIVO DE RESULTADOS	39
5 CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

Primordialmente têm-se que a pedra natural e a madeira foram os primeiros materiais utilizados na construção, após houve o surgimento do aço. No entanto o concreto armado surgiu em meados de 1850, devido à necessidade de uma melhor qualidade estrutural, aproveitando as qualidades da pedra, tais como sua durabilidade e resistência a compressão, em conjunto com o aço que possui elevada resistência mecânica a tração, proporcionando assim uma qualidade estrutural, celeridade na execução e proteção do aço contra intempéries (BASTOS, 2005).

O concreto, mediante estudos recentes, é o segundo produto de maior consumo no mundo, atrás apenas do consumo de água. Para execução de grande parte dos projetos estruturais no mundo, é indispensável o uso de concreto. A utilização do concreto cresce constantemente no Brasil e no mundo, sendo o Brasil, um dos maiores produtores desse material (TANIGUTI, 2013).

Segundo Santos (2017), a engenharia estrutural está presente na execução de pequenas, médias e grandes construções. A evolução dos projetos estruturais está ligada diretamente ao grande desenvolvimento tecnológico que afeta diretamente o setor da engenharia.

Um projeto estrutural contempla todo dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais presente em uma edificação, tais como fundações, pilares, vigas, lajes, escadas, entre outros. Para obtenção de um projeto estrutural de qualidade, o mesmo deverá atender a requisitos como qualidade e custos apropriados (SANTOS, 2017).

Segundo Oliveira (2012), por um longo tempo, os projetos estruturais eram realizados de modo simplificado, utilizando-se de métodos manuais na elaboração dos cálculos dos seus elementos, exigindo um maior tempo e dedicação para a execução do projeto. Com o advento da informática, esses mesmos projetos podem ser elaborados com o auxílio de softwares computacionais, que proporcionam maior agilidade e comodidade para os profissionais. A engenharia vem se atualizando com esses avanços tecnológicos, o que afeta de forma positiva tanto no desenvolvimento das tarefas, como na troca de informações necessárias entre os diversos profissionais envolvidos no processo da construção civil.

Quando se inicia um projeto estrutural, o primeiro elemento corriqueiramente dimensionado são as lajes, estruturas estas com função de receber as cargas de utilização das edificações e transmiti-las aos elementos de sua sustentação, tais como as vigas e posteriormente os pilares (ARAÚJO, 2014a).

Atualmente, grande parte dos cálculos estruturais é realizada por intermédio de *softwares* desenvolvidos para esse fim, sendo difícil imaginar tais cálculos sendo desenvolvidos

de forma manual e arcaica, considerando a celeridade que a sociedade se encontra. Na execução destes projetos, inúmeras etapas são necessárias, e diversos elementos são dimensionados e detalhados, e ao considerar esse processo de dimensionamento por cálculo manual, o tempo de desenvolvimento de tais sistemas levariam semanas, e com as revisões e complexidade dos projetos, até mesmo meses (KIMURA, 2007). Ao se planejar um projeto, com o desenvolvimento de novos *softwares* em meio aos avanços constantes das tecnologias, o cálculo pelo método manual vai se tornando arcaico.

Segundo Carvalho e Pinheiro (2013), por mais que o avanço no desenvolvimento de *softwares* cresce constantemente, a competência de conhecer e definir aspectos como o comportamento estrutural de uma edificação, suas dimensões e fundações, ainda cabe ao projetista, sendo o mesmo auxiliado por um computador para obtenção de um projeto racional, seguro e econômico. Não é o *software* que concebe uma forma, mas sim o esforço idealizador da mente humana (RABELLO, 2016).

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o advento da informática, e a evolução cada vez maior de *softwares* capazes de processar dados e informações com uma agilidade antes inimaginável, ao comparadas aos arcaicos métodos de cálculo manual, surge a procura cada vez maior por esses novos meios de processamentos, e na engenharia, isso não é diferente.

O avanço tecnológico juntamente com o uso de *software* é um fator que impacta as empresas de forma mais intensa. Inúmeros processos deixam de ser necessários, ou simplesmente são consideravelmente reduzidos em virtude da aplicação de ferramentas que tornam os serviços mais ágeis. Hoje, porém, com o avanço da tecnologia, torna os *softwares* ferramentas eficazes, sendo inviável imaginar a realização de um projeto estrutural sem o uso do mesmo. Entregar obras com qualidade, baixos custos e reduzido prazo é um desejo de muitos engenheiros (MEDEIROS, 2007).

Não há dúvidas de que os softwares são um aspecto fundamental para o desempenho de bons serviços em muitas profissões, e por isso, é primordial apresentar um bom conhecimento dos programas agregados como auxílio para engenharia. Dessa forma o presente trabalho faz jus a um comparativo entre dois métodos de cálculos, sendo eles por método manual analítico e por *software* Eberick V10, da empresa AltoQI, para realização de cálculos de lajes maciças.

Conforme Motta (2009), os *softwares* para engenharia necessitam conter base no desenvolvimento sustentável, isso indica que é primordial o uso racional e conveniente e ter aptidões para manuseio de determinados *softwares*. A metodologia de cálculo estrutural também é válida para o cálculo de lajes, objeto de pesquisa, e é um processo minucioso e trabalhoso, que demanda conhecimento e comprometimento de quem o executa. Um bom software não faz um grande engenheiro, apenas um grande engenheiro deve utilizar um bom software.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Estudo comparativo de dimensionamento de laje maciça utilizando cálculo manual e o *software* Eberick V10, avaliando assim prováveis oscilações, caso exista, entre os dois métodos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o procedimento de cálculo manual para dimensionado das lajes maciças de um estudo de caso;
- Utilizar o *software* computacional AltoQi Eberick V10 para realizar e dimensionar as lajes maciças de um estudo de caso;
- Analisar os valores de dimensionamento obtidos pelos dois métodos;
- Comparar conforme os dois métodos de dimensionamento, os valores obtidos de momentos fletores e armaduras longitudinais;
- Analisar os quesitos economia e confiabilidade entre os métodos empregados para o cálculo das lajes maciças do estudo de caso.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido para maior compreensão da temática exposta, estruturado de forma simplificativa para maior absorção e entendimento do tema abordado.

Estruturado por cinco capítulos, onde no primeiro, retrata a introdução do trabalho, descrevendo alguns conceitos fundamentais, justificativa, objetivo geral e objetivos específicos.

Retratamos os fundamentos e características do concreto armado, também definimos conceitos sobre alguns tipos mais usuais de lajes, relacionando normas e literaturas referentes ao trabalho proposto. Todas essas informações estão apresentadas no capítulo 2.

O capítulo 3 demonstra o material e métodos desse trabalho, incluindo descrição do projeto de estudo de caso e procedimentos de cálculo.

O capítulo 4 aborda os resultados e discussões acerca do comparativo entre os métodos propostos de cálculo de lajes, como objetivo de apresentar dados suficientes para discutirmos as diferenças entre o cálculo manual e computacional.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do nosso trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 CONCRETO ARMADO

Inventado por Joseph Monier, o concreto armado teve sua origem no ano de 1849. Os primeiros materiais em concreto armado feitos por Monier foram tubos e cubas de concreto com adição de aço, Monier era jardineiro, o mesmo era insatisfeito com suas cubas de barro, pois não tinha tanta resistência, até mesmos as raízes das plantas danificavam suas cubas. No entanto ele começou a fazer vasos de concreto combinando assim a capacidade de compressão do concreto com a de tração do metal. Monier recebeu a patente de sua invenção no ano de 1867 (QUINZA, 2017).

Segundo Araújo (2014c), concreto é a mistura de agregados naturais e britados com adição de água e cimento, o cimento é o aglomerante que faz a união dos demais agregados. Para fins específicos, também pode ser acrescentado adições minerais e aditivos químicos que têm o objetivo de melhorar as características do concreto. O concreto armado é um composto (Figura 1), obtido entre a combinação de dois materiais extremamente importantes, sendo eles: o concreto e aço em forma de barras. A utilização do concreto armado traz inúmeras vantagens, tais como: simplicidade na execução, estrutura resistente ao fogo, resistência a intempéries e baixo custo de manutenção.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que a durabilidade estrutural seja a capacidade da estrutura de resistir às ações do meio ambiente, sendo a mesma estipulada pelo responsável técnico que desenvolve o projeto estrutural. Quando o projeto é realizado conforme suas exigências, garante maior aptidão e estabilidade durante a vida útil da estrutura.

As estruturas de concreto armado têm um período indeterminado, e depende de inúmeros fatores como a cura, compactação, materiais empregados em sua fabricação e também um fator importante que é os aspectos ambientais que a estrutura estará exposta (COUTO et al, 2013).

Figura 1-Definição de aglomerados do concreto (Pré-Fabricados).



Fonte: AUTORES, 2020.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), o sistema estrutural pode ser descrito como um conjunto de elementos básicos, estabelecendo sistemas estruturais resistentes que permitam representar com clareza os caminhos percorridos pelas ações até sua dissipação nos apoios da estrutura.

2.1.1 Vantagens e desvantagens da utilização do concreto armado

O concreto armado vem sendo utilizado em larga escala em todo o mundo, dentre suas virtudes, estão algumas características positivas, como:

- **Agilidade na construção:** A execução de obras e recobrimento é significativamente rápida;
- **Economia:** Grande facilidade de encontrar os aglomerados para sua fabricação, ocasionado em uma demanda e baixo custo;
- **Resistência ao fogo:** Desde que seja realizado o cobrimento mínimo de concreto, para assim proteger a armadura;
- **Resistência a vibrações e choques:** Baixos problemas relacionados à fadiga estrutural.

No entanto o concreto também apresenta algumas desvantagens, como:

- **Peso próprio elevado:** $\gamma_{concreto} = 25 \text{ KN} / \text{m}^3$
- **Fissuração:** Problema comum que deve ser controlado e evitado desde a execução da obra;
- **Custo elevado em reformas:** Adaptação estrutural e reformas são melindrosas;
- **Demolição de difícil execução:** A demolição de uma estrutura feita de concreto armado pode ser inviável devido ao elevado custo, gerando também uma quantidade elevada de resíduos de construção e demolição (RCD).

2.2 TIPOS DE LAJES

Consideradas placas ou elementos de superfície, as lajes podem ser definidas como elemento estrutural bidirecional ou unidirecional. Este elemento estrutural é responsável pelo recebimento da maior parte das ações existente numa edificação, sendo esses carregamentos

fixos e variáveis, referentes ao peso de paredes, revestimentos, pessoas e objetos, além de demais tipos de ações e carregamentos que fazem referência ao projeto da laje. Os esforços solicitantes que atuam sobre a laje geralmente são perpendiculares, carregamentos distribuídos, forças concentradas e também carregamentos verticais geralmente solicitados no entorno das lajes (BASTOS, 2005).

A escolha ideal de laje a ser utilizada pode ser definida por diversos critérios, podendo ser eles específicos, relacionados ao gosto do cliente, ou até mesmo de caráter estético, podendo a escolha também ter fluência em quesitos diretos, falta de infraestrutura local, limitações da execução e esforços solicitantes presente. Após unir todos os critérios e definir as possibilidades, o engenheiro estrutural deve optar pela solução que se adeque a situação existente (RABELLO, 2016).

A execução estrutural de uma edificação tem custo final médio equivalente de 15% a 20% do valor total, e diante disso, para se obter um projeto sustentável e econômico, deve-se atentar a soluções estruturais adequadas, obtendo assim uma economia considerável em termos financeiros, dentre esses fatores a escolha racional do tipo de laje é um quesito fundamental para determinada economia (LONGO, 2018).

Segundo Campos Filho (2014), lajes são elementos estruturais planos e laminares, onde predomina duas dimensões: comprimento e largura. As lajes possuem sua representação pelo seu plano médio, podendo obter formas variáveis, geralmente nas estruturas correntes, obtendo lajes retangulares, podendo ser também em forma trapezoidal.

Conforme Santos (2017), para obter um suporte satisfatório para as cargas verticais, que são transmitidas a um plano horizontal, faz-se uso de um elemento usualmente de concreto armado, denominando de laje.

A sociedade atual tem passado por significativos avanços tecnológicos, com a construção civil não poderia ser diferente. Hoje existem uma quantidade significativa de diferentes tipos de laje, e novos estudos de viabilidade que possa atender determinadas exigências de cada projeto é algo evidente no campo científico e da pesquisa (VASCONCELOS, 2004).

Com capacidade de resistir a cargas verticais, uma das funcionalidades das lajes é transmitir essas ações aos demais elementos estruturas, sendo eles pilares, paredes e vigas. De acordo com o método construtivo de cada laje, podemos classificá-las:

- Lajes Maciças Convencionais – Apoio sobre vigas;
- Lajes Cogumelo e/ou Lisas – Apoio direto nos pilares;

- Lajes Nervuradas – Apoio em nervuras ou vigotas.

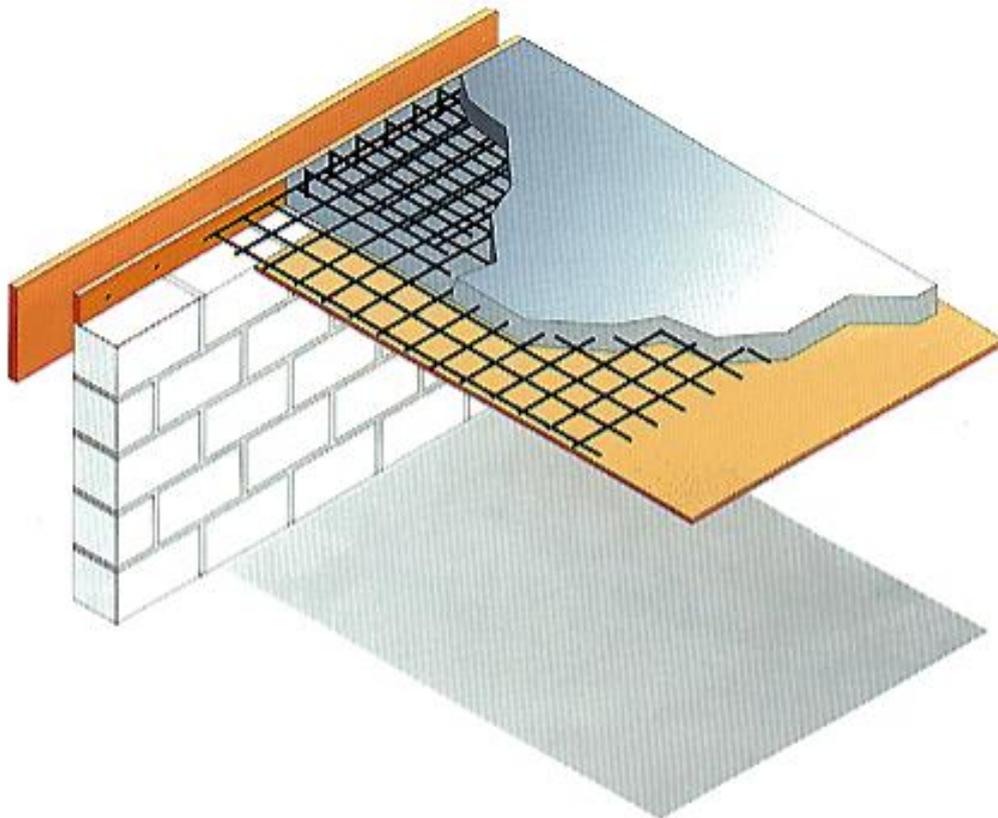
Estes são os tipos de lajes mais comuns em edificações. Existem dois outros tipos de lajes, tais como protendida e pré-moldada, no entanto não iremos aprofundar sobre tais lajes no presente trabalho.

2.2.1 Laje Maciça

Segundo Araújo (2014a), laje maciça é considerada a de maior uso nas construções atuais, e tem um método de cálculo bastante simplificado, sendo uma placa de concreto armado plana e maciça e sua espessura pode sofrer variações conforme a necessidade de cada projeto.

Lajes maciças (figura 2) são placas planas de espessura uniforme, sendo apoiadas em seus perímetros. Podendo ter os apoios por alvenaria ou vigas, e são bastante usuais em construções de pequeno porte onde se tem menores vãos (ARAÚJO, 2014b).

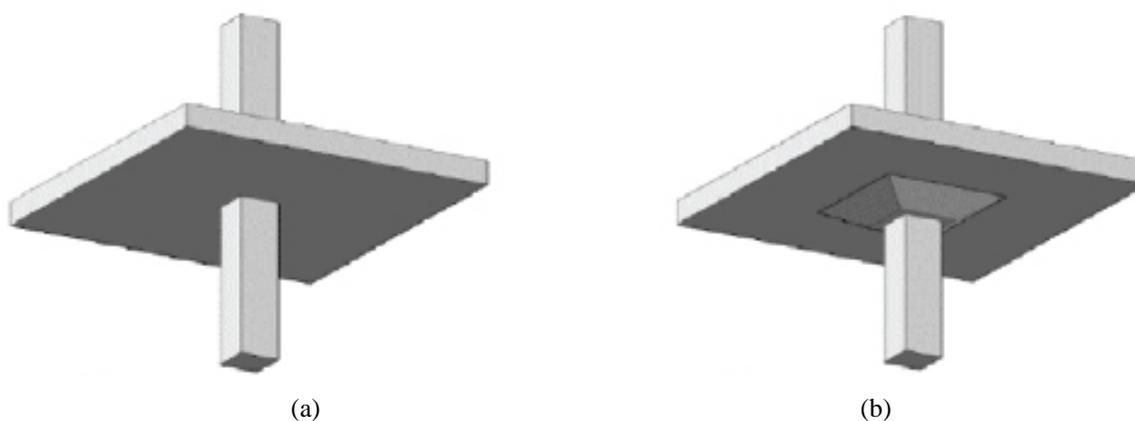
Figura 2-Laje Maciça.



2.2.2 Lajes cogumelo e/ou lisas

As lajes cogumelo são lajes apoiadas diretamente nos pilares, ou seja, sua utilização dispensa a necessidade de apoio por vigas (Figura 3). Elas podem ser apoiadas em estruturas que são chamadas de capitéis. Os capitéis podem ter formatos quadrados ou circulares, fabricados de concretos armado ou concreto protendido, e na maioria das vezes são formados por lajes maciças ou materiais inertes. Podem vencer grandes vãos, no entanto são mais espessas e necessita de uma maior quantidade de material, aumentando assim o seu custo. O uso de lajes cogumelo teve grande aumento em arquitetura residencial (BASTOS, 2005).

Figura 3-Laje Lisa (a) e nervurada (b)



Fonte: BASTOS, 2005.

2.2.3 Lajes Nervuradas

Lajes Nervuradas são utilizadas para preencher grandes vãos, normalmente superiores a oito (8) metros, comumente composta por nervuras, onde são locadas as armaduras longitudinais de tração. Sendo assim a laje nervurada consegue obter melhores resultados em grandes vão, em comparação com outros tipos de laje, devido à redução considerável de seu peso próprio, uma vez que elimina uma parcela de concreto que estaria na parte tracionada, comparada à laje maciça, por possuir espaços vazios entre as nervuras, tornando a obra mais leve, sem comprometimento estrutural. No entanto as nervuras das lajes ficam aparentes, por fins de estética as nervuras podem ser revestidas com materiais inertes para que sua face fique plana, é comum que este revestimento ser algum forro que possua baixo peso específico, tal como gesso, PVC ou isopor (ARAÚJO, 2014a).

Considerada a solução ideal para vencer grandes vãos, o sistema de laje nervurada é bastante usual em hospital e shopping, sendo possível existir uma distância considerável entre os pilares sem a utilização de vigas. O sistema de nervura tem a função de melhorar a inércia da laje, obtendo uma redução considerável no uso de concreto. A laje nervurada de maior uso é a utilização de cubetas, o uso de cubetas plásticas é vantajoso, uma vez que a execução dessa forma possui seu próprio sistema de escoramento podendo ser moldadas no local de execução, mantendo assim a laje escorada com maior facilidade (SOUZA E CUNHA, 1998).

Figura 4 - Laje Nervurada



Fonte: FRANÇA E FUSCO, 1997.

2.3 TIPOS DE APOIOS

As lajes apresentam alguns tipos de vinculação em sua borda, sendo: livres, apoiadas ou engastadas. Consideram-se livres, quando não possui apoio no perímetro de algum dos lados. Apoiada, quando a laje tem apoio em todo seu perímetro, sendo sobre paredes ou vigas. Engastadas quando a laje tem sua borda continuada após um dos apoios correspondentes (SILVA, 2010). Usualmente existem três tipos de vínculos sendo eles: borda engastada, borda livre e borda apoiada (Figura 5).

Figura 5- Tipos de apoio

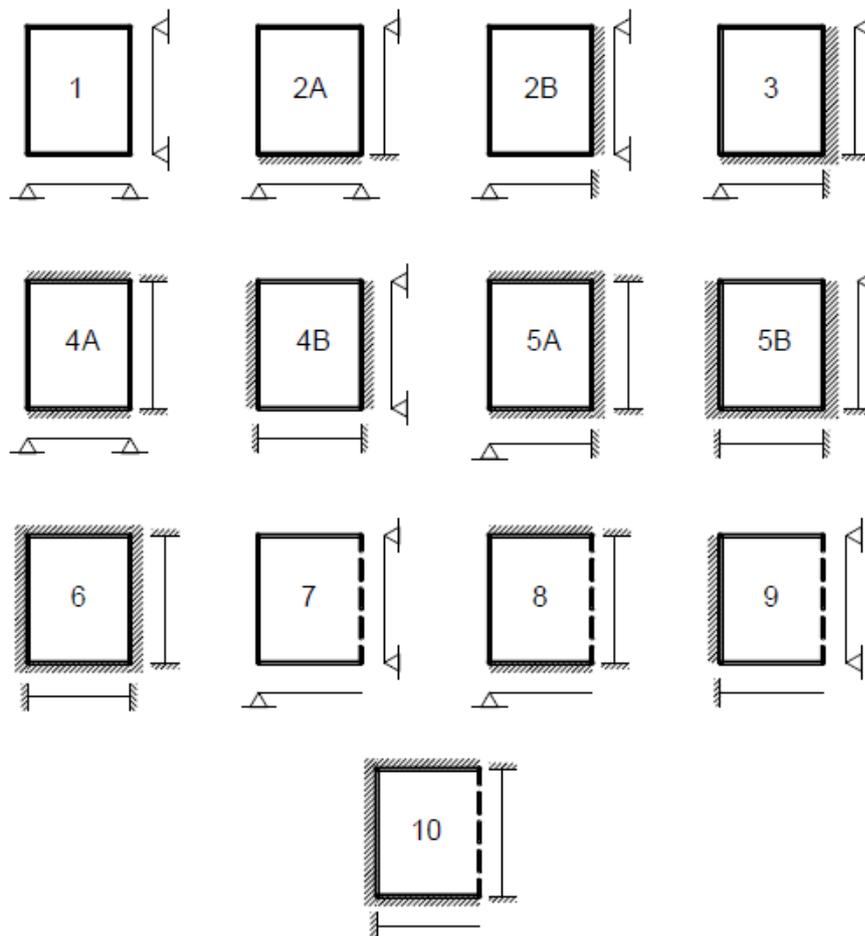
Borda livre	Borda simplesmente apoiada	Borda engastada
-----	—————	// // // // //

Fonte: ARAÚJO, 2014a.

Caracterizada pela ausência de apoio, a borda livre apresenta deslocamentos verticais, enquanto que nos dois outros tipos de apoio, não existem teoricamente deslocamentos verticais, partindo do pressuposto que o cálculo de laje considera os apoios indeslocáveis. Para as bordas engastadas, são impedidas as rotações, comum em lajes que apresentam dimensão contínua, onde a laje adjacente promove o engastamento entre ambas (EMERICK, 2002).

Lajes retangulares podem possuir inúmeras combinações possíveis de apoios em sua borda, sendo assim eles detêm números que possam diferenciar determinadas combinações vinculadas à borda, ilustrados na figura 6 (BASTOS, 2005).

Figura 6-Função de vínculos nas bordas em determinados tipos de lajes



Fonte: BASTOS, 2005.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DA LAJE QUANTO A SUA DIREÇÃO

Segundo Bastos (2005), ao se projetar lajes, o primeiro passo é identificar os vãos teóricos e vãos livres, sendo a distância disponível entre os apoios.

Podemos classificar as lajes por alguns critérios, como a relação dos tipos de apoio, sua forma geométrica e quanto a sua direção. Quando se fala sobre formas geométricas, podem existir diversas formas, no entanto a retangular é a de maior uso. Com o auxílio de software, é possível calcular e dimensionar inúmeras formas geométricas independentes do carregamento que atuam sobre elas (BASTOS, 2005).

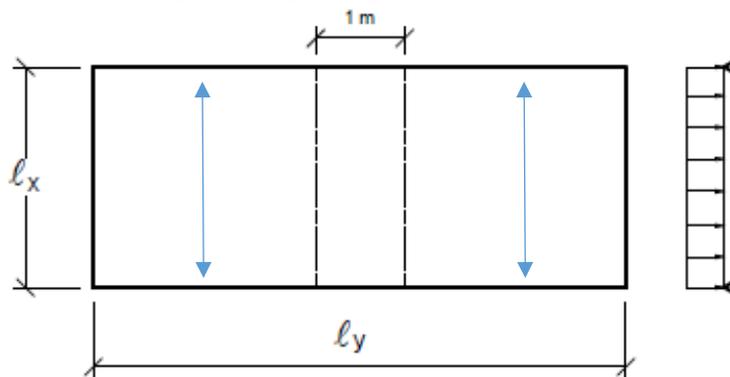
Conforme NBR 6118 (ABNT, 2014), quanto à classificação das lajes maciças, dois itens de bastante importância devem ser considerados, sendo quanto às direções da sua armadura principal. A disposição da armadura pode ser em dois sentidos direcionais: laje unidirecional com armadura principal em apenas uma direção ou laje bidirecional com armadura principal em duas direções.

2.4.1 Lajes Unidirecionais

Lajes de armaduras unidirecionais calculam-se apenas o momento fletor direcionado ao menor vão. Este cálculo deve ser feito de forma clara e a favor da segurança. Supõe uma faixa de proporção unitária em direção do menor vão.

A figura 7 ilustra uma laje retangular dimensionada de forma unidirecional.

Figura 7-Laje retangular unidirecional



Fonte: CARVALHO E PINHEIRO, 2013.

Onde:

l_x = Vão menor

l_y = Vão maior

λ = Relação entre lado maior e lado menor da laje

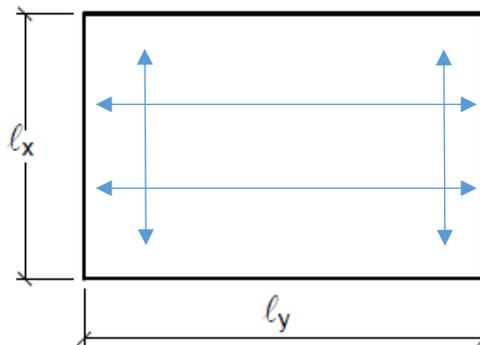
Representado pela fórmula:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} > 2 \quad (1)$$

2.4.2 Lajes Bidirecionais

A figura 8 ilustra uma laje retangular dimensionada de forma bidirecional.

Figura 8-Laje retangular bidirecional



Fonte: CARVALHO E PINHEIRO, 2013.

Onde:

l_x = Vão menor

l_y = Vão maior

λ = Relação entre lado maior e lado menor da laje

Representado pela fórmula:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \leq 2 \quad (2)$$

Para as lajes de armaduras bidirecionais, a relação entre os lados é menor que dois.

2.5 PREMISSAS PARA REALIZAR O CÁLCULO DE LAJES MACIÇAS

2.5.1 Classe De Agressividade

Para se obter uma durabilidade em lajes maciças, elas devem ser projetadas e executadas considerando os impactos ambientais, e quando utilizados de forma correta,

garantem maior estabilidade estrutural e segurança em toda sua vida útil. A classe de agressividade imposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014) dá ênfase nas principais características associadas aos impactos ambientais nas estruturas. Independente das ações mecânicas e variações volumétricas, a norma aborda conceitos relacionados a ações químicas e físicas, atuantes sobre a estrutura de concreto (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014).

A classe de agressividade ambiental está diretamente relacionada ao risco de deterioração e às intempéries que a estrutura estará exposta. A figura 9 ilustra as classes de agressividade estabelecidas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 9-Classe de agressividade ambiental segundo a NBR 6118/2014.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Será utilizada a classe de agressividade, conforme Figura 9, para determinação de cobrimento mínimo considerado em elemento estrutural, e o cobrimento mínimo utilizado em cálculo de lajes maciças é quesito básico indispensável.

2.5.2 Cobrimento Mínimo

O cobrimento mínimo é a parte do concreto que fica entre as barras de aço e a face externa do concreto, este cobrimento tem a funcionalidade de proteção das barras por toda a extensão da laje, protegendo assim a armadura de intervenções externas como fogo e corrosão.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), concretos cuja resistência é maior que a exigida, pode-se reduzir os cobrimentos estabelecidos em até 0,5cm. A distância entre a armadura e o centro de gravidade, denominado altura útil “d”, tem total dependência na definição do cobrimento da armadura.

Em cálculos estruturais, é de extrema importância respeitar os valores de agressividade ambiental impostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), nela informa-se valores de cobrimento nominal (C_{min}), sendo adicionada uma tolerância (ΔC) referente ao valor a ser adotado do cobrimento nominal, relacionados a determinantes apresentadas nas classes de agressividade ambiental, sendo considerada uma tolerância de $\Delta C=10$ mm (dez milímetros). A Figura 10 ilustra essa atuação.

Figura 10-Relação entre Classe de Agressividade Ambiental e Cobrimento Nominal.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Posterior à definição do cobrimento nominal, é estabelecido a granulometria dos agregados graúdos (britas) a serem utilizados. A dimensão máxima deste agregado é obtida pela

multiplicação do cobrimento nominal (C_{min}) por 1,2. As características granulométricas dos agregados podem sofrer pequenas variações em determinadas regiões de nosso país (Brasil), conforme ilustra a Tabela 1 (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Tabela 1 - Agregados usuais (Brita).

Tipo de brita	Diâmetro (mm)
Brita 0	4,8 a 9,5
Brita 1	9,5 a 19
Brita 2	19 a 25
Brita 3	25 a 38

Fonte: CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO (2014) (Adaptado).

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), determina-se o valor de cobrimento mínimo para as armaduras das lajes. A classificação da classe de agressividade ambiental é representada pela Tabela 1, considerando que o projetista conheça o ambiente onde a edificação será construída, o mesmo poderá considerar a classe de agressividade conforme a presente no local de execução.

2.5.3 Estados Limites

Para obtenção de um cálculo estrutural que possa garantir confiabilidade e segurança, é necessário considerar nos cálculos, os estados limites, sendo eles: estados limites de serviços (ELS) e estados limites últimos (ELU). Com a finalidade de garantir uma considerável durabilidade e conforto ao usuário, esses limites também são responsáveis para evitar o colapso estrutural nas edificações (LEONHARDT E MÖNNIG, 2007).

Carvalho e Pinheiro (2013) firmam que o estado limite último determina a confiabilidade e segurança nos projetos estrutural de concreto, devendo sempre ser verificados com maior precisão, uma vez que o estado limite último está diretamente relacionado ao momento em que a estrutura deixa de atender ao quesito de funcionalidade íntegra, levando ao colapso ou ruína estrutural.

De acordo com a determinação da NBR 6118 (ABNT, 2014), sempre deve verificar a segurança das estruturas de concreto em associação aos subseqüentes estados limites últimos (ELU), como:

- Perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica definida na NBR 6118/2014, e admitindo-se, em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais; todavia, quando a interação entre elas for importante, ela estará explicitamente indicada na norma em questão;
- Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- Provocado por solicitações dinâmicas;
- Colapso progressivo;
- Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando exposição ao fogo, conforme NBR 15200 (ABNT, 2012);
- Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando ações sísmicas, de acordo com a NBR 15421 (ABNT, 2006);
- Outros que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

Em contingência ao estado limite de serviço (ELS), é de vasta importância a consideração no cálculo estrutural devido o mesmo estar correlacionado a utilização efetiva da estrutura e também a sua aparência, sendo responsável por garantir uma maior durabilidade e agradável aparência nas estruturas de concreto armado, como por exemplo, garantir uma utilização estrutural aprazível para usuários ou equipamentos contido na estruturas e também preservar a estrutura de manifestações patológicas como fissuras ou excessivas vibrações (KIMURA, 2007).

De acordo com a determinação da NBR 6118 (ABNT, 2014), sempre deve verificar a segurança das estruturas de concreto em associação aos subsequentes estados limites de serviço (ELS), como:

- Geração de fissuras ($ELS - F$): Início de aparecimento de fendimento, onde é atingido o estado limite, alcançando assim o valor de momento em que a tensão de tração da seção for similar a f_{ct}, f ;
- Abertura do fendimento ($ELS - W$): Fendimentos revelam se com dimensões iguais ou próximas dos valores máximos estabelecidos;

- Excesso de deformação ($ELS - DEF$): Onde as alterações de deformações obtêm os limites determinados para o aproveitamento adequado;
- Descompressão ($ELS - D$): Estado onde um ou diversos pontos da seção transversal a tensão normal anulada, onde não há tração no restante da seção. No caso de concreto protendido é possível realizar sondagem visual.
- Vibrações excessivas ($ELS - VE$): Condição no qual as vibrações alcançam as limitações determinadas para a utilização satisfatória da construção.

O Estado limite de serviço (ELS) tem a função de informa quando a estrutura não está agindo dentro dos padrões de qualidade, se comportando inadequadamente, evidenciando deformações intensas ou apresentando vibrações demasiadas, diferente do estado limite último (ELU), onde a edificação já atingiu o nível de colapso estrutural.

2.5.4 Limites de deslocamentos

Limites de deslocamentos são os máximos valores que a estrutura pode se deslocar com ação dos carregamentos nela existente. Os valores de deslocamentos são determinados no cálculo de dimensionamento estrutural, para assim obter a antecipação do deslocamento que a estrutura irá sofrer, e esse deslocamento deve ser inferior ao máximo valor definido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), figura 11.

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), é expressamente necessário que qualquer edificação atente o seu limite de deformações. O objetivo desses valores limites é manter a edificação segura considerando o seu comportamento adequado. Uma edificação não pode ter sua composição estrutural com deslocamentos superiores ao apresentado na Figura 11.

De acordo com a determinação da NBR 6118 (ABNT, 2014), os valores de deslocamentos limites são determinados a partir do tipo e efeito de deslocamento que a estrutura irá se sujeitar.

Os valores de deslocamento limites estabelecidos pela norma, devem ser considerados em todas as estruturas de concreto armado, para garantir que a estrutura não exceda seu estado limite de serviço (ELS) e evitar que a mesma trabalhe no seu estado de serviço último (ELU), levando toda a estrutura a sua ruptura. Ilustrado na Figura 11, alguns comportamentos adequados para estruturas de concreto armado conforme NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 11- Limites de deslocamentos e deformação segundo NBR 6118/2014.

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$\ell/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$\ell/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$\ell/350+$ contraflecha ^b
			Ocorrido após a construção do piso	$\ell/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H_i/850^e$ entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell/400^g$ e 15 mm
Efeitos em elementos não estruturais	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H_i/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$\ell/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$\ell/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

^a As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.

^b Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $\ell/350$.

^c O vão ℓ deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.

^d Rotação nos elementos que suportam paredes.

^e H é a altura total do edifício e H_i o desnível entre dois pavimentos vizinhos.

^f Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica ao deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_i representa o comprimento do lintel.

^g O valor ℓ refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.5.5 Ações a Considerar

De acordo com Araújo (2014c), as ações são definidas por deformações ou tensões que possam apresentar algum perigo a estrutura. Estas ações são determinadas de acordo com as oscilações do tempo, sendo definidas em variáveis, permanentes e excepcionais. Em construções regulares, apenas consideramos ações variáveis e permanentes, no entanto não iremos aprofundar sobre ações excepcionais no presente trabalho.

Para as lajes, deve-se considerar variados tipos de carregamentos, dentre cargas fixas e variáveis, e determinados carregamentos devem ser considerados para assim obter a garantia de uma estrutura segura. É indispensável respeitar condições básicas, como todas as solicitações presente nas lajes durante a sua execução e utilização. As lajes recebem as cargas de utilização, transmitindo aos apoios (KIMURA 2007).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece que as ações permanentes sejam as que sucedem com frequência na edificação. As ações presentes nas lajes podem ser caracterizadas pelo peso de revestimentos, o próprio peso da laje, peso de paredes, entre outros.

Para determinação das cargas permanentes, consideramos o peso próprio da laje e também o peso específico do material que ela é composta, no caso o concreto que pode sofrer variação dependendo do concreto a ser escolhido, em casos usuais considerou o peso específico do concreto de $24kN/m^3$ e para o concreto armado $25kN/m^3$, salientando que na escolha do concreto a ser utilizado pode variar no peso próprio da laje, variando assim os valores dessas ações (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014).

As ações existentes podem ser definidas em variáveis diretas e indiretas, sendo as ações diretas geradas por efeitos acidentais, ações já previstas em projeto, podendo ser resultado de alguma perturbação atmosférica como vento forte, temporal ou seca; no entanto as ações indiretas são geradas por oscilações de temperatura ou ações dinâmicas (gradiente térmico e vibrações), segundo NBR 6118 (ABNT, 2014).

Indiferente do modelo de laje a ser executada, deve ser analisado todos os tipos de ações possíveis, essa análise deve ser feita cuidadosamente e com bastante atenção, pois é fundamental para a segurança da edificação. Caso necessite determinar algum tipo de ação que não esteja esclarecida nas normas brasileiras, podem-se buscar orientações em normas estrangeiras.

As principais normas brasileiras para atuação de ações em lajes são:

- NBR 6118/2014: Estruturas de concreto armado;
- NBR 8681/2004: Ações e segurança nas estruturas;
- NBR 6120/2019: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.

A NBR 6120 (ABNT, 2019), definiu valores mínimos recomendáveis a serem considerados para ações de cargas acidentais, conforme tabela 2.

Tabela 2- Valores mínimos para cargas verticais

Local	Carga (kN/m²)
Residências – dormitório, copa, cozinha e banheiro	1,5 kN/m ²
Forros não destinados a depósitos	0,5 kN/m ²
Dispensa, área de serviço, lavanderia e dependências de escritório	2,0 kN/m ²
Compartimentos destinados a reuniões ou ao acesso público	3,0 kN/m ²
Compartimento destinados a bailes, ginástica ou esportes	5,0 kN/m ²
Escadas, corredores e terraços com acesso ao público	3,0 kN/m ²
Escadas, corredores e terraços sem acesso ao público	2,0 kN/m ²
Lojas	2,0 kN/m ²

Fonte: CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014 (Adaptado)

É indispensável o domínio de conhecimento para realização do cálculo de ações permanente e variável em lajes, sabendo-se que determinado comportamento dessas ações pode variar, e caso o cálculo seja realizado com alguma imprecisão, poderá levar toda a estrutura a ruptura (SOUZA E CUNHA, 1998).

2.5.6 Armaduras Mínima e Máxima

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece diretrizes para serem seguidas durante o dimensionamento e execução de vigas, com o propósito de atender-se a inúmeros fatores que obtêm influência nas diversas etapas de execução estrutural.

Os cálculos estabelecidos para as taxas de armadura mínima têm como objetivo evitar que a seção sofra bruscas rupturas, pois o concreto em si não consegue apresentar uma deformação significativa, ou seja, um aviso prévio antes da ocorrência de um possível colapso da laje, sendo assim o aço empregado ao concreto proporciona um prolongamento da deformação plástica, dando assim indícios visuais de deformação antes da ruptura estrutural (LEONHARDT E MÖNNIG, 2007).

A área de aço deve ser projetada respeitando as taxas mínimas da armadura. As armaduras devem obter dimensionamento definido para atingir um momento fletor mínimo, este momento será concedido caso seja respeitada as taxas mínimas de armadura (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014) a figura 12 ilustra os valores disponíveis dessas taxas.

Figura 12- Taxas mínimas de armaduras de flexão.

Forma da seção	Valores de $\rho_{\text{mín}}^a$ ($A_{s,\text{mín}}/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

^a Os valores de $\rho_{\text{mín}}$ estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$ e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, $\rho_{\text{mín}}$ deve ser recalculado.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), as taxas de armaduras de elementos estruturais devem obter valor maior ou igual à taxa estabelecida pela norma (Figura 13). A depender do tipo de armadura utilizada na laje, o valor da armadura mínima pode ser reduzido em até 67% como, por exemplo, em armadura de laje bidirecional. Os limites e relações para taxas de armaduras mínimas e armaduras calculadas, estão ilustrados na Figura 13.

Conforme estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), as taxas máximas, são calculadas para certificar que a estrutura terá melhores disposições de ductilidade, fazendo com

que a estrutura possua um correto grau de deformação, possibilitando assim pressentir o seu colapso. Todo o cálculo de taxa deve respeitar os ensaios de origem, definindo as diretrizes de desempenho do composto aço-concreto, e seu valor deve ser menor ou igual a 4% da área de concreto A_c .

Figura 13- Valores mínimos para armaduras passivas aderentes conforme NBR 6118/14.

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$ (ver 19.3.3.2)
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$		-
onde $\rho_s = A_s/b_w h$ e $\rho_p = A_p/b_w h$. NOTA Os valores de ρ_{\min} são definidos em 17.3.5.2.1.			

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os cálculos manuais e computacionais desenvolvidos foram descritos detalhadamente, conforme estudo de caso apresentado.

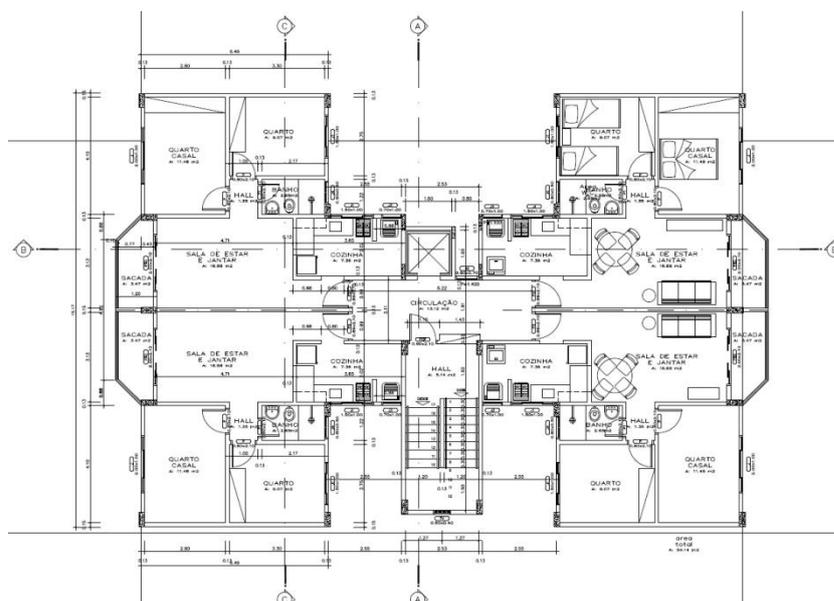
Quanto ao dimensionamento de lajes maciças, existem métodos distintos e diferentes literaturas para a realização do cálculo de dimensionamento, podendo ser o método de Bares, Marcus, Placas e etc. Para o presente trabalho o método utilizado foi o de Placas.

Tendo em base o conteúdo citado e com o objetivo de identificar o melhor processo para realização de cálculos estruturais de uma laje maciça, ou seja, por método de forma manual ou informatizada, foi realizado, mediante um estudo de caso, o cálculo manual perante o método analítico por placas, e o cálculo computacional pelo *software* da AltoQi Eberick V10, permitindo que os resultados obtidos sejam comparados, avaliando assim prováveis oscilações, caso exista, entre os dois métodos.

3.1 PROJETO DO ESTUDO DE CASO

Para o dimensionamento de lajes propostos nessa pesquisa, com objetivo de comparar os resultados obtidos por cálculo manual e computacional, foi utilizado um projeto de edificação residencial com 6 pavimentos tipos, com 4 apartamentos por pavimento, conforme planta baixa ilustrada na figura 14.

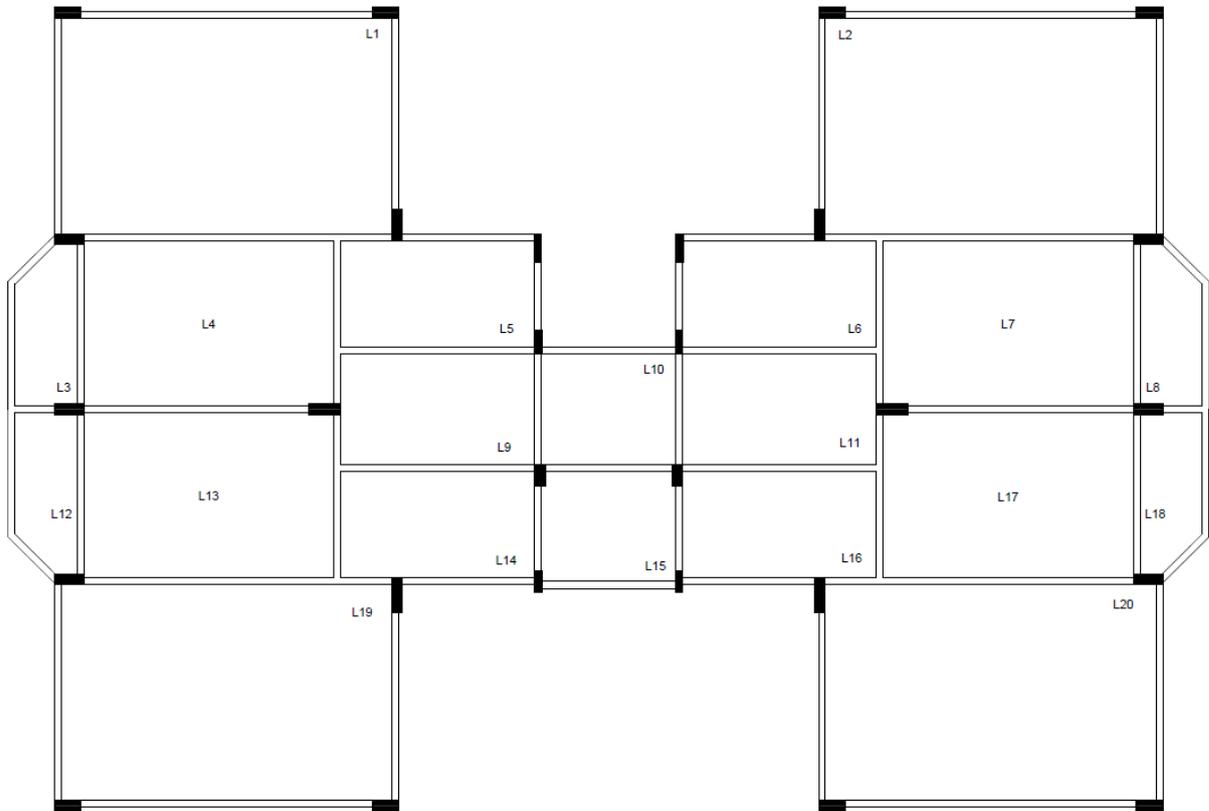
Figura 14-Planta baixa do pavimento tipo



Fonte: Os Autores, 2020.

Mediante o projeto em estudo, foi definida a planta de forma, com a distribuição dos painéis de laje maciça a serem calculados, conforme figura 15.

Figura 15- Disposição das lajes



Fonte: Os Autores, 2020.

3.2 CÁLCULO PELO MÉTODO DAS PLACAS

3.2.1 Análise do Pavimento

A análise do pavimento consiste em verificar individualmente todas as lajes contidas de um pavimento, analisando a geometria de cada placa, onde se calcula o vão efetivo, segundo figura 1. Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), o vão teórico pode se relacionar ao vão efetivo (lef), quando os apoios presentes podem ser considerados rígidos a translação vertical. Podemos obter o cálculo de vão efetivo nas equações 3 e 4.

$$lef = l_0 + a_1 + a_2 \quad (3)$$

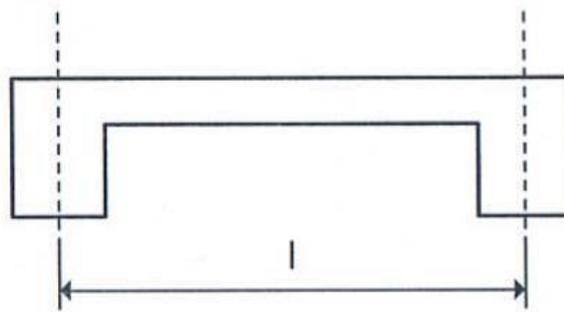
Onde:

a_1 é menor ou igual valor entre $t_1 / 2$ e $0,3h$ e a_2 é menor ou igual ao valor entre $t_2 / 2$ e $0,3h$

$$a_1 \leq \begin{cases} \frac{t_1}{2} \\ 0,3h \end{cases} \quad \text{e} \quad a_2 \leq \begin{cases} \frac{t_2}{2} \\ 0,3h \end{cases} \quad (4)$$

Para realização do cálculo, levando em consideração o vão teórico ao intervalo entre o centro do apoio desde que a largura referente as vigas de apoio não sejam grandes. Vale ressaltar que lajes em balanço, o comprimento a se considerar é a distância do centro de apoio até o limite do balanço, representado na figura 16.

Figura 16 - Definição usual, vão teórico.

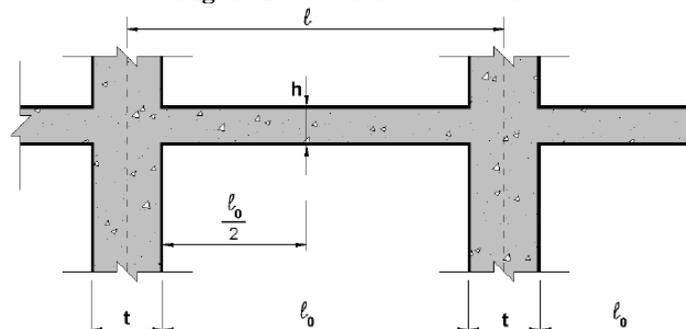


Fonte: ARAÚJO, 2014a.

Posteriormente a definição dos vãos efetivos presente na laje, é necessário saber o valor referente ao maior eixo (l_y) e menor eixo (l_x), para determinação se a laje é unidirecional ou bidirecional, para isso é necessário verificar a relação das duas direções, sendo a laje unidirecional àquela com relação superior a 2, e bidirecional a com relação igual ou inferior a 2.

Conforme Pinheiro (2010), a exemplificação dos vãos de eixo é definida pelo vão livre e vão teórico, Figura 17.

Figura 17-Vão livre e vão teórico



Fonte: PINHEIRO, 2010.

Lajes maciças e retangulares são definidas pelo seu comportamento a flexão. Sendo classificadas em Unidirecional e Bidirecional, conforme exemplificado pelas equações 1 e 2 no capítulo 2.

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), lajes são elementos de superfície plana, sujeitos principalmente a ações normais ao no seu plano. No projeto de lajes, o primeiro passo se baseia justamente em determinar os vãos livres (l_o) e os vãos teóricos (l) conforme descrito e mostrado na Figura 18.

3.2.2 Altura útil das Lajes

Devido à inexistência de uma recomendação a ser adotada sobre a altura inicial da laje, mantivemos a recomendação da NBR6118 (ABNT, 2014), que faz referência a limites de deformação a respeito da altura útil representado pela equação 5 (ARAUJO, 2014c).

$$d = (2,5 - 0,1 * n) * l \quad (5)$$

Onde:

d : Altura útil

n : número de engastes da laje

l : Menor vão entre L_x e $0,7L_y$

Posteriormente a definição da altura útil, é calculado a altura da laje h , onde é somado o valor de cobertura da armadura e a altura útil. A Equação 6 representa a determinação de h .

$$h = d + c + \phi + \frac{\phi}{2} \quad (6)$$

Onde:

d : Representa a altura útil encontrada pelo cálculo presente na equação 5

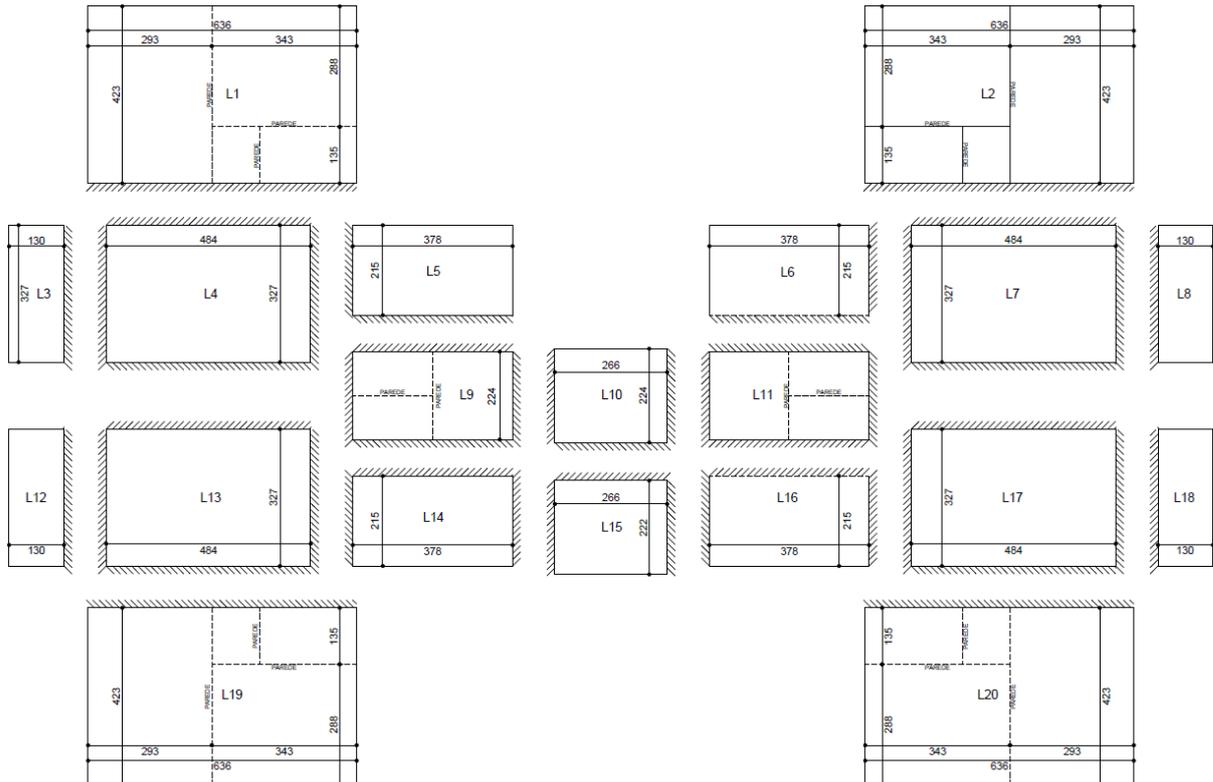
c : Representa cobertura nominal da armadura

ϕ : Representa o diâmetro adotado na armadura.

3.2.3 Carregamentos Existentes

É necessário definirmos as condições de contorno e vão de cálculo da laje para estudo de caso, conforme ilustrado na Figura 6. Seguindo essa metodologia, as lajes do pavimento tipo ficaram com as respectivas condições de contorno expressas na Figura 18.

Figura 18-Condições de contorno das lajes do pavimento tipo



Fonte: Os Autores, 2020.

Em seguida é definida a classificação quanto à disposição das armaduras, caso seja bidirecional as armaduras principais serão dispostas nos dois sentidos (x) e (y), caso seja unidirecional a armadura principal estará no sentido do menor vão, sendo a armadura de distribuição no sentido de maior vão.

Definimos o estado limite de serviço (ELS) pela equação 7 e estado limite último (ELU) pela equação 8. Os estados limites têm a função de definir os carregamentos existentes no elemento estrutural.

$$Fds = \Sigma Fgk + \Psi_2 \Sigma fqk \quad (7)$$

Onde:

Fds : Combinação de ações no estado limite de serviço

Fgk : Cargas permanentes

fqk : cargas variáveis

$$Fd = \gamma_f (\Sigma Fgk + fqk) \quad (8)$$

Onde:

Fd : Combinação de ações no estado limite útil

γ_f : Coeficiente

Fgk : Cargas permanentes

fqk : cargas variáveis

Para a realização precisa do cálculo manual, foi necessário obter as cargas que seriam utilizadas no projeto da edificação. A tabela 3 expõe as cargas utilizadas no projeto para se obter uma precisão na disposição da estrutura.

Tabela 3– Cargas adotadas no projeto estrutural

Descrição da Carga	Peso específico
Argamassa de cimento e areia	21kN/m ³
Blocos cerâmicos Furado	13kN/m ³
Ações Variáveis (Edificação Residencial)	1,5kN/m ³
Porcelanato	23kN/m ³

Fonte: Os Autores, 2020.

Os valores para inserção de cargas totais dos revestimentos foram utilizados no projeto da edificação. Os valores para revestimento foram apresentados na tabela 3 e os dados empregados para cálculo total das cargas totais das paredes da edificação apresentados na tabela 4, sendo que o valor encontrado de 2,01 kN/m² ainda foi multiplicado pela altura da parede de 2,69m, comprimento linear da mesma, e posteriormente dividido pela área das respectivas lajes.

Tabela 4 - Cargas total dos revestimentos utilizados.

Revestimentos	Espessura (m)	Peso específico (kN/m ³)	Carga (kN/m ²)
Porcelanato	0,011	23	0,25
Contrapiso	0,03	24	0,72
Argamassa superior	0,02	21	0,42
Argamassa inferior	0,02	21	0,42
G_{total}			1,81

Fonte: Os Autores, 2020.

Tabela 5 - Cargas totais dos revestimentos utilizados nas parede.

Parede	Espessura (m)	Peso específico (kN/m ³)	Carga (kN/m ²)
Tijolo	0,09	13	1,17
Reboco	0,04	21	0,84
P_{TOTAL}			2,01

Fonte: Os Autores, 2020.

Para o cálculo estrutural da edificação, adotamos um concreto com $f_{ck} = 25$ MPa, para a classe II de agressividade, cobrimento nominal “c” 2,5cm e diâmetro inicial da armadura de 10 mm. Estes valores estão em conformidade com a norma conforme Figura 10.

3.2.4 Cálculo das flechas, reações e momentos

Para uma estrutura confiável, é necessário o cálculo das flechas nas estruturas, este cálculo se torna indispensável na verificação da estrutura, evitando que a mesma sofra deformações excessivas. De maneira análoga, a flecha inicial em lajes unidirecionais é calculada por meio da equação 9.

$$W = \frac{K}{384} \frac{Fds l^4}{D} \quad (9)$$

Onde:

W : Flecha Inicial

K : Coeficiente para cálculo da flecha

D : Rigidez na flexão da laje

Fds : Carga total em serviço

l : Menor vão de cálculo

Determinamos a rigidez à flexão pela equação 10.

$$D = \frac{Ecs h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (10)$$

Onde:

Ecs: Módulo secante.

H: espessura da laje.

V: Poisson do concreto = 0,2.

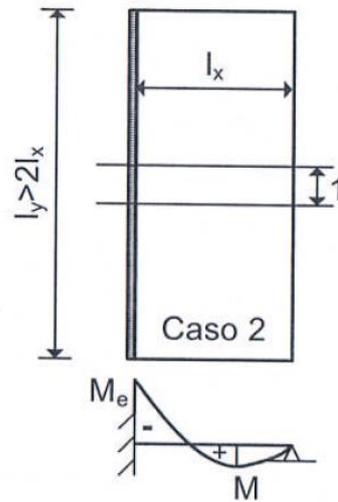
Conforme CEB/90, se obtém o módulo secante por meio da equação 11.

$$Ecs = 0,85 * 21500 \left(\frac{fck + 8}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

O coeficiente K depende diretamente das condições presentes nos apoios. O coeficiente K é apresentado na figura 20, onde foi utilizado o caso 2, definindo o $K = 2$ para o cálculo da flecha no centro da laje.

Em lajes armadas unidirecional, apenas calcula-se o momento fletor na direção do vão menor, este cálculo é realizado em favor da segurança da edificação. É ilustrada na figura 19, a determinação e condição dos momentos fletores em direção do menor vão das lajes armadas. Neste trabalho adotaremos o caso 2.

Figura 19– Laje apoiado em um lado e engastado no outro



Fonte: ARAÚJO, 2014b.

Onde para se calcular o máximo momento positivo utiliza a equação 12.

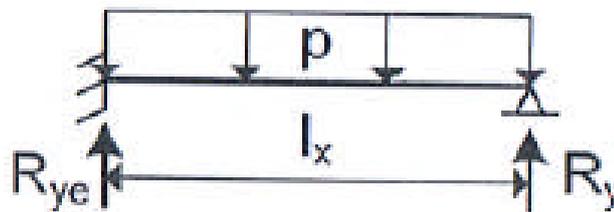
$$M = \frac{Pl^2}{14,22} \quad (12)$$

No engaste se calcula o momento negativo pela equação 13.

$$M_e = -\frac{Pl^2x}{8} \quad (13)$$

Para o caso 2 ilustrado na figura 20, foram utilizadas as fórmulas para o cálculo das reações. Apresentando na equação 14 e 15.

Figura 20 - Reações de Apoio caso 2



Fonte: Araújo, 2014a.

$$R_y = \frac{3Fdlx}{8} \quad (14)$$

$$R_{ye} = \frac{5Fdlx}{8} \quad (15)$$

Para a determinação do cálculo de lajes armadas em duas direções, foram utilizadas as seguintes fórmulas:

Para o cálculo das flechas iniciais foi utilizado a equação 16.

$$W_i = 0,001 * W_c \frac{F d l^4}{D} \quad (16)$$

Onde:

Wi: Flecha inicial

Wc: Flecha calculada por tabelas no ápice

Para o cálculo das flechas por fluência foi utilizado a equação 17.

$$W_f \cong 8,2 \frac{\varphi R H}{\sqrt{f c k + 8}} \quad (17)$$

Onde:

Wf: Flecha por fluência

Rh: Umidade relativa ambiente (Fixado em 70%).

Para o cálculo do coeficiente de umidade relativa do ambiente foi utilizado a equação 18.

$$\varphi R H = 1 + \frac{1 - R H / 100}{0,46 \left(\frac{h_o}{100} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (18)$$

Onde:

ho: Espessura equivalente do elemento estrutural (mm).

Para o cálculo da espessura do elemento estrutural foi utilizado a equação 19.

$$h_o = \frac{2 * A c}{\mu} \quad (19)$$

Para o cálculo da flecha total foi utilizado a equação 20.

$$Wt = (1 + wf) * Wi \quad (20)$$

Para o cálculo das reações foi utilizado as equações 21, 22, 23 e 24.

$$Rx = 0,001 * rx * Fd * l \quad (21)$$

$$Ry = 0,001 * ry * Fd * l \quad (22)$$

$$Rye = 0,001 * rye * Fd * l \quad (23)$$

$$Rxe = 0,001 * rxe * Fd * l \quad (24)$$

Para o cálculo dos momentos foi utilizado a equação 25, 26, 27 e 28.

$$Mx = 0,001 * mx * Fd * l^2 \quad (25)$$

$$My = 0,001 * my * Fd * l^2 \quad (26)$$

$$Mye = 0,001 * mye * Fd * l^2 \quad (27)$$

$$Mxe = 0,001 * mxe * Fd * l^2 \quad (28)$$

No cálculo de área de aço das lajes em geral é necessário primeiramente inteirar-se de a posição da linha neutra e posteriormente determinar o domínio de deformação da laje, conforme a equação 29.

$$X = 1,25 * d * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Md}{0,425 * fcd * b * d^2}} \right) \quad (29)$$

Onde:

X: Posição da linha neutra

d: Altura útil

Md: Momento de cálculo

Fcd: Resistência de cálculo do concreto

b: Base da laje (Fixada em 1 metro)

Ao se obter a posição da linha neutra a área de aço, será calculada pela equação 30.

$$A_s = \frac{Md}{f_{yd} * (d - 0,4x)} \quad (30)$$

Onde:

A_s : Área de aço

f_{yd} : Resistência de cálculo do aço

x : Linha neutra (equação anterior)

Para a área de aço mínima, calculada pela equação 31.

$$A_{s, \min} = \rho_{\min} * b * h \quad (31)$$

Para a área de aço máxima, calculada pela equação 32.

$$A_{s, \max} = 0,04 * b * h \quad (32)$$

A determinação do diâmetro máximo é calculada pela equação 33.

$$\phi l \leq \frac{h}{8} \quad (33)$$

A determinação do espaçamento entre as barras é calculada pela equação 34, 35 e 36.

Positiva

$$A_+ \leq \left\{ \frac{20 \text{ cm}}{2 * h} \right\} \quad (34)$$

Negativa

$$A_- \leq 25 \text{ cm} \quad (35)$$

Armadura distribuição

$$A_{s, \text{dist.}} \leq 33 \text{ cm} \quad (36)$$

Para o cálculo da armadura de distribuição utiliza a equação 37.

$$A_{s,dist} \geq \left\{ \begin{array}{l} \frac{A_{s+}/5}{0,9 \text{ cm}^2/m} \\ A_{s,mín} \end{array} \right\} \quad (37)$$

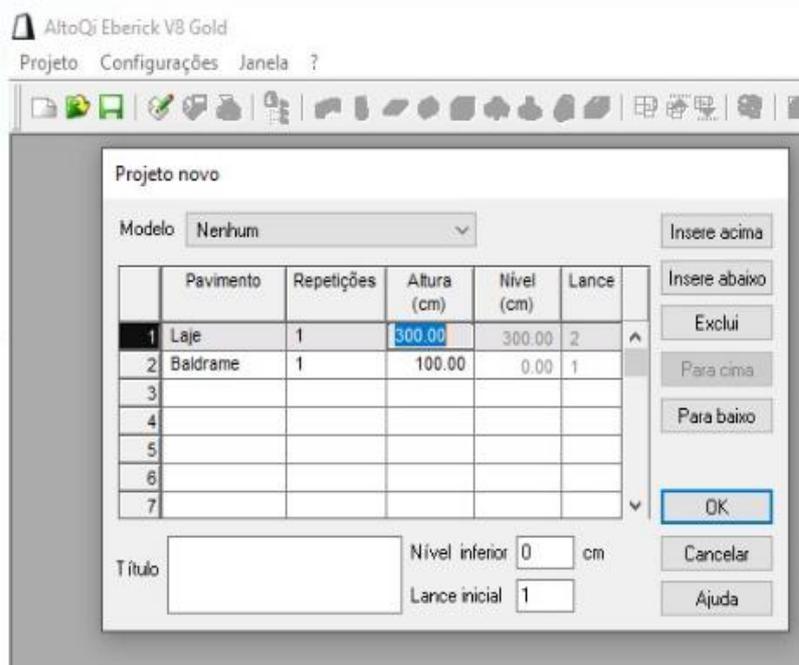
3.3 LANÇAMENTO EM SOFTWARE EBERICK

Para a realização dos cálculos computacionais, foi utilizado o *software Eberick V10*, desenvolvido pela empresa brasileira AltoQi Tecnologia em informática Ltda. O software possibilita a elaboração de projeto estrutural, lançamentos, análises, dimensionamento e detalhamento estrutural.

Como o objetivo deste estudo são as lajes, foi lançado apenas o pavimento tipo, com apoios indeslocáveis, parâmetro adotado nos cálculos manuais, ou seja, foram definidas dimensões excessivas para as vigas, para que as mesmas não interferissem no dimensionamento das lajes, acarretando novos esforços e novas flechas oriundas de deflexões que poderiam ocorrer exclusivamente nas vigas.

Inicialmente houve o lançamento de vigas baldrame e laje existentes no projeto, a edificação de estudo de caso possui 6 pavimentos. Realizamos o lançamento de apenas 1 pavimento, lançado conforme demonstrado na figura 21.

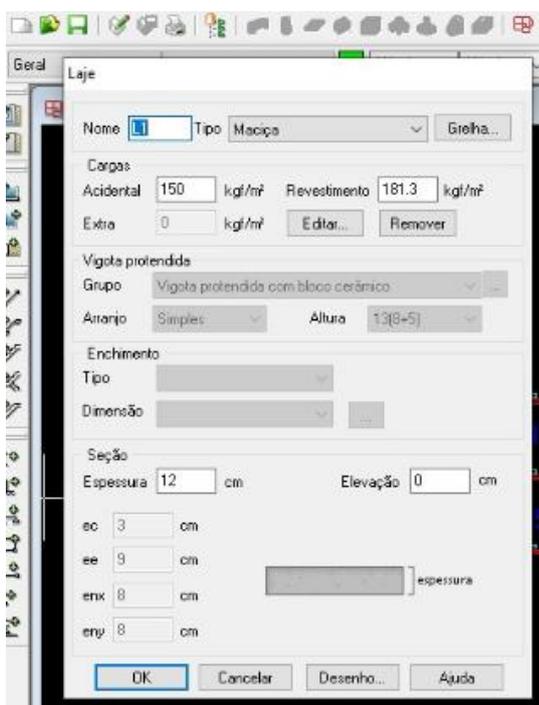
Figura 21 - Janela de lançamento inicial do *Software AltoQi EberickV10*



Fonte: Os Autores, 2020.

Subsequentemente realizamos o posicionamento dos elementos estruturais tais como vigas, pilares e lajes do determinado pavimento. Foram inseridas as cargas de paredes, cargas acidentais e cargas permanentes, conforme definido pela norma NBR 6120 (ABNT, 2019), ilustrado na Figura 22.

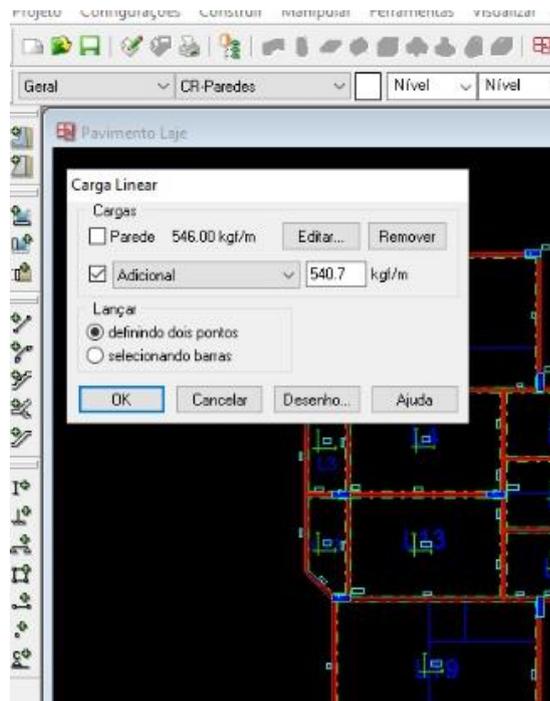
Figura 22 - Janela lançamento de Cargas nas lajes



Fonte: Os Autores, 2020.

O lançamento das cargas de parede foi realizado nas lajes L1, L2, L9, L11, L19 e L20, que apresentam paredes internas mediante arquitetura, lançadas conforme Figura 23.

Figura 23 -Lançamento das cargas de parede.



Fonte: Os Autores, 2020.

No término do lançamento das cargas, foi iniciado o processamento (Figura 24) da estrutura com o objetivo de analisar as áreas de aço, momentos, flechas, entre outras informações relevantes para o comparativo entre metodologias de dimensionamento de lajes.

Figura 24 - Processamento da estrutura



Fonte: Os Autores, 2020.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico exibiremos os resultados obtidos após o lançamento e processamento estrutural por meio do *software Eberick V10*. Também serão apresentados os valores obtidos por meio de cálculo manual, apresentados em tabelas para análise comparativa, identificando possíveis divergências de resultados entre os dois métodos.

4.1 COMPARATIVO DE RESULTADOS

Inicialmente foi realizado o pré-dimensionamento da altura das lajes, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Pré-dimensionamento da altura da laje

Laje	Lx	Ly	Ly/Lx	l	n	0,7 ly	l*(cm)	d(cm)	h(cm)		
A	423,0	636,0	1,5	BI	1,0	445,2	423,0	10,2	10,2	≈	11,0
B	130,0	327,0	2,5	UNI	2,0	228,9	130,0	3,0	3,0	≈	8,0
C	327,0	484,0	1,5	BI	4,0	338,8	327,0	6,9	6,9	≈	8,0
D	215,0	378,0	1,8	BI	2,0	264,6	215,0	4,9	4,9	≈	8,0
E	224,0	378,0	1,7	BI	4,0	264,6	224,0	4,7	4,7	≈	8,0
F	378,0	215,0	0,6	BI	3,0	150,5	150,5	3,3	3,3	≈	8,0
G	266,0	224,0	0,8	BI	3,0	156,8	156,8	3,4	3,4	≈	8,0
H	266,0	222,0	0,8	BI	3,0	155,4	155,4	3,4	3,4	≈	8,0

Lx, menor vão; Ly, maior vão; λ , tipo de laje; n, número de vínculos; l*, vão de cálculo da laje, d; altura útil; h, altura adotada. (A=L1,L2,L19,L20; B=L3=L8,L12,L18; C=L4,L7,L13,L17; D=L5,L6; E=L9,L11; F=L14,L16; G=L10; H=L15).

Fonte: Os Autores, 2020.

Pelas dimensões Lx e Ly do projeto, foi possível fazer um pré-dimensionamento da altura útil das lajes, utilizando a equação 5 realizamos o cálculo da altura útil, posteriormente, obtivemos maior clareza para dimensionar a altura final da laje. Após o pré-dimensionamento foi adotado altura “h” de doze centímetros em todas as lajes, para maior exatidão dos cálculos.

Em seguida foi realizado o cálculo das flechas, onde podemos identificar os deslocamentos nas lajes, além da divergência apresentada entre os dois métodos, manual e computacional, descrito em porcentagem, na Tabela 6.

Tabela 7 - Valores de Flecha presente na edificação

Laje	Cálculo manual			Cálculo no Eberick		Divergência %	
	Dados	Flechas	Flechas	Flechas			
	Lx/Ly (m)	Ly/Lx (m)	h (cm)	Wt (mm)	Wlim (mm)	Wt (mm)	
A	0,67	1,50	12,00	7,72	16,92	8,30	7,51
B	0,40	2,52	12,00	0,06	5,20	0,00	-100,00
C	0,68	1,48	12,00	1,05	13,08	0,50	-52,38
D	0,57	1,76	12,00	0,39	8,60	0,30	-23,08
E	0,59	1,69	12,00	0,38	8,96	0,50	31,58
F	1,76	0,57	12,00	0,37	8,60	0,20	-45,95
G	1,19	0,84	12,00	0,25	8,96	0,20	-20,00
H	1,20	0,83	12,00	0,25	8,88	0,20	-20,00

Lx, menor vão; Ly, maior vão; h, altura da laje; Wt, flecha total; Wlim, flecha limite. (A=L1,L2,L19,L20; B=L3=L8,L12,L18; C=L4,L7,L13,L17; D=L5,L6; E=L9,L11; F=L14,L16; G=L10; H=L15).

Fonte: Os Autores, 2020.

Pode-se perceber, mediante a Tabela 7, que os resultados das flechas obtiveram menor divergência nas lajes de maior dimensão, como as lajes A, com divergência de 7,51%, sendo a flecha obtida pelo cálculo computacional, maior que o cálculo manual, em contrapartida, a maior divergência foi identificada nas lajes C, com -52,38% de oscilação, sendo a flecha manual o de maior valor, o valor negativo (-) sendo que o cálculo manual o valor foi maior que do software. Sendo que nas lajes B o software não realizou o cálculo das flechas, por este motivo está uma porcentagem de 100%.

Em seguida foi realizado o cálculo dos momentos presentes na laje, onde podemos identificar os resultados na tabela 8. A coluna divergência mostra a diferença em porcentagem entre os dois métodos utilizados.

Tabela 8 - Resultados de momentos fletores

Laje	Calculo manual				Calculo Eberick				Divergência (%)			
	Momento(KN/m)				Momento(KN/m)							
	Mdx	Mdxe	Mdy	Mdye	Mdx	Mdxe	Mdy	Mdye	Mdx	Mdxe	Mdy	Mdye
A	4,76	0,00	10,79	-22,69	6,71	0,00	14,76	-23,11	40,97	-	36,79	1,85
B	1,05	-1,87	-	-	1,30	-1,95	-	-	23,81	4,28	-	-
C	1,62	-5,35	3,35	-7,04	3,85	-4,19	2,78	-12,57	137,65	-21,68	-17,01	78,55
D	0,89	-3,18	2,20	-4,57	2,85	-1,47	2,72	-5,14	220,22	-53,77	23,64	12,47
E	0,92	-3,54	2,42	-4,96	2,55	-4,96	4,38	-6,85	177,17	40,11	80,99	38,10
F	2,06	-4,41	0,95	-3,15	2,83	-3,10	2,33	-5,35	37,38	-29,71	145,26	69,84
G	1,35	-3,19	1,24	-3,04	1,22	-3,10	1,58	-3,42	-9,63	-2,82	27,42	12,50
H	1,30	-3,17	1,22	-3,00	1,25	-3,12	1,54	-3,43	-3,85	-1,58	26,23	14,33

Mdx, momento de projeto em x; Mdy, momento de projeto em y; Mdxe, momento negativo em x; Mdye, momento negativo em y. (A=L1,L2,L19,L20; B=L3=L8,L12,L18; C=L4,L7,L13,L17; D=L5,L6; E=L9,L11; F=L14,L16; G=L10; H=L15).

Fonte: Os Autores, 2020.

Os resultados da Tabela 8 indicam os momentos fletores nas duas direções das lajes 2D, além dos momentos negativos. Ao comparar os resultados dos momentos entre o cálculo manual e cálculo no *Eberick*, analisando as divergências para os momentos, pode-se observar que o momento fletor positivo na direção de x apresenta maior variação para as lajes C, D e E, sendo a C com 137,65 % de divergência, as lajes D com 220,22% e nas lajes E com 177,17% de divergências. Para o momento negativo na direção de x (Mdxe), nota-se que apenas as lajes D apresentam divergência maior que 50%, para (Mdy) momentos positivos em y as lajes E e F ficaram em torno de 145,26% e 80,99 %. Em y, nos engastes, momento negativo em y (Mdye) as lajes C e F, ficaram com divergências superiores a 69%.

Obtiveram certa discrepância entre os métodos. O *software* considerou em seu cálculo a rigidez a torção, e no método manual, a estrutura foi calculada de forma isolada considerando uma estrutura perfeita sem deslocamentos ou deformações.

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos pelo método de cálculo manual da teoria das placas e pelo dimensionamento com o *software Eberick*.

Tabela 9 - Resultados do cálculo das áreas de aço das lajes

Laje	Cálculo manual					Cálculo no Eberick				
	Área de Aço (cm ² /m)					Área de Aço (cm ² /m)				
	As,x	As,x ⁻	As,y	As,y ⁻	As,min	As,x	As,x ⁻	As,y	As,y ⁻	As,min
A	1,24	0,00	2,89	6,46	1,80	1,73	1,21	4,32	7,40	1,21
B	0,27	0,48	1,80	1,80	1,80	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
C	0,42	1,40	0,87	1,85	1,80	1,21	0,88	1,21	3,58	1,21
D	0,23	0,82	0,57	1,19	1,80	1,21	0,00	1,21	1,15	1,21
E	0,24	0,92	0,63	1,30	1,80	1,21	1,05	1,21	1,87	1,21
F	0,53	1,15	0,24	0,82	1,80	1,21	0,65	1,21	1,20	1,21
G	0,35	0,83	0,32	0,79	1,80	1,21	0,65	1,21	0,76	1,21
H	0,35	0,83	0,31	0,78	1,80	1,21	0,65	1,21	0,76	1,21

As_x, área de aço positivo em x; As_x⁻, área de aço negativa em x; As_y, área de aço positiva em y; As_y⁻, área de aço negativa em y; As_{min}, área de aço mínima. (A=L1,L2,L19,L20; B=L3=L8,L12,L18; C=L4,L7,L13,L17; D=L5,L6; E=L9,L11; F=L14,L16; G=L10; H=L15).

Fonte: Os Autores, 2020.

Após a realização dos cálculos na tabela anterior (Tabela 9), identifica-se que a área de aço calculada é menor que a área de aço mínima especificada pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) em praticamente todas as lajes, sendo assim, foi adotado o valor mínimo permitido pela norma, para cálculo manual, no valor de 1,80 cm²/m e para o cálculo computacional pelo *software Eberick*, no valor de 1,21 cm²/m, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados adotados para área de aço.

Lajes	Calculo manual				Calculo Eberick				Divergência (%)			
	Área de Aço final(cm ² /m)				Área de Aço final(cm ² /m)				As,x	As,x ⁻	As,y	As,y ⁻
	As,x	As,x ⁻	As,y	As,y ⁻	As,x	As,x ⁻	As,y	As,y ⁻				
A	1,80	1,80	2,89	6,46	1,73	1,21	4,32	7,40	-3,89	-32,78	49,48	14,55
B	1,80	1,80	1,80	1,80	1,21	1,21	1,21	1,21	-32,78	-32,78	-32,78	-32,78
C	1,80	1,80	1,80	1,85	1,21	1,21	1,21	3,58	-32,78	-32,78	-32,78	93,51
D	1,80	1,80	1,80	1,80	1,21	1,21	1,21	1,21	-32,78	-32,78	-32,78	-32,78
E	1,80	1,80	1,80	1,80	1,21	1,21	1,21	1,87	-32,78	-32,78	-32,78	3,89
F	1,80	1,80	1,80	1,80	1,21	1,21	1,21	1,21	-32,78	-32,78	-32,78	-32,78
G	1,80	1,80	1,80	1,80	1,21	1,21	1,21	1,21	-32,78	-32,78	-32,78	-32,78
H	1,80	1,80	1,80	1,80	1,21	1,21	1,21	1,21	-32,78	-32,78	-32,78	-32,78

As_x, área de aço positivo em x; As_x⁻, área de aço negativa em x; As_y, área de aço positiva em y; As_y⁻, área de aço negativa em y; As_{min}, área de aço mínima. (A=L1,L2,L19,L20; B=L3=L8,L12,L18; C=L4,L7,L13,L17; D=L5,L6; E=L9,L11; F=L14,L16; G=L10; H=L15).

Fonte: Os Autores, 2020.

Após a definição da área de aço positivas e negativas, nas duas direções, conforme Tabela 10, pode-se perceber que no cálculo manual a área de aço mínima calculada foi de 1,80cm²/m relacionando se a resistência característica a compressão do concreto (FCK) com altura da laje, conforme a equação 31 e figura 13 contidas nesse trabalho. O valor citado representado na tabela 10, conforme especificação na NBR 6118/2014. No entanto o *software* computacional *Eberick*, faz uma minoração da área de aço mínima calculada manualmente, multiplicando este valor por 67%. Considerando a figura 14, onde lajes positivas armadas em duas direções aceita este método de minoração adotada pelo software, reduzindo sua armadura mínima.

Observa se que onde as áreas de aço calculada pelos dois métodos foi superior a área de aço mínima exigida pela norma (NBR 6118), o cálculo realizado pelo *software* apresentou divergências maiores em todas essas lajes como exemplo: nas lajes A, a armadura positiva em y no software foi em torno de 50% maior e nas lajes C a armadura negativa nos engastes na direção de y é superior a 90% da área de aço obtida pelo método manual.

5 CONCLUSÕES

A inserção de softwares traz inúmeras vantagens, obtendo maior eficiência e seguranças nos cálculos, com o avanço da tecnologia e a necessidade de rápidas informações nota-se a necessidade de intervenções computacionais em cálculos na engenharia. Visto que o mundo futurista está presente até mesmo na construção civil.

Com a obtenção dos resultados, verificamos que houve divergências nos valores obtidos nos métodos manuais e computacionais, estas variações ocorrem devido às variáveis formas de resolução. Pelo método de cálculo manual, a estrutura é isoladamente analisada sendo dividida por pavimentos, já o software analisa toda a estrutura de forma global. O software computacional considera as vigas como deformáveis, já o cálculo manual considera como rígidas, o software também calcula os momentos com maior precisão, sendo assim é identificando o motivo de ter alcançado variações nos resultados processados pelo software.

No cálculo das armaduras é considerada a simetria da estrutura para realização do cálculo de momento, podendo ocorrer divergências conforme pico de tensão gerado. Mostrando a importância de um calculista, para conferir os cálculos obtidos e saber analisar e interpretar os valores processados. Conforme os resultados obtidos, é notável que o cálculo manual seja atribuído com algumas limitações, sendo que o mesmo não considera o real comportamento da estrutura. Já os softwares, consideram todo o comportamento estrutural do projeto.

Portanto, identifica-se que o cálculo manual é adequado apenas para uma prévia de lançamento, no entanto o ideal seria a utilização de um software computacional para o desenvolvimento seguro de um lançamento estrutural. O software ganha frente ao método manual devido à consideração do real comportamento da estrutura, garantindo assim ao calculista uma forma de lançamento seguro e confiável. Vale salientar que o software não substitui o conhecimento do engenheiro calculista, visto que softwares são passíveis de falhas eletrônicas. Visto assim a importância de se ter um bom profissional junto a um bom software.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 4 Ed. Dunas, 2014a, v.1 Rio Grande.

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 4 Ed. Dunas, 2014b, v.2 Rio Grande.

ARAÚJO, J. M. **Projeto Estrutural de Edifícios de Concreto Armado**. 3 Ed. Dunas, 2014c, Rio Grande.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto Armado – Procedimento, Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15421**: Projeto de estruturas resistentes ao sismo enviado para a disciplina de Concreto Armado, Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações, Rio de Janeiro. 2019.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Lajes de Concreto**. São Paulo. 2005.

CAMPOS FILHO, A. **Projeto de lajes maciça de concreto armado**. 2014, UFRGS, Porto Alegre, RS. Disponível em <https://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/eng01112/lajes.pdf> Acesso em setembro de 2019.

CARVALHO, R C; PINHEIRO, L M. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2013. v. 2.

CARVALHO, R C; FIGUEIREDO FILHO, J R de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos, 2014.

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. **O concreto como material de construção. Cadernos de Graduação**, v. 1, n. 3, p. 49-58, 2013.

EMERICK, A. A. **Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. Brasília. 2002

FRANCA, A.B.M.; FUSCO, P.B. **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios. São Paulo**, AFALA & ABRAPEX, 1997.

QUINZA, E. **A História do Concreto**. Civilização Engenharia, Works 2017. Disponível em <<http://www.howconcreteworks.com/>>. Acesso em outubro de 2019.

KIMURA, Alio Ernesto. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado**. PINI. São Paulo, 2007.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E.; **Construções de Concreto – Princípios Básicos do Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado**. v.1, 2007.

LONGO, H. I. **Considerações Sobre o Projeto de Estruturas de Edificações de Concreto Armado**. Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

MEDEIROS, T. M. M. **A Qualidade de Software na engenharia**. Quality Group, Lavras 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo>>. Acesso em setembro de 2019.

MOTTA, S. R. F. **Sustainable and design building processes**. UFMG. Minas Gerais 2009. Disponível em: <www.revistas.usp.br>. Acesso em setembro de 2019.

OLIVEIRA, Marcelo Moizinho. **O uso de softwares na construção civil**. AEC. São Paulo, 2012, IFTO. Disponível em: <<http://propi.ifto.edu.br/docs>>. Acesso em setembro de 2019.

RABELLO, F. T. **Estudo de Lajes Lisas de Concreto com Visão Integrada de Flexão e Puncção**. Tese de Doutorado. UFSC. Florianópolis. 2016.

SANTOS, José Sérgio. **Desconstruindo o projeto estrutural de edifícios**. 1 Ed. São Paulo, Oficina Textos, 2017, v.1.

SILVA, L. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas e maciças em função dos vãos entre apoios**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SOUZA, V. C. M; CUNHA, A, J, P. **Lajes em Concreto Armado e Protendido**. Rio de Janeiro. Ed. UERJ, 1998.

PINHEIRO, **Libânio M. Fundamentos do concreto e projetos de edifícios**. São Carlos, SP, 2010. Apostila. Universidade de São Paulo - USP.

TANIGUTI, Eliana Kimie. **Presente e Futuro do Concreto**. ABCP. São Paulo, Concrete Show, 2013. Disponível em: <<https://www.science.gov>>. Acesso em setembro de 2019.

VASCONCELLOS, J. C. **Concreto Armado, Arquitetura Moderna**, 2004. Universidade de Estado do Rio de Janeiro, Porto Alegre, 2004.