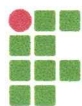


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TAMIREZ DE OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MODELOS ESTRUTURAIS NO
CÁLCULO DE LAJES

Jataí
2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico/Tecnológico - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jataí, 03/ 02/ 2022.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

TAMIRES DE OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MODELOS ESTRUTURAIS NO
CÁLCULO DE LAJES

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Orientador: Me. Vitor Freitas Gonçalves

Jataí
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Silva, Tamires de Oliveira.

Análise da influência de diferentes modelos estruturais no cálculo de lajes [manuscrito] / Tamires de Oliveira Silva. -- Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2022.

41f. ; il.

Orientador: Prof. Me. Vitor Freitas Gonçalves.

Bibliografias.

1. Grelha. 2. Charneiras Plásticas. 3. Lajes. 4. Análise Estrutural I. Gonçalves, Vitor Freitas. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária - Rosy Cristina O. Barbosa - CRB 1/2380 – C. Jataí. Cód. F023/2022-1.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

TAMIRES DE OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MODELOS ESTRUTURAIS NO CÁLCULO DE LAJES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 03 de fevereiro de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Vitor Freitas Gonçalves

Presidente da banca / Orientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof^a. Dr^a. Monica Maria Emerenciano Bueno

Membro Interno

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Me. Márcio Alves de Oliveira Filho

Membro Externo

Faculdade Santa Rita de Cássia (UNIFASC)

Jataí – GO
2022

Documento assinado eletronicamente por:

- **Tamires de Oliveira Silva, TAMIRES DE OLIVEIRA SILVA - ESTUDANTE - IFG - CÂMPUS JATAÍ (10870883000306)**, em 03/03/2022 17:35:29.
- **Marcio Alves de Oliveira Filho, MARCIO ALVES DE OLIVEIRA FILHO - 214205 - ENGENHEIRO CIVIL - IFG - CÂMPUS JATAÍ (10870883000306)**, em 04/02/2022 13:41:09.
- **Monica Maria Emerenciano Bueno, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 04/02/2022 10:34:03.
- **Vitor Freitas Goncalves, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO**, em 04/02/2022 10:09:25.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 31/01/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 241105

Código de Autenticação: 214a45befb



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua Maria Vieira Cunha, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3605-0837 (ramal: 837)

AGRADECIMENTO

Sou grata primeiramente a Deus, por me capacitar a concluir essa pesquisa apesar das dificuldades. Por sempre me mostrar que eu não estou só e que ele realiza sempre o melhor pra nós no tempo dele.

Sou grata aos meus pais Antonio e Maria pela educação, suporte e amor que foi tão importante, a minha irmã Tainá por sempre acreditar que eu sou capaz até mesmo quando eu não acreditava mais, aos meus amigos e colegas de faculdade pelo apoio e incentivo.

Ao meu Orientador Victor por se dispor a me ensinar em frente as dificuldades impostas pela pandemia, pelo suporte e disponibilização para sanar minhas dúvidas.

E por fim, obrigada ao Instituto Federal e à todos os professores que me passou um pouco de conhecimento. Abrem caminhos e contribuem para o desenvolvimento do aluno como profissional e muitas vezes também pessoal.

RESUMO

O tema da pesquisa apresentada é análise da influência de diferentes modelos estruturais no cálculo de lajes, com o objetivo de aplicação da planta de formas estruturais em dois métodos de cálculo - Modelo de Grelhas e o Modelo de Charneiras Plásticas. A estrutura foi modelada para o Método das Charneiras Plásticas realizando cálculos manuais, já para o Método de Grelhas optou-se pela utilização do software Grelha que calcula somente a fase elástica da estrutura. Após a obtenção dos resultados, que foram apresentados por meio de equações e tabelas, foi feito um comparativo entre os modelos e abordado as considerações finais sobre eles, destacando o resultado mais satisfatório. Observou-se que o resultado obtido por meio do software escolhido para o cálculo do modelo de grelhas não foi satisfatório devido a alguma rotina interna do software, em que a grelha calculada parece ser diferente da grelha que aparece na interface gráfica, o que prejudicou a análise comparativa. Portanto, o modelo de Charneiras Plásticas apresentou melhores resultados neste trabalho.

Palavras-chave: Grelha. Charneiras Plásticas. Lajes. Análise Estrutural

ABSTRACT

The subject of the research presented is the analysis of the influence of different structural models in the calculation of slabs, with the objective of applying the plan of structural design in two calculation methods, - Grid Model and the Plastic Hinge Model -. The structure was modeled for the Plastic Hinge Method performing manual calculations, while for the Grid Method it was decided to use a software. After obtaining the results that were presented through equations and tables, a comparison was made between the models and the final considerations about them were approached, highlighting the most satisfactory result.

Keywords: Grid. plastic hinges. Slab. Analysis Structural

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2 - Representação de uma laje	21
Figura 2.3 - Altura útil d para armadura de flexão positiva em laje maciça	22
Figura 2.4 - Lajes e Grelha equivalente.	24
Figura 2.5 – Demonstrativo das barras e nós em uma laje.....	24
Figura 2.6 - Graus de liberdade de um elemento de grelha.	25
Figura 2.7 – Processo de áreas	26
Figura 4.1 - Lançamento estrutural no projeto arquitetônico.....	31
Figura 4.2 – Interface Grelha	33
Figura 4.3 – Linhas Rays	33
Figura 4.4 – Pilares	34
Figura 4.5 - Vigas	34
Figura 4.6 - Lajes	35
Figura 4.7 – Grelha Principal.....	36
Figura 4.8 – Deformações Visíveis (Perspectiva Isométrica).....	36
Figura 4.9 – Diagrama Tridimensional	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Espessura das lajes	28
Tabela 4.2 – Classificação das lajes	37
Tabela 5.1 – Resultados: Charneiras Plásticas	39
Tabela 5.2 – Resultados: Grelhas	39
Tabela 5.3 – Diferença Relativa entre modelos	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ELS - Estados-Limites de Serviço;

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR - Norma Brasileira;

P - Pilar;

V - Vigas;

d - Altura útil da laje;

h - Espessura do material;

n - Número de bordas engastadas da laje;

c - Cobrimento nominal da armadura conforme a classe de agressividade;

$\{F\}$ - Matriz coluna (vetor) das cargas externas;

$[K]$ - Matriz de rigidez da estrutura;

$\{d\}$ - Matriz coluna dos deslocamentos;

p – Carga total distribuída na laje;

g - Peso próprio;

M - Momento fletor;

E_c - Módulo de elasticidade;

I - Momento de inércia;

q - Carga acidental;

f_{ck} - Resistência característica do concreto a compressão;

t_1 e t_2 - Largura da viga;

LISTA DE SÍMBOLOS

ℓ^* - Dimensão da laje;

$\phi\ell$ - Diâmetro barra longitudinal;

ℓ_x - Menor dimensão da laje em metros;

ℓ_y - Maior dimensão da laje em metros;

μ - Coeficiente da tabela em função da relação entre os vãos e do tipo de apoio da laje;

ν - Coeficiente da tabela que auxilia no cálculo de reações de apoio;

α - Valor tabelado em função das vinculações das lajes;

l_o - Dimensão da laje em metro;

λ - Classificação das lajes;

γ - Peso específico do material;

μ_x - Parâmetro tabelado admissional para cálculo do momento no meio do vão em x;

μ_x - Parâmetro tabelado admissional para cálculo do momento no meio do vão em x no engaste;

μ_y - Parâmetro tabelado admissional para cálculo do momento no meio do vão em y;

μ_y - Parâmetro tabelado admissional para cálculo do momento no meio do vão em y no engaste;

M_x - Momento fletor na direção x no meio do vão;

M_x - Momento fletor na direção x no engaste;

M_y - Momento fletor na direção y no meio do vão;

M_y - Momento fletor na direção y no engaste;

a_i - Deslocamentos de lajes;

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	12
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	14
JUSTIFICATIVA	15
OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJE	17
2.1.1 ESTIMATIVA DA ALTURA DA LAJE	18
Método de Grelhas	20
Método das Charneiras Plásticas	23
2.3.1 Fundamentações da Teoria das Charneiras Plásticas	26
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	27
CAPÍTULO 4 MODELAGEM ESTRUTURAL	28
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
4.2 PARÂMETROS DE CÁLCULO	28
4.3 PLANTA DE FORMAS ESTRUTURAIS	29
4.4 lançamento da estrutura no programa grelha	29
4.5 Cálculo de Lajes por Charneiras Plásticas com uso de Tabelas com valores extraídos de Bares (1972) e adaptados pelo autor Pinheiro L. M. (2007)	36
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	39
5.1 CÁLCULOS OBTIDOS POR CHARNEIRAS PLÁSTICAS	39
5.2 CÁLCULOS OBTIDOS POR GRELHAS	39
5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	40
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS	43

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A engenharia estrutural consiste em planejamento, projeto, construção e manutenção de sistemas estruturais, garantindo ao cliente a entrega de um projeto estrutural que atenda a todas as necessidades para as quais a estrutura é construída, satisfazendo condições de segurança, de utilização, estéticas, ambientais e construtivas.

Kimura (2007) diz que a elaboração de um projeto estrutural é um trabalho complexo, subdividido em quatro etapas principais: concepção estrutural, análise estrutural, dimensionamento e detalhamento, e por fim, emissão de plantas finais. Assim, cabe ao projetista conhecer cada etapa minuciosamente para chegar a um produto final de qualidade, econômico, com capacidade resistente da estrutura e bom desempenho em serviço.

Neste trabalho foi estudado lajes, que são elementos de superfícies planas e bidimensionais, onde duas dimensões (comprimento e largura) são da mesma ordem de grandeza e muito maiores que a terceira dimensão, a espessura. As lajes podem ser executadas em concreto armado, onde predominam esforços de cisalhamento e de flexão.

Desenvolveu-se um estudo comparativo entre diferentes modelos estruturais, adotando uma mesma concepção estrutural para assim ressaltar os esforços finais obtendo resultados técnicos e qualitativos. Foram apontados as divergências, assim como as vantagens e desvantagens de cada modelo, dentro da compreensão do comportamento da estrutura, e para isso foi desenvolvido no decorrer da pesquisa, com auxílio de equações e softwares, o dimensionamento e análise estrutural de uma determinada estrutura através de dois métodos de cálculos estruturais: Método de grelhas e método de charneiras plásticas. O software utilizado é o Programa Grelha (Cass (2015)), que promete bons resultados e também dimensionar qualquer geometria de laje em grelha, de qualquer tamanho. Sabendo que o software calcula somente em fase elástica.

Kimura (2007) diz que, em tese, o melhor modelo é o mais realista, ou seja, é aquele que melhor simula a estrutura real. Todavia, o autor faz algumas ressalvas a esta afirmação inicial, ressaltando que modelo estrutural perfeito não existe, pois todos possuem limitações; e de que nem sempre o modelo mais sofisticado e abrangente é o mais adequado para todas as situações.

A pesquisa é iniciada introduzindo conceitos sobre análise estrutural e como ela é feita, como ela prevê o comportamento das estruturas para obtenção de parâmetros de esforços, deformações e deslocamentos na estrutura. Em seguida, foram mostrados os dois métodos de cálculo estrutural que são usados seguidos de suas metodologias e, por fim, apresentados os resultados obtidos, juntamente com as considerações finais decorrentes do assunto.

JUSTIFICATIVA

Essa pesquisa se justifica pela importância de se ter conhecimento do comportamento de uma estrutura e de conhecer a diferença entre os esforços proporcionados por cada modelo na elaboração de um projeto estrutural seguro e econômico. Para tanto, realizou-se a análise estrutural, que consiste na determinação dos esforços internos e externos, assim como dos deslocamentos e deformações na estrutura, a partir das ações que a mesma é submetida.

Neste trabalho descrevemos dois modelos para análise estrutural de pavimentos com foco em lajes, que são o Modelo de Grelhas e Modelo das Charneiras Plásticas, os quais ainda são muito usados até hoje, no entanto, por serem modelos distintos, conduzem a resultados diferentes, mas eficazes.

Logo, a pesquisa poderá auxiliar os projetistas a decidirem qual sistema de lajes e modelo estrutural é o ideal para cada estrutura.

OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo estudar e analisar dois diferentes modelos estruturais - o Modelo de Grelhas e o Modelo de Charneiras Plásticas - para assim fazer um comparativo entre os resultados fornecidos por eles para reações dos esforços solicitantes e deslocamentos. Por fim, ressaltar os pontos positivos e negativos de cada modelo para a compreensão do comportamento das estruturas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Descrever os modelos estruturais de grelhas e charneiras plásticas;
- Fazer um estudo de caso para os diferentes modelos estudados;

- Análise dos resultados proporcionados por cada um dos modelos estudados; □
Comparação entre os pontos positivos e negativos de cada modelo estudado.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural tem como objetivo a determinação dos esforços e das deformações que ocorrem em uma estrutura devido às solicitações nela aplicada. Para tal, é necessário elaborar um modelo estrutural para idealizar a estrutura, devendo este modelo possuir propriedades materiais, detalhes, carregamentos e condições de contorno o mais próximo possível da realidade (Chen, 2003).

Conforme Martha (2007), a análise estrutural de uma construção e/ou de seus elementos corresponde à fase em que se idealiza o comportamento da estrutura. A idealização é realizada em diversos aspectos, tais como: tensões, deformações e deslocamentos na estrutura.

Então, como já foi mencionado, a análise estrutural é a etapa do projeto estrutural que prevê como a estrutura vai se comportar. Esta fase do projeto consiste em escolher um modelo estrutural ou modelo matemático que represente a estrutura que está sendo analisada. Este modelo deve descrever o comportamento da estrutura e o simular o mais próximo da realidade.

2.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTRUTURAS RETICULADAS

Para entender os métodos de análise estrutural, é preciso conhecer um pouco sobre modelos matemáticos adotados para estruturas reticuladas.

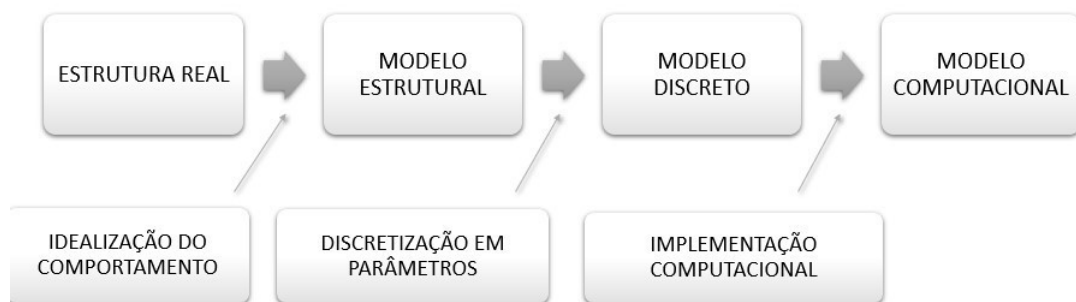
Modelo Discreto – é chamada desratização quando o comportamento discreto substitui o comportamento analítico do modelo estrutural, em que soluções analíticas contínuas são representadas pelos valores discretos dos parâmetros adotados que dependem do método utilizado. No método das forças, os parâmetros são forças ou momentos, e, no método dos deslocamentos, são deslocamentos ou rotações.

Modelo Computacional – é um modelo discreto só que automatizado, o que permite uma melhor avaliação. Como a tendência é que cada vez mais engenheiros recém-formados passem a utilizar programas computacionais com recursos e matrizes numéricas cada vez mais avançadas, por

meio da análise computacional extraem-se os momentos positivos e negativos máximos, flechas ou deslocamentos máximos, tempo de processamento e número de nós gerados para posteriormente efetuar a comparação percentual, gráfica e qualitativa entre os métodos, bem como comparação orçamentária proveniente do dimensionamento realizado em cada método. A análise de estruturas pode ser vista atualmente como uma simulação computacional do comportamento de estruturas.

A análise estrutural moderna, segundo Martha (2007), trabalha com quatro instâncias, sendo que o primeiro nível corresponde à estrutura física, o segundo nível corresponde ao modelo estrutural, ou seja, a estrutura real acrescida da idealização de seu comportamento, o terceiro nível corresponde ao modelo discreto inserido de diversos parâmetros ao modelo estrutural e o quarto nível representa o modelo computacional, isto é, o modelo discreto será convertido em modelo computacional através de sua implantação em software, conforme Figura 2.1:

Figura 2.1 - Quatro níveis de abstração referentes a uma estrutura na análise estrutural



Fonte: Martha (2007).

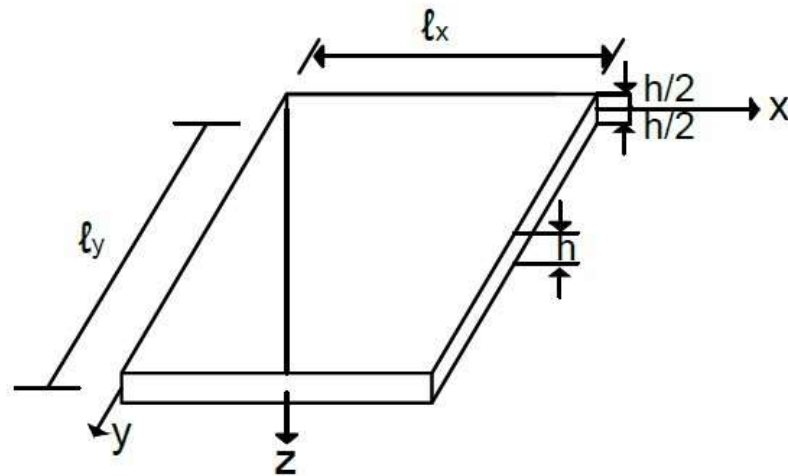
2.3 ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJE

Conforme Hambly (1976), um painel de laje é estruturalmente contínuo nas duas dimensões do plano da laje, de modo que as cargas aplicadas são equilibradas por uma distribuição bidimensional de esforços cortantes, momentos fletores e momentos de torção.

As lajes estruturais, sendo a maioria feitas de concreto armado, são elementos bidimensionais (possuem duas dimensões consideravelmente maiores do que a terceira) de planos horizontais que suportam as cargas verticais atuantes do pavimento e as distribui para vigas e pilares.

As cargas das lajes são constituídas pelo seu próprio peso, pela carga das alvenarias e dos revestimentos encontrados nela. A Figura 2.2 apresenta o esquema de uma laje.

Figura 2.2 - Representação de uma laje



Fonte: Fusco (2013)

Primeiro realiza-se o pré-dimensionamento das lajes, para garantir uma espessura suficiente para suportar as cargas atuantes, para então se fazer a definição dos carregamentos da mesma. Em seguida, se aplicam os métodos em estudo para obter os esforços nas lajes e a distribuição do carregamento calculado anteriormente para os elementos de apoio das lajes.

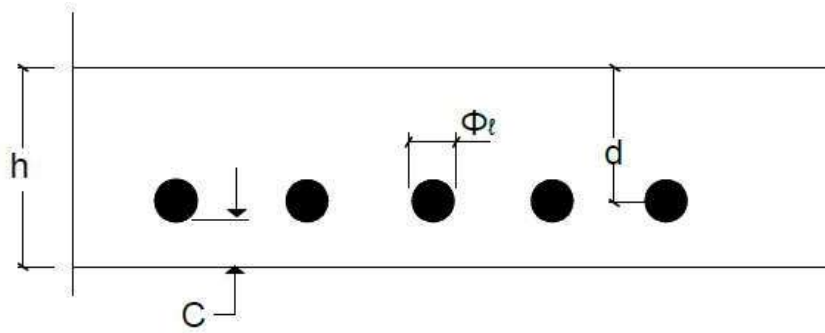
A NBR 6118 (2014) estabelece que a espessura mínima para as lajes maciças deve respeitar os seguintes limites:

- 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;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo;
- 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;

2.3.1 ESTIMATIVA DA ALTURA DA LAJE

De acordo com Bastos (2021), inicialmente necessita-se conhecer a altura (h) da laje para poder projetá-la. Um dos procedimentos para estimativa da altura da laje dependente da altura útil d , definida como a distância entre o centro de gravidade da armadura tracionada e a face comprimida da seção, conforme mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Altura útil d para armadura de flexão positiva em laje maciça



Fonte: Bastos (2021)

A altura d pode ser estimada por meio da Eq. 01, em que: d é a altura útil da laje em cm; n é o número de bordas engastadas da laje; ℓ^* é a dimensão da laje em metros. O valor de ℓ^* pode ser determinado por meio da Eq. 02, onde: ℓ_x é a menor dimensão da laje em metros; ℓ_y é a maior dimensão da laje em metros.

$$d \cong (2,5 - 0,1 n) \ell^* \quad \text{Eq. 01}$$

$$\ell^* \leq \frac{\ell_x}{0,7\ell_y} \quad \text{Eq. 02}$$

Com a altura útil d da Eq. 01 e supondo armadura em apenas uma camada, obtém-se a altura h através da Eq. 03, onde: d é altura útil da laje; h é altura final e ϕ é o diâmetro da barra longitudinal e c é cobrimento nominal da armadura;

$$h = d + \frac{\phi \ell}{2} + c \quad \text{Eq. 03}$$

Como altura final para a laje deve-se aproximar o valor dado pela Eq. 03 para o número inteiro mais próximo, obedecendo-se a altura mínima prescrita para as lajes. Nos cálculos de dimensionamento a altura útil d deve ser conhecida, de modo que deve ser recalculada em função da altura h escolhida:

$$d = h - c - \frac{\phi \ell}{2} \quad \text{Eq. 04}$$

Como não se conhece inicialmente o diâmetro ϕ_l da barra longitudinal, esse diâmetro deve ser estimado. No caso das lajes correntes o diâmetro varia comumente de 5 a 10 mm, para iniciar os cálculos pode-se estimar o diâmetro de 10 mm.

As espessuras das lajes podem ser inicialmente definidas pela NBR 6118 (2014), embora forneça espessuras geralmente maiores do que as necessárias. Estes valores podem ser modificados posteriormente, após a verificação das flechas admissíveis.

MÉTODO DE GRELHAS

A análise de grelhas equivalentes de lajes pode ser feita de forma computacional a partir dos dados iniciais referentes à laje e à malha que se deseja gerar.

A metodologia de grelhas simula uma estrutura considerada como laje por uma série de elementos de barras cujo conjunto forma uma grelha. Este procedimento é usado para a solucionar problemas de membranas elásticas.

Em seguida têm-se os esforços e deslocamentos das barras que representam a laje a ser analisada. Para analisar uma laje pelo método de Grelhas é preciso detalhá-la em uma série de faixas com determinada largura. Assim, substituindo as faixas por elementos estruturais de barras nos seus eixos obtém-se a grelha. Para determinar a relação entre força e deslocamento, utiliza-se o método das forças ou o método dos deslocamentos. No método dos deslocamentos, os deslocamentos são as incógnitas, é um método de análise de estruturas que usa a rigidez dos elementos para formar um sistema de equações que relaciona os deslocamentos com as cargas que atuam na estrutura.

A equação do método pode ser prevista pela Eq. 05, sendo: $\{F\}$ a matriz coluna (vetor) das cargas externas; $[K]$ a matriz de rigidez da estrutura e $\{d\}$ a matriz coluna dos deslocamentos.

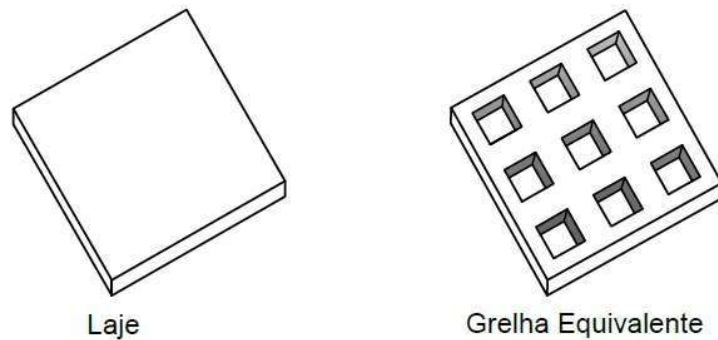
$$\{F\} = [K] * \{d\} \quad \text{Eq. 05}$$

O sistema de equações é resolvido calculando os deslocamentos. Os esforços nas barras da estrutura são obtidos com base nos deslocamentos e nas matrizes de rigidez de cada elemento.

Os carregamentos podem ser cargas distribuídas aplicadas nas barras, momentos aplicados diretamente nos nós ou nos vãos, e cargas concentradas aplicadas nos vãos ou nos nós da grelha.

Através da Figura 2.4 podemos observar a laje sendo substituída por uma malha equivalente de vigas (grelha equivalente).

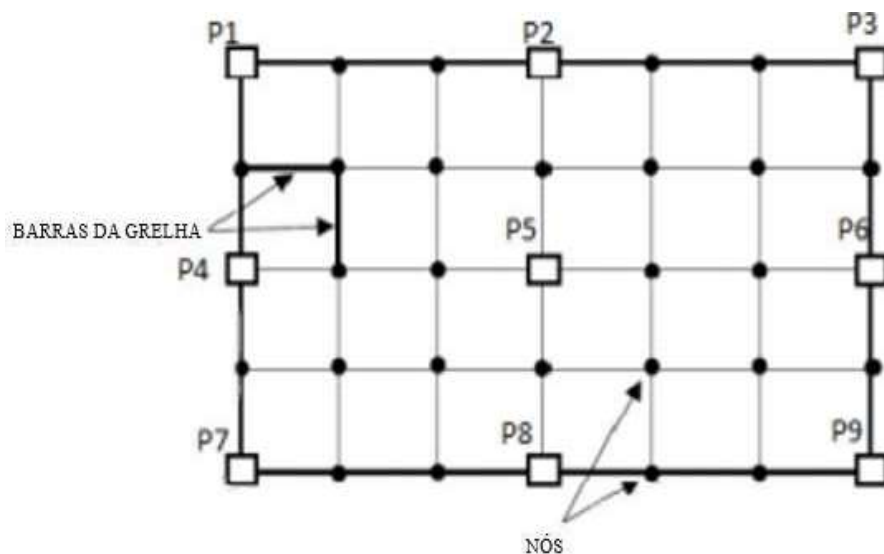
Figura 2.4 - Lajes e Grelha equivalente.



Fonte: Luis Filipe (2010).

Para a análise da grelha formada, é fundamental que sejam determinados os números de nós e barras. Não existe uma regra clara para o espaçamento entre as barras, normalmente, quanto menor o espaçamento, maior a probabilidade de o comportamento estrutural estar próximo o bastante da realidade. Os espaçamentos entre as barras são retratados na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Demonstrativo das barras e nós em uma laje.

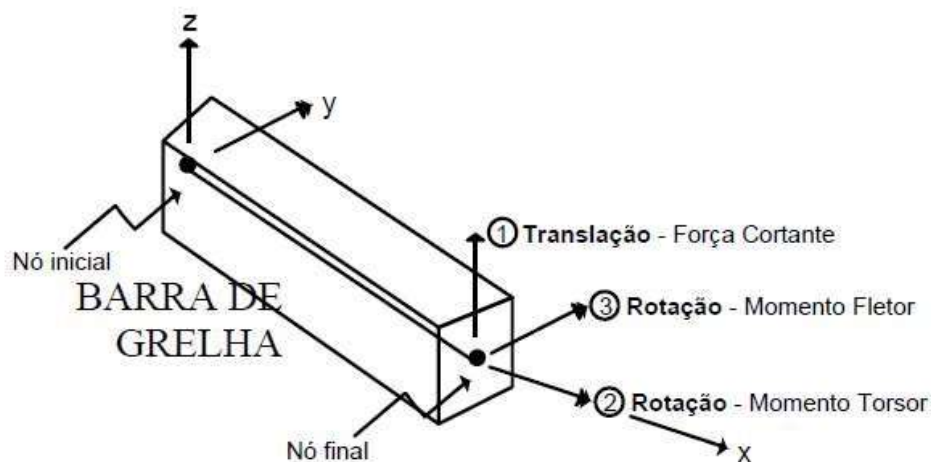


Fonte: Adaptado de Hennrichs (2003)

Conforme resultados de Alberto F. S. et. al. (2003), os valores usados para largura de malha que conduzem a bons resultados são de 2 a 3 vezes a espessura da laje, logo, esses valores serão adotados para desenvolver a pesquisa.

Os elementos de grelhas possuem 3 (três) graus de liberdade, uma translação (direção do eixo z) e duas rotações (em torno dos eixos x e y); que por sua vez, na aplicação de ações verticais, originam os seguintes esforços internos: esforço transversal, momento fletor e momento torçor como mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Graus de liberdade de um elemento de grelha.



Fonte: Luis Filipe (2010)

O processo de analogia de grelha vem sendo muito empregado em programas computacionais de análise de estruturas de concreto armado com grande aceitação no meio profissional. Este processo fornece ao projetista subsídio para a escolha do esquema estrutural mais adequado, permitindo a análise de um mesmo pavimento sob diferentes situações, possibilitando adaptações em um mesmo conjunto de dados.

MÉTODO DAS CHARNEIRAS PLÁSTICAS

Sobre a Teoria das Charneiras Plásticas, o primeiro trabalho publicado foi por Johansen em 1931, mas passa a ser baseado em ensaios apenas em 1941, passando ser conhecida por Teoria de Johansen e posteriormente por TEORIA DAS CHARNEIRAS PLÁSTICAS. A qual passou a repercutir mais a partir de 1950, com vários trabalhos publicados [Ex.: Masfield (1957); Wood (1961); Jones (1966) e Langendonck (1966)].

Existem dois modos para cálculo de charneiras, o primeiro imposto por Johansen (1932), conhecido por processo do equilíbrio ou das forças nodais, e o segundo conhecido como processo da energia.

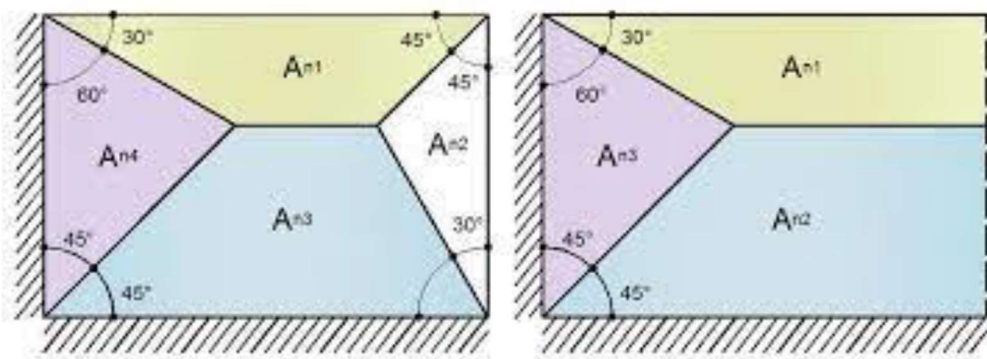
A maioria das estruturas é analisada com base no comportamento elástico, mas o cálculo elástico não apresenta uma determinação precisa da ruína, pois os materiais podem estar se comportando plasticamente, e a estrutura não apresenta mais comportamento linear. No entanto, o cálculo elástico descreve bem o comportamento da estrutura permitindo estudar problemas de fissuração e deformação, enquanto que o cálculo plástico permite a obtenção da carga última. Logo, um complementa o outro pois tem funcionalidades diferentes.

De acordo com a NBR 6118 (2014) cuidados especiais devem ser tomados em relação à fissuração e verificação das flechas no ELS, principalmente quando se adota a relação entre momentos muito diferente da que resulta de uma análise elástica. As verificações de serviço e de fadiga devem ser feitas baseadas em uma análise elástica.

A Teoria Das Charneiras Plásticas se descreve na aplicação do teorema do limite superior do cálculo plástico e resulta num valor de carga superior ou igual à carga de ruína.

Segundo NBR 6118 (2014), quando a análise plástica não for efetuada, as charneiras podem ser aproximadas por retas inclinadas a partir dos vértices, como mostrado na Figura 2.7, onde cada viga de apoio da laje receberá a carga que estiver nos triângulos ou trapézios a ela relacionada.

Figura 2.7 – Processo de áreas



Fonte: Borja (2016)

Com os seguintes ângulos:

- 45° entre dois apoios do mesmo tipo;
- 60° a partir do apoio considerado engastado, se o outro for considerado simplesmente apoiado;
- 90° a partir do apoio, quando a borda vizinha for livre.

2.3.1 Fundamentações da Teoria das Charneiras Plásticas

De acordo com Gonzalez R. L. M. (1997) a configuração de ruína é associada ao maior valor do momento de plastificação e a laje deve ser dimensionada para este valor. É preciso que as armações das lajes sejam suficientes para que não ocorra ruptura do concreto por compressão antes do escoamento permitindo o mecanismo de colapso. Não pode ter ruína prematura por cisalhamento ou punção. A ruína da estrutura deve ocorrer com formação de um mecanismo de colapso.

O momento fletor é considerado constante e igual ao momento máximo que a laje pode resistir. Os momentos fletores e as flechas nas lajes maciças são determinadas conforme a laje é armada em uma ou em duas direções. As lajes armadas em uma direção são calculadas como vigas segundo a direção principal e as lajes armadas em duas direções podem ser aplicadas pela Teoria das Charneiras Plásticas.

Através de tabelas com valores extraídos de Bares (1972) e adaptados pelo autor Pinheiro L. M. (2007), baseadas na Teoria da Elasticidade, os momentos fletores são dados pela Eq. 06 e as reações de apoio são dadas pela Eq. 07, em que: μ é o coeficiente da tabela em função da relação entre os vãos e do tipo de apoio da laje; p é a carga distribuída na laje; M o momento fletor; ℓ_x o menor vão da laje e v é um coeficiente da tabela que auxilia no cálculo de reações de apoio.

$$m = \mu * \frac{p * \ell_x}{100} \quad \text{Eq. 06}$$

$$v = v * p * \frac{\ell_x}{10} \quad \text{Eq. 07}$$

Neste processo é feita uma divisão de laje por uma grelha de vigas e aplicado coeficientes que garantem as lajes um conjunto de toda a malha de vigas. Suas tabelas permitem facilidade no cálculo dos momentos positivos e negativos.

O engenheiro deve tentar utilizar uma espessura única em todo o pavimento para facilitar a execução, ou então adotar uma espessura diferente em determinados trechos do painel.

A determinação dos deslocamentos de lajes pode ser justificada considerando-se a Eq. 08, retirada das tabelas de Pinheiro L. M. (2007) com os seguintes parâmetros: α valor tabelado em função das vinculações das lajes; p a carga da seção; lx o menor vão da laje; E_c o módulo de elasticidade e I o momento de inércia.

$$\alpha_i = \frac{\alpha}{12} + \frac{p \ell x}{E_c I} \quad \text{Eq. 08}$$

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apontados os métodos utilizados para elaboração da pesquisa e todo o roteiro feito para o desenvolvimento da mesma.

Trata-se de uma pesquisa exploratória e descritiva pois se trata de uma pesquisa bibliográfica e estudo de caso onde se destaca análise de dados dos esforços e deslocamentos na estrutura.

Inicialmente será proposta uma estrutura para ser usada como estudo de caso, onde a estrutura foi partida de um projeto arquitetônico, assim, feito a concepção estrutural tendo como base os valores de vãos já comuns, os métodos de pré-dimensionamento já conhecidos, para ser uma estrutura que busca representar o comportamento de uma estrutura convencional

Na sequência, a estrutura é modelada por cálculos feitos à mão e também através do uso de softwares, assim, aplicados os métodos de análise estrutural: Métodos das Grelhas e Métodos das Charneiras Plásticas.

Para o Método das Charneiras Plásticas realizou-se cálculos manuais, já para o Método de Grelhas opta-se pela utilização de softwares pela praticidade, agilidade e mais qualificação dos resultados, podendo calcular com maior número de nós sem dificuldade.

O software escolhido inicialmente para a resolução do estudo do caso é o software Programa Grelha, para análise de lajes em concreto armado usando o modelo de grelha equivalente. O mesmo foi desenvolvido pelo Mt. Andrew John Richter juntamente com professor Roberto Chust Carvalho.

Em seguida, feito uma análise crítica dos resultados e dos esforços, comparando os resultados de um modelo com o outro e os diferentes pontos da laje.

Por fim, decorrido e analisado a comparação entre os dois modelos buscando as diferenças dos modelos e apesar da dificuldade, encontrar qual o modelo mais adequado, apontando as vantagens e desvantagens de cada um.

CAPÍTULO 4 MODELAGEM ESTRUTURAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para o desenvolvimento do trabalho foi selecionada uma planta de formas estruturais que possui três lajes, sendo uma com vãos de 5,7 m x 3,775 m e duas com vãos de 3,775 m x 2,775 m. Essa laje foi selecionada por possuir valores de vãos comuns em projetos de edificações.

4.2 PARÂMETROS DE CÁLCULO

Para parâmetros de projeto, foram admitidos alguns dados necessários para realização dos cálculos de análise estrutural. A espessura escolhida da laje foi determinada fazendo o prédimensionamento através das Equações 1, 2 e 3, assim obtendo o valor de $h=13\text{cm}$. A Tabela 4.1 mostra os resultados do pré-dimensionamento das lajes.

Tabela 4.1 – Espessura das lajes

Lajes	d (cm)	h (cm)	h adotado (cm)
01	9,42	12,42	13
02	6,31	9,31	13
03	6,31	9,31	13

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Foi considerado contrapiso com espessura de 2,0 cm e $\gamma = 18\text{kN/m}^3$, revestimento em porcelanato com espessura de 1,0 cm e $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ e forro com espessura de 2,0 cm e $\gamma = 21\text{kN/m}^3$, cujos pesos específicos (γ) são especificados pela NBR 6120:2019, como também o valor da carga accidental de $q = 2\text{ KN/m}^2$, válido pela norma para despensas, áreas de serviço e lavanderias. O cobrimento nominal da armadura é de 25 mm devido à classe de agressividade II; O concreto possui resistência característica de $Fck = 25\text{ MPa}$ considerando agregado graúdo granito.

O Módulo de Elasticidade foi calculado conforme a Eq. 09.

$$Ec = 5600 * Fck = 28000\text{ MPa}$$

Eq. 09

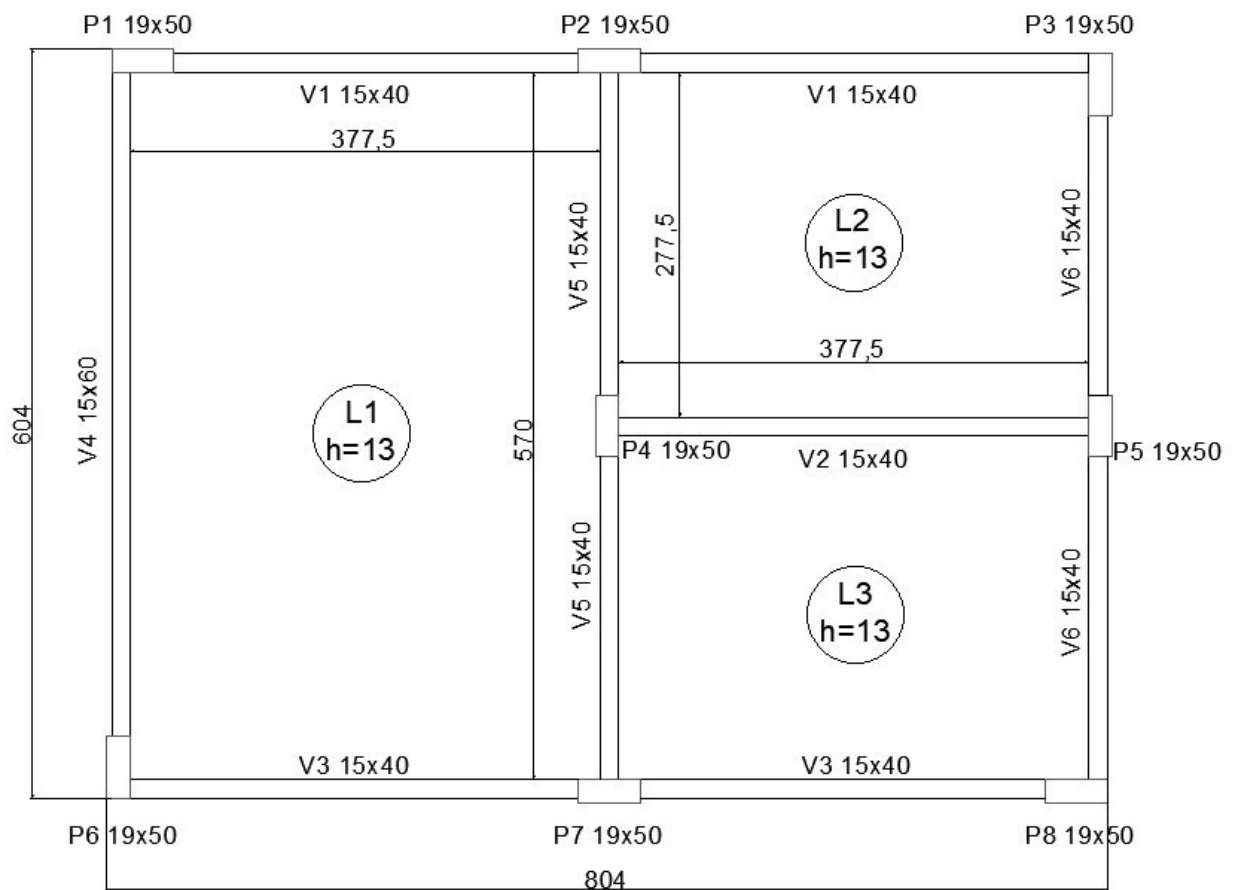
O Momento de Inércia a flexão foi calculado conforme a Eq. 10:

$$I = \frac{b * h}{12} = 0,0001830 \text{ m} \quad \text{Eq. 10}$$

4.3 PLANTA DE FORMAS ESTRUTURAIS

Foi feito o lançamento estrutural das lajes, vigas e pilares, juntamente com seus pré-dimensionamentos. Tendo presente no projeto lajes maciças simplesmente apoiadas e/ou engastadas com pilares adotados com dimensão padrão para todos eles de 19 x 50 cm² e vigas de 15 x 40 cm², com exceção da viga 1 que possui dimensões de 15 x 60 cm², por possuir vão consideravelmente maior.

Figura 4.1 - Lançamento estrutural no projeto arquitetônico



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

4.4 LANÇAMENTO DA ESTRUTURA NO PROGRAMA GRELHA

O programa adotado para o desenvolvimento do trabalho foi o Software Grelha que contém uma interface considerada simples para facilitar a aplicação e segue uma sequência de passos necessários para a criação de um projeto, conforme mostrado na Figura 4.2.

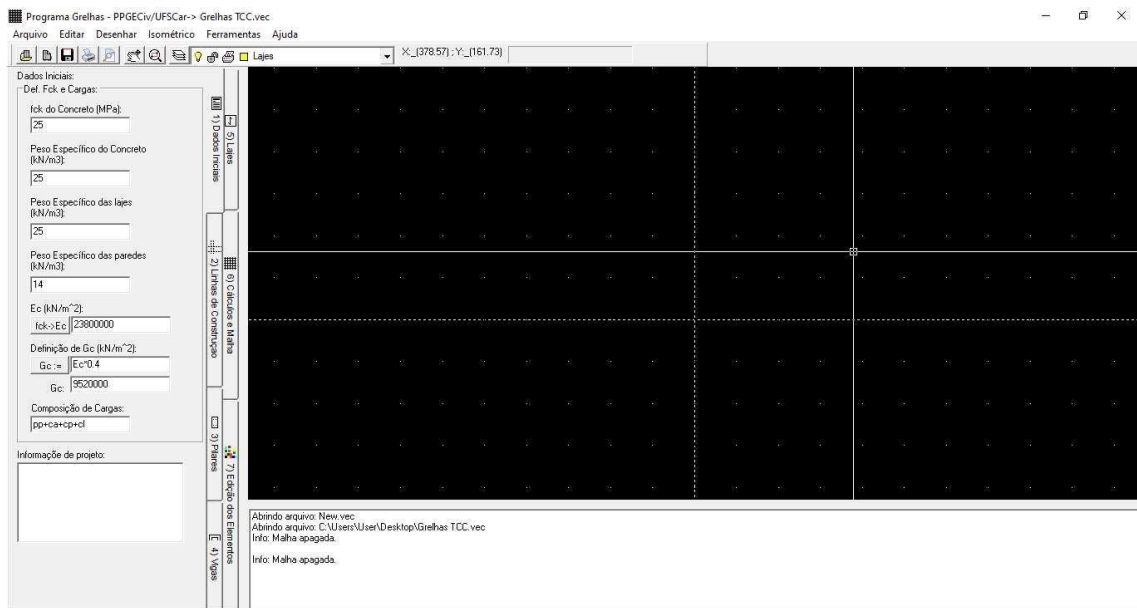
Abrindo o programa tem a tela inicial com quatro áreas principais:

1. Área de menus e botões: São compostos de utilitários básicos como abrir arquivos, salvar, zoom, pan e afins;
2. Área de navegação de projeto: A versão usada está dividida em sete abas que representam os sete passos para a realização do projeto, que são:
 - Dados iniciais de projeto;
 - Inserção das linhas de construção (eixos relevantes, onde são inseridos pilares e vigas);
 - Inserção dos pilares;
 - Inserção das vigas;
 - Inserção das lajes;
 - Aba de cálculo;
 - Edição de elementos estruturais.
3. Caixa de informações.
4. Área de desenho e representação gráfica.

Nos dados iniciais são inseridos o fck, o peso específico do concreto, lajes e parede. O módulo de elasticidade pode ser inserido manualmente ou ser calculado a partir do fck (Botão fck->Ec), o módulo de elasticidade transversal pode ser inserido manualmente ou calculado a partir do Ec (botão Ec->Gc). O quadro informações de projeto é espaço para qualquer anotação de projeto.

Para Dados Iniciais, foram usados Fck 25 Mpa do concreto, 25 KN/m³ de Peso Específico do Concreto, 14 KN/m³ e Peso Específico das paredes e assim, posteriormente calculado os módulos de elasticidade.

Figura 4.2 – Interface Grelha

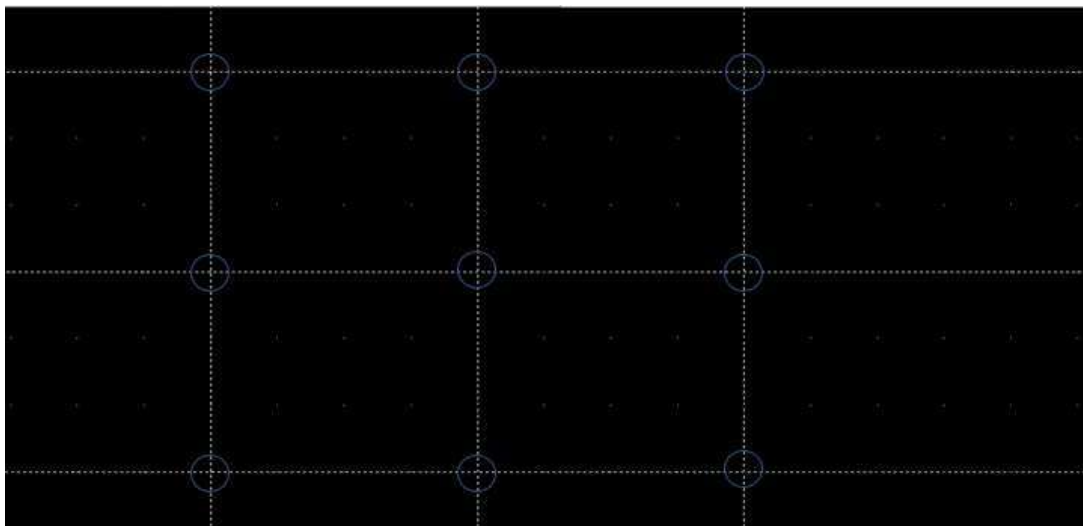


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Na aba de linhas de construção são inseridas as rays, as quais estão apresentadas na

Figura 4.3. Rays são linhas infinitas que permitem a inserção de elementos estruturais com precisão através dos eixos de cruzamento entre elas.

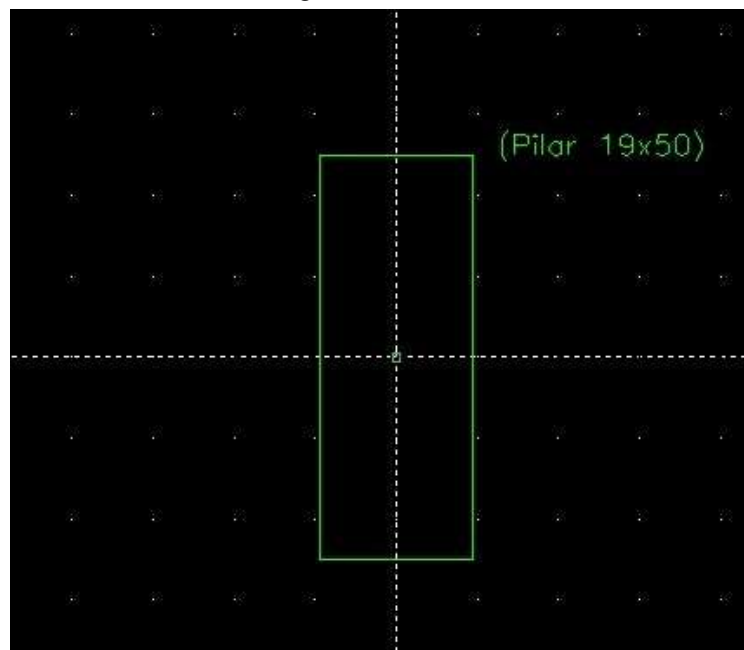
Figura 4.3 – Linhas Rays



Fonte – AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Em seguida, deve-se inserir as dimensões do pilar e apertar o botão criar. O pilar é inserido em um dos eixos das linhas de construção que clicar. A Figura 4.4 mostra um dos pilares criados durante o desenvolvimento do estudo.

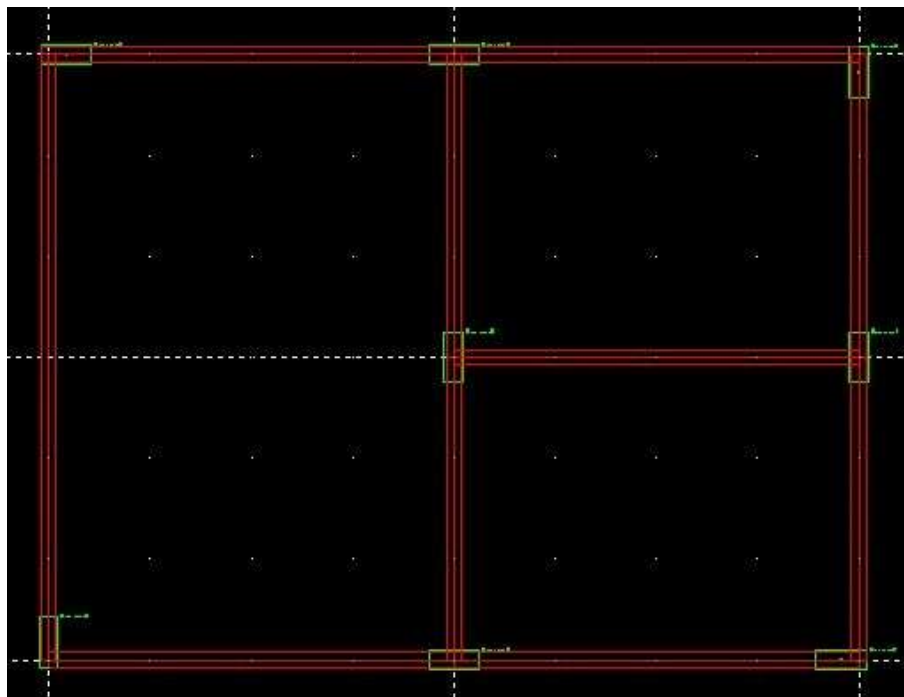
Figura 4.4 – Pilares



Fonte – AUTORIA PRÓPRIA (2022)

A Figura 4.5 mostra as vigas já inseridas no projeto. As vigas são inseridas no cruzamento das linhas de construção.

Figura 4.5 - Vigas

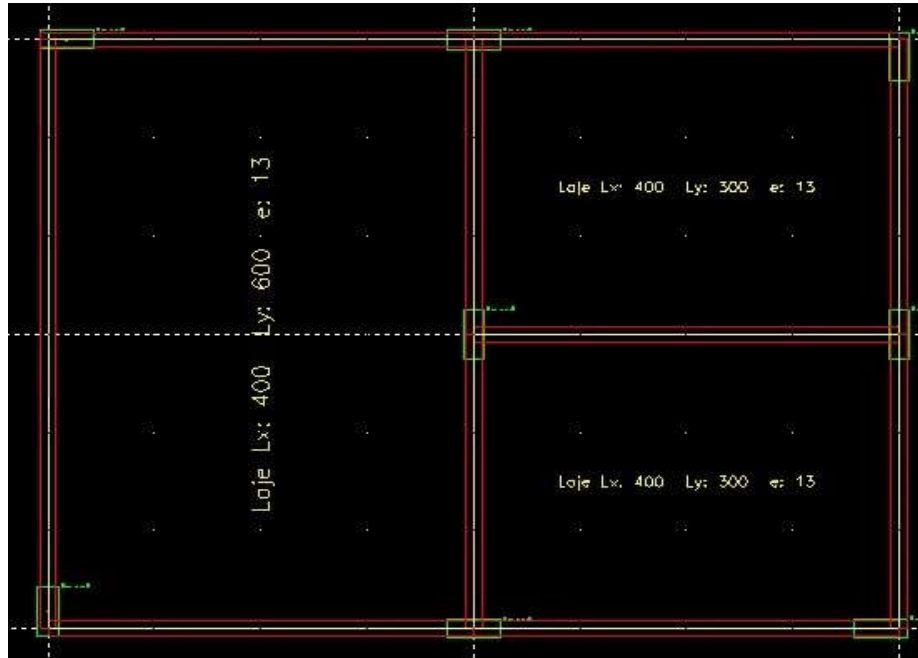


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Na estrutura escolhida foram inseridas três lajes, mostradas na Figura 4.6, com 13 cm de espessura, nos diferentes vãos produzidos pelas vigas/pilares, cada uma com uma carga acidental e permanente conforme indicadas. Mas também pode-se inserir uma única laje em

todo o perímetro das vigas/pilares. As lajes são inseridas entre um ponto superior esquerdo e outro inferior direito, esses pontos devem ser escolhidos de forma que a malha que será gerada posteriormente tenha barras que cruzem as vigas e os pilares.

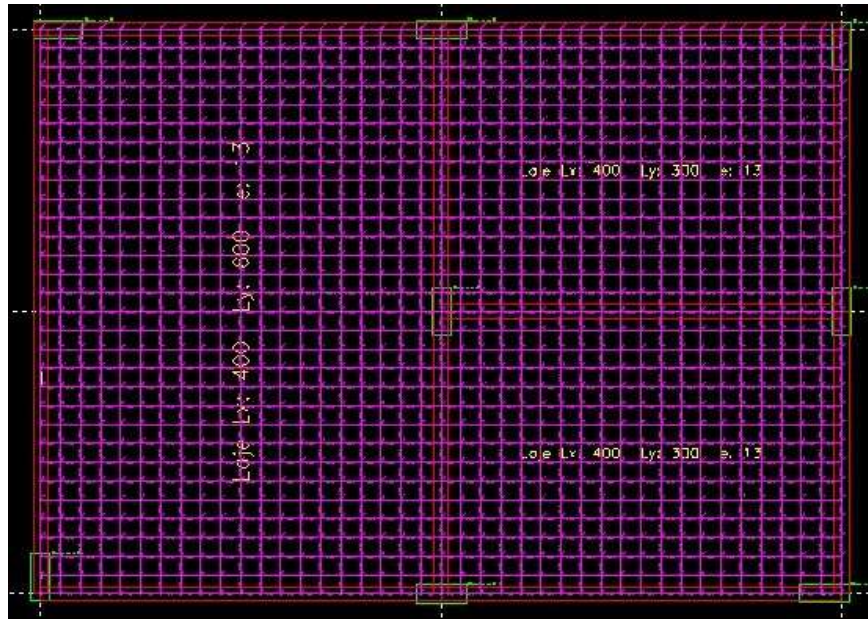
Figura 4.6 - Lajes



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Para critério de elaboração da malha foi usado um espaçamento de barras com valores de 2 a 3 vezes a espessura da laje, conforme recomendação de Alberto F. S. et. al. (2003), sendo determinado o espaçamento adequado que se adaptasse à grelha na área disponível de laje, com as barras da grelha coincidindo com as linhas dos eixos dos elementos vigas e pilares e também passando por pontos de interesse (meio do vão das lajes).

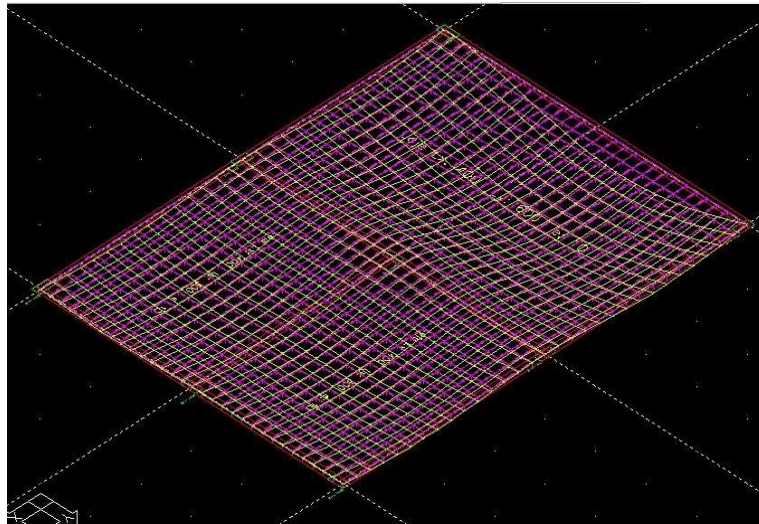
Figura 4.7 – Grelha Principal



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Para a visualização das deformações utiliza-se a perspectiva isométrica, ou colocando as deformações num gráfico 3D de plotagem renderizada. Para a perspectiva isométrica clica-se no Isométrico “Vista NE” e obtém-se a seguinte imagem na Figura 4.8:

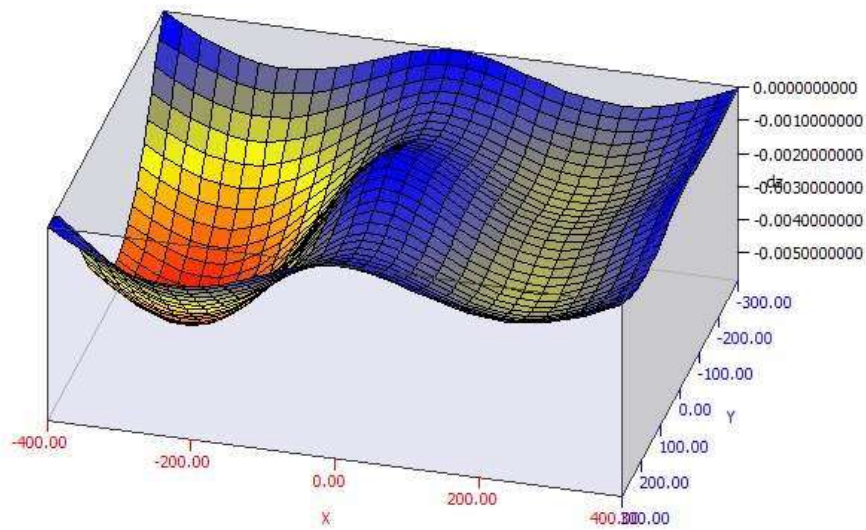
Figura 4.8 – Deformações Visíveis (Perspectiva Isométrica)



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

O botão render mostra o diagrama de deformações em 3D, com cores que indicam uma escala de intensidade de deformações. A representação abaixo na Figura 4.9 é um diagrama tridimensional das lajes 01, 02 e 03. Nota-se que os deslocamentos de maior intensidade estão presentes na laje 01 que possui vãos de 5,7 m x 3,775 m.

Figura 4.9 – Diagrama Tridimensional



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Após a grelha calculada obtém-se os diagramas de esforços dos eixos de barras da grelha através das ferramentas do grupo “Diagramas”, tem-se o botão digrama de momentos, cortantes, torsor e deformação.

4.5 CÁLCULO DE LAJES POR CHARNEIRAS PLÁSTICAS COM USO DE TABELAS COM VALORES EXTRAÍDOS DE BARES (1972) E ADAPTADOS PELO AUTOR PINHEIRO L. M. (2007)

Inicialmente foi calculado o vão efetivo das lajes através da Eq. 11 e apresentado a classificação de cada laje através da Eq. 12, quanto a direção da armação, que corresponde a seguinte condição:

- $\lambda \geq 2$ – laje armada em uma direção;
- $\lambda \leq 2$ – laje armada em duas direções;

$$l_{ef} = l_o + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \quad \text{Eq. 12}$$

Sabendo que:

l_o = dimensão da laje em metro;

t_1 e t_2 = largura da viga;

l_y = maior vão da laje;

l_x = menor vão da laje;

Os cálculos foram realizados usando os parâmetros citados e os resultados apresentados na Tabela 4.22 abaixo.

Tabela 4.2 – Classificação das lajes

LAJES	Lx (cm)	Ly (cm)	λ	CLASSIFICAÇÃO DAS LAJES
1	392,5	585	1,5	Armada em 2 direções
2	292,5	392,5	1,34	Armada em 2 direções
3	292,5	392,5	1,34	Armada em 2 direções
ESQUEMA ESTRUTURAL				
1	Engaste no lado maior e apoios simples nos demais			
2 e 3	Bordas adjacentes engastadas e as outras simplesmente apoiadas			

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

O Peso Próprio é calculado através da Eq. 13 a seguir.

$$g = h * \gamma \quad \text{Eq. 13}$$

Sendo:

h = espessura do material (m);

γ = peso específico do material (Kn/m³);

A Tabela 4.3 apresenta as camadas de materiais que foram consideradas nas lajes e um resumo das cargas de cada uma delas. Para contrapiso e o forro foi considerado argamassa de cimento e areia e, para o piso, placa cerâmica.

Tabela 4.3 - Peso Próprio dos Materiais

Material	h (m)	γ (Kn/m ³)	g (Kn/m ²)
Concreto Armado	0,13	25	3,25
Contrapiso	0,02	18	0,36

Piso	0,01	20	0,2
Forro de argamassa	0,02	21	0,42
Total de Peso Próprio			4,23

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Adotando carga accidental $q = 2,0 \text{ KN/m}^2$, conforme ABNT NBR 6120:2019 para despensas, lavanderias e salas de serviço, usa-se a Eq. 14 para calcular a Carga Total.

$$p = g_{total} + q \quad \text{Eq. 14}$$

Logo, a Carga Total calculada foi de $6,23 \text{ Kn/m}^2$.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

Os resultados da análise estrutural das lajes apresentadas foram obtidos através dos métodos de Grelhas e Charneiras Plásticas, desta forma analisamos os momentos fletores principais, que são os momentos fletores máximos e mínimos, e também os deslocamentos. Fazendo assim um comparativo entre os resultados dos dois métodos.

5.1 CÁLCULOS OBTIDOS POR CHARNEIRAS PLÁSTICAS

Os cálculos dos Momentos Fletores Atuantes foram feitos através da Eq. 06, citada no Capítulo 2, utilizando a Tabela de Bares e os valores dos resultados apresentados nas tabelas abaixo, onde: μx é o parâmetro tabelado adimensional para cálculo do momento máximo na direção x; $\mu'x$ é o parâmetro tabelado adimensional para cálculo do momento na direção x no engaste; μy é o parâmetro tabelado adimensional para cálculo do momento máximo na direção em y; $\mu'y$ é o parâmetro tabelado adimensional para cálculo do momento na direção y no engaste; Mx é o momento fletor máximo na direção x; Mx é o momento fletor na direção x no engaste; My é o momento fletor máximo na direção y; My é o momento fletor na direção y no engaste e ai representa os deslocamentos máximos de lajes.

Tabela 5.1 – Resultados: Charneiras Plásticas

Lajes	μx	$\mu'x$	μy	$\mu'y$	Mx (Kn.m)	Mx (Kn.m)	My (Kn.m)	My (Kn.m)	ai (m)
01 $\lambda = 1,34$	5,24	11,09	2,12	-	5,01	10,61	2,029	-	0,1054
02 e 03 $\lambda = 1,5$	4,24	9,65	2,45	7,88	2,25	5,12	1,30	4,18	0,0258

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

5.2 CÁLCULOS OBTIDOS POR GRELHAS

A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos por meio do modelo de grelhas, seguindo a mesma legenda da tabela anterior.

Tabela 5.2 – Resultados: Grelhas

Lajes	Mx (Kn.m)	Mx (Kn.m)	My (Kn.m)	My (Kn.m)	ai (m)
01 $\lambda = 1,34$	1,60	3,63	0,67	-	0,0029
02 $\lambda = 1,5$	0,58	0,33	0,93	1,61	0,16
03 $\lambda = 1,5$	0,65	0,31	0,77	1,8	0,15

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A Tabela 5.3 mostra a diferença relativa entre os resultados obtidos por meio de cada um dos modelos estudados nesse trabalho.

Tabela 5.3 – Diferença Relativa entre modelos

DIFERENÇA RELATIVA ENTRE OS MODELOS ESTRUTURAIS					
Lajes	M_x (%)	M_x (%)	M_y (%)	M_y (%)	ai (%)
01 $\lambda = 1,34$	68	65	66	-	97
02 $\lambda = 1,5$	74	93	28	61	83
03 $\lambda = 1,5$	71	93	40	56	82

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

A maior diferença está no M_x presente nas lajes 02 e 03, e a menor no M_y presente na laje 02. Já para os deslocamentos na laje 01, a diferença relativa foi de 97%, enquanto nas lajes 2 e 3 foi de 83% e 82%, respectivamente. Observa-se que os momentos fletores tiveram maior valor absoluto por meio do modelo de Charneiras Plásticas. Enquanto isso, para os deslocamentos, o modelo de Grelhas resultou em um valor de deslocamentos consideravelmente maior nas lajes 02 e 03, de forma contrária ao que era esperado, já que essas lajes possuem menores vãos se comparadas à laje 01. Por outro lado, o modelo de Charneiras Plásticas resultou em um maior valor de deslocamentos na laje 01, como esperado.

As lajes foram calculadas para suportar todo carregamento atuante sobre elas e resistir aos esforços provocados por esse carregamento. Logo, a partir dos resultados, a fim de comparar as informações obtidas por meio das Charneiras Plásticas, foi tomado para estudo a aplicação do cálculo no software de grelhas.

O software Grelha é um programa de fácil utilização e graficamente atrativo, que dispõe de uma clara visualização de resultados. Foi escolhido para ser utilizado como fonte de pesquisa nesse trabalho por ser fruto de um trabalho de mestrado de Cass (2015), feito especificamente para as estruturas de concreto armado e que possui características de “Software Livre”, ou seja, o programa possui um caráter livre que permite que diferentes usuários programadores possam contribuir para a implementação de melhorias no mesmo.

No entanto, durante a aplicação da planta no software notou-se grande divergência com os resultados dos cálculos obtidos por Charneiras Plásticas. Por isso, apesar do método de grelhas

ser mais utilizado e apresentar-se mais próximo da realidade, pode ser que o software escolhido não esteja calculando a grelha da forma com que ela é mostrada na interface, apesar de a criação de todo o modelo no software ser fácil e intuitiva.

Inicialmente tinha-se a pretensão de dimensionar no software uma estrutura mais elaborada e real, embasada em um projeto arquitetônico real, devido o software apresentar limitações na geração da grelha, por permitir utilizar apenas um valor para espaçamento em todo o pavimento e por não desenvolver uma estrutura de qualquer geometria como ele prometia, foi utilizada para estudo uma planta de fácil leitura, com duas lajes de dimensões iguais e outra com vãos maiores. Esperava-se que a laje 01, que possui maiores dimensões e maiores valores de momento, apresentasse um deslocamento maior do que as outras, no entanto, no modelo de Grelhas aconteceu o contrário do que é esperado, onde o deslocamento foi consideravelmente menor que o das demais.

Além disso, as lajes 02 e 03, que possuem mesmas dimensões e carregamentos, deveriam apresentar valores próximos ou iguais nos resultados, como aconteceu no método de Charneiras Plásticas, porém, o modelo de Grelhas mostrou grande diferença nos resultados de M_y para essas lajes.

Devido aos fatores citados, conclui-se que a análise estrutural feita por meio da utilização do Programa de Grelhas não conduziu resultados de forma satisfatória o pavimento modelado. Pode-se atribuir algumas hipóteses que levaram a esse fato:

- Problema relacionado ao refinamento da malha, já que não foi feito teste de convergência dos resultados com diferentes espaçamentos de malha. No entanto, como foi citado anteriormente, seguiu-se as recomendações de Alberto F. S. et. al. (2003) para a definição do espaçamento da malha, usualmente consideradas satisfatórias.
- Diferença entre a grelha calculada pelo programa e a grelha mostrada na interface gráfica: A grande vantagem da utilização do programa escolhido é facilidade da modelagem da grelha, orientada pela interface gráfica clara e intuitiva e pelo manual do usuário. No entanto, devido à inconsistência nos resultados obtidos, a hipótese principal é de que a grelha mostrada na interface seja diferente da grelha que foi calculada pelo programa.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO

Conclui-se que, a partir do desenvolvimento deste trabalho, os objetivos estabelecidos inicialmente foram cumpridos, foram estudados e analisados os dois modelos propostos e foi feito um comparativo entre os resultados, que colaborou para a compreensão do comportamento das estruturas.

As formulações utilizadas para a resolução de estruturas pelo Método de Charneiras foram apresentadas em detalhe e resolvidas sequencialmente conforme os dados da planta de formas estruturais. Com isso, é possível compreender as etapas envolvidas no processo e a implementação computacional aplicada em Grelhas.

Esperava-se que os resultados dos dois modelos fossem mais próximos, no entanto, verificou-se que o software não se mostrou bastante eficaz em fornecer os dados finais de momentos e deslocamentos da estrutura em grelha. Então, conclui-se, a partir deste, que o método de Charneiras Plásticas ofereceu um resultado mais satisfatório que o obtido por meio do software de cálculo de Grelhas usados no trabalho.

Para estratégia de estudo futuros recomenda-se procurar desvendar o que está fazendo o software entregar resultados inesperados se ele se mostrou eficiente durante todo o desenvolvimento da simulação. Sugere-se também como meio de tentativas o manuseio de uma malha mais refinada para obtenção de resultados diferentes.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BASTOS, P. S. – Lajes De Concreto Armado. Bauru, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Departamento de Engenharia Civil, 2021.
- BORJA, Edilberto Vitorino – Tecnologia Em Construção De Edifícios - Construções em Concreto Armado – Lajes – Parte 2. Rio Grande Do Norte: Apostila IFG, 2016. p. 5.
- CASS, Andrew John Richter. Programa gráfico livre para a análise de lajes de edificações de concreto armado usando o modelo de grelha equivalente. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- CHEN, W. F. The Civil Engineering Handbook. 2. ed. New York: CRC Press, 2003. cap. 47, p. 1559-1735.
- COELHO, J. A. Modelagem de Lajes de Concreto Armado por Analogia de Grelhas – Conceitos Iniciais. AltoQi. 2013. Disponível em:
<http://faq.altoqi.com.br/content/245/600/pt-br/modelagem-de-concreto-armado-por-analogia-de-grelha_-conceitos-iniciais.html?highlight=cr>. Acesso em: 21 jul 2021.
- FUSCO, P. B. Técnica de Armar as Estruturas de Concreto. São Paulo, Ed. PINI Ltda., 1995.
- FUSCO Péricles B., Martins A.R., Ishitani H., “Construções de Concreto”, 1990, apostila USP
- JOHANSEN, K. W. Bruchmoment der Kreuzweise bewehrten Platten. Mémoires, Association Internationale des Ponts et Charpents: p. 277/296, 1932.
- KIMURA, Alio. Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais. 1 o Ed. São Paulo: Editora PINI LTDA, 2007.
- LANGENDONCK, T. Charneiras plásticas em lajes de edifícios. São Paulo, ABCP, 1966. 81p.
- MARTHA, Luiz Fernando. Métodos Básicos da Análise de Estruturas. Rio de Janeiro: PUC - Rio, 2007. 312 p.
- PINHEIRO, L. M. Concreto armado: tabelas e ábacos. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, 1994.
- PINHEIRO, L. M. Tabelas de Lajes. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, agosto de 2007.
- WOOD, R. H. Plastic and elastic desing of slabs and plates. London, Thames & Hudson, 1961.
- Gonzalez R. L. M. Analise de Lajes pela teoria das Charneiras Plásticas e comparação de custos entre lajes maciças e lajes treliçadas, São Carlos, 1997.