

THIAGO HENRIQUE SILVA CASTANHA

ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE MOMENTOS FLETORES EM LAJES DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia/Engenharia Civil/Estruturas/Estruturas de Concreto Armado.

Orientador: Prof. M.Sc. Douglas Mateus de Lima.

Caruaru, 2015.

Catálogo na fonte:
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-1242

C346e Castanha, Thiago Henrique Silva.
 Estudo comparativo de métodos de cálculo de momentos fletores em lajes de
 concreto armado. / Thiago Henrique Silva Castanha. - 2015.
 83f. il. ; 30 cm.

 Orientador: Douglas Mateus de Lima
 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de
 Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2015.
 Inclui referências bibliográficas

 1. Lajes de concreto. 2. Construção civil. 3. Engenharia de estruturas. I. Lima,
 Douglas Mateus de (Orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.)
UFPE (CAA 2015-316)

THIAGO HENRIQUE SILVA CASTANHA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJES DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO COMPARATIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia/Engenharia Civil/Estruturas/Estruturas de Concreto Armado.

Orientador: Prof. M.Sc. Douglas Mateus de Lima.

A banca examinadora composta pelos professores abaixo, considera o candidato THIAGO HENRIQUE SILVA CASTANHA APROVADO COM NOTA_____.

Caruaru, 16 de Dezembro de 2015.

Prof. M.Sc. Douglas Mateus de Lima _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Humberto Correia Lima Junior _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. M. Sc. Roberto Evaristo de Oliveira Neto _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. (a) Sylvana Melo dos Santos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenadora da disciplina)

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe e à meu pai, Maria Gerlande e Nelson Castanha, por todo o suporte e dedicação para comigo ao longo de todos esses anos. Sem eles, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida, por todas as oportunidades que me foram concedidas e por ter dado a chance de concluir mais uma etapa da minha vida.

À toda minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio total e irrestrito em todas as fases da minha vida, pelos ensinamentos e pela educação que me concederam na formação do meu caráter.

Ao meu Orientador Prof. M.Sc. Douglas Mateus de Lima, pela confiança, paciência, disponibilidade de tempo e orientação deste trabalho, mas também pelos conhecimentos a mim transmitidos ao longo deste curso.

À todos os professores que contribuíram de forma direta e indireta na minha formação profissional, em especial a Humberto Lima, Michele Lima, Anderson Paiva, Washington de Lima, Eduardo de Azevedo e Leidjane de Oliveira, pela amizade, conselhos e conhecimentos transmitidos nas disciplinas.

À minha amiga e namorada Layse Oliveira, que sempre esteve ao meu lado, sendo compreensiva e incentivadora em todos os momentos.

Aos engenheiros civis Livonaldo Antônio e Ricardo César, pela amizade, pelos conselhos e pelos valiosos e inestimáveis ensinamentos da prática de engenharia.

À todos os meus irmãos e amigos, em especial, Viktor Castanha, Felype Castanha, Arthur Arruda, Luccas Manoel, Fernando César, Marcelo Leite, Breno Beltrão, Clebeson Gustavo, Wesley Lima e Vitor Couto pelo convívio, pela amizade e cumplicidade nas dificuldades e alegrias dessa jornada.

À Universidade Federal de Pernambuco, em especial ao Centro Acadêmico do Agreste, por ter me concedido a oportunidade de cursar e concluir a graduação de bacharelado em engenharia civil.

*"Insanidade é continuar fazendo
sempre a mesma coisa e esperar
resultados diferentes".*

(Albert Einstein)

RESUMO

Diante do atual cenário de desenvolvimento da construção civil e do aumento da concorrência entre as empresas deste setor, faz-se necessário oferecer alternativas estruturais e construtivas que permitam flexibilidade, eficiência, eficácia e redução de custos. O grande desenvolvimento das tecnologias na área de informática nas últimas décadas vem propiciando cada vez mais condições para análises estruturais de alta complexidade, que estão materializadas em softwares comerciais de cálculo estrutural, os quais tornam o dimensionamento das estruturas mais produtivo e estão cada vez mais importantes na rotina do engenheiro estrutural. Este trabalho apresenta um estudo técnico comparativo entre os métodos de dimensionamento de lajes de concreto armado. Dentre eles foram aqui escolhidos quatro destes métodos, sendo eles, o Método de Marcus, de Czerny, de Bares e pela analogia de grelha, na qual foi utilizado o software Eberick V8 Gold, para que os valores dos momentos, taxas de armaduras e flechas fossem obtidos. As simulações foram efetuadas utilizando modelos gerados em computador no software Microsoft Excel 2010 e o Eberick versão V8 Gold, fundamentado na NBR 6118 de 2014 da Associação Brasileira de Normas Técnicas. O objetivo do trabalho foi de comparar, analisar e verificar se a diferença entre os métodos é realmente significativa. Para isso, foi definido um projeto definido de um pavimento de concreto armado com cinco lajes retangulares. De forma geral, os métodos tabelados apresentaram-se muito semelhantes quanto à seus resultados porém, aplicado nas lajes maciças, o método de Czerny apresentou-se como o método mais desfavorável do ponto de vista da segurança assim como o método de Marcus apresentou-se como o método mais desfavorável do ponto de vista da segurança aplicado em lajes nervuradas tipo treliça.

Palavras-chave: Concreto Armado. Laje Maciça. Laje Nervurada. Estudo Comparativo.

ABSTRACT

In the present scenario of development of civil construction and increased competition between companies in this sector, it is necessary to provide alternatives structural and constructive that allows flexibility, efficiency, effectiveness and cost reduction. The great development of technologies in computer science in recent decades has increasingly providing conditions for structural analysis of high complexity, which are materialized in commercials' software for structural design, which makes the design's structures more productive and increasingly important in structural engineer's routine. This work presents a comparative study of technical methods for design of reinforced concrete slabs. Among them were here chosen four of these methods, namely, the Marcus method, Czerny method, Bares method and the grid analogy, in what was the Eberick V8 Gold software used, so that the values of moments, steel rates and displacements They were obtained. The simulations were performed using computer generated models in Microsoft Excel 2010 software and Eberick version V8 Gold, based on the NBR 6118, 2014 of the Brazilian Association of Technical Standards. The objective was to compare, analyze and verify that the difference between the methods is really significant. For this, it sets a definite design of a reinforced concrete floor with five rectangular slabs. Overall, the tabulated methods had to be very similar in their results though, applied in solid slabs, the Czerny method presented himself as the worst method of security point of view as well as the Marcus method introduced himself as the most favorable method from a security point of view applied in ribbed type truss slabs.

Key words: Reinforced Concrete. Massive Slabs. Ribbed Slabs. Comparative Study.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Laje Funcionando Como Placa E Como Chapa.....	19
Figura 2. Laje Maciça	20
Figura 3. Laje Nervurada.....	21
Figura 4. Laje Cogumelo.....	21
Figura 5. Laje Lisa.....	21
Figura 6. Laje Armada Em Uma Direção.....	22
Figura 7. Laje Armada Em Duas Direções	23
Figura 8. Esquema De Laje Maciça	24
Figura 9. Esquema De Laje Nervurada Pré-Moldada Com material Inerte.....	27
Figura 10. Tipos De Lajes Dos Vínculos Nas Bordas.....	28
Figura 11. Componentes De Tensão No Elemento De Placa (a) E Placa Retangular lateralmente Carregada(b).	39
Figura 12. Planta Arquitetônica Do Pavimento.....	52
Figura 13. Nervura Da Laje Nervurada.....	53
Figura 14. Parâmetros Seção T.....	53
Figura 15. Janela Para Criação Dos Pavimentos No Eberick.....	55
Figura 16. Arquivos dwg/dfx Importados Do Sistema CAD Para O Eberick.....	55
Figura 17. Materiais E Durabilidade.....	56
Figura 18. Configurações Do Vento.....	56
Figura 19. Configurações De Lançamento De Pilares.....	57
Figura 20. Configurações De Lançamento De Vigas	57
Figura 21. Configuração De Lançamento De Lajes.....	58
Figura 22. Estrutura Em 3D Da Edificação Estudada Gerada Pelo Eberick.....	59
Figura 23. Janela Visível No Instante Do Processamento Da Estrutura.....	59
Figura 24. Vínculos Das Lajes Nas Vigas De Bordo.....	60
Figura 25. Atuação Dos Esforços Cortantes Nas Lajes.....	64
Figura 26. Reações De Apoio (kN/m) Das Lajes Maciças Nas Vigas De Bordo Por Bares.....	64
Figura 27. Atuação Dos Momentos Fletores Nas Lajes.....	67
Figura 28. Momentos Fletores Solicitantes Característicos Não Compatibilizados Em (kN.m/m)	67
Figura 29. Momentos Fletores Solicitantes Característicos Compatibilizados Em (kN.m/m)	68
Figura 30. Ocorrência Das Flechas Nas Lajes.....	72
Figura 31. Atuação Dos Esforços Cortantes.....	74
Figura 32. Reações De Apoio (kN/m) Das Lajes Maciças Nas Vigas De Borda Por Bares.....	74
Figura 33. Atuação Dos Momentos Fletores Nas Lajes.....	77
Figura 34. Momentos Fletores (kN.m/m) Solicitantes Característicos.....	77
Figura 35. Ocorrência Das Flechas Nas Lajes.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores mínimos De Cargas Verticais.....	32
Tabela 2. Limites Para Deslocamentos.....	35
Tabela 3. Correspondência Entre Classe De Agressividade Ambiental E Cobrimento Nominal Para $\Delta c=10\text{mm}$	38
Tabela 4. Valores Mínimos Para Armaduras Passivas Aderentes.....	43
Tabela 5. Taxas Mínimas $\rho_{\min}(\%)$ De Armadura De Flexão Para Seção Retangular.....	44
Tabela 6. Valores Do Coeficiente ξ Em Função Do Tempo.....	48
Tabela 7. Referências Das Nervuras.....	53
Tabela 8. Vãos Efetivos Das Lajes.....	61
Tabela 9. Pré-Dimensionamento Das Alturas Das Lajes.....	62
Tabela 10. Ações Atuantes Nas Lajes Em (Kn/m^2).....	63
Tabela 11. Reações De Apoio Nas Vigas De Borda Das Lajes Maciças Para O Método De Marcus Em (kN/m).....	63
Tabela 12. Reações De Apoio Nas Vigas De Borda Das Lajes Maciças Para O Método De Czerny Em (kN/m).....	63
Tabela 13. Reações De Apoio Nas Vigas De Borda Das Lajes Maciças Para O Método De Bares Em (kN/m).....	63
Tabela 14. Reações De Apoio Das Lajes Maciças Pelo Software Eberick Em (kN/m).....	63
Tabela 15. Verificação Dos Esforços Cortantes Para O Método De Marcus.....	64
Tabela 16. Verificação Dos Esforços Cortantes Para O Método De Czerny.....	65
Tabela 17. Verificação Dos Esforços Cortantes Para O Método De Bares.....	65
Tabela 18. Momentos Fletores Solicitantes Das Lajes Maciças Para O Método De Marcus Em (kN.m/m).....	65
Tabela 19. Momentos Fletores Solicitantes Das Lajes Maciças Para O Método De Czerny Em (kN.m/m).....	66
Tabela 20. Momentos Fletores Solicitantes Das Lajes Maciças Para O Método De Bares Em (kN.m/m).....	66
Tabela 21. Momentos Fletores Solicitantes Das Lajes Maciças Pelo Software Eberick (kN.m/m)	66
Tabela 22. Momentos fletores positivos pelos quatro métodos para lajes maciças.....	68
Tabela 23. Diferença entre os métodos para os Momentos fletores positivos para lajes maciças.....	69
Tabela 24. Momentos fletores negativos pelos quatro métodos para lajes maciças.....	69
Tabela 25. Diferença entre os métodos para os Momentos fletores negativos para lajes maciças.....	69
Tabela 26. Dimensionamento Das Armaduras Mínimas Positivas.....	70
Tabela 27. Dimensionamento Das Armaduras Mínimas Negativas.....	70
Tabela 28. Áreas de armaduras longitudinais de flexão em (cm^2/m).....	70
Tabela 29. Diferença entre os métodos para os consumos de aço devido aos Momentos positivos para lajes maciças.....	71

Tabela 30. Áreas De Armaduras Negativas (cm^2/m).....	71
Tabela 31. Diferença entre os métodos para os consumos de aço devido aos Momentos negativos para lajes maciças.....	71
Tabela 32. Flechas Totais E Admissíveis Por Marcus, Czerny, Bares E Eberick (mm).....	72
Tabela 33. Ações Atuantes Nas Lajes Nervuradas Em (kN/m^2).....	72
Tabela 34. Reações De Apoio Nas Vigas De Borda Das Lajes Nervuradas Para O Método De Marcus Em (kN/m).....	73
Tabela 35. Reações De Apoio Nas Vigas De Borda Das Lajes Nervuradas Para O Método De Czerny Em (kN/m).....	73
Tabela 36. Reações De Apoio Nas Vigas De Borda Das Lajes Nervuradas Para O Método De Bares Em (kN/m).....	73
Tabela 37. Reações De Apoio Nas Lajes Nervuradas Pelo Software Eberick M (kN/m).....	73
Tabela 38. Verificação Dos Esforços Cortantes Para O Método De Marcus.....	74
Tabela 39. Verificação Dos Esforços Cortantes Para O Método De Czerny	75
Tabela 40. Verificação Dos Esforços Cortantes Para O Método De Bares.....	75
Tabela 41. Momentos Fletores Solicitantes Característicos Das Lajes Nervuradas Para O Método De Marcus Em ($\text{kN.m}/\text{m}$).....	76
Tabela 42. Momentos Fletores Solicitantes Característicos Das Lajes Nervuradas Para O Método De Czerny Em ($\text{kN.m}/\text{m}$).....	76
Tabela 43. Momentos Fletores Solicitantes Característicos Das Lajes Nervuradas Para O Método De Bares Em ($\text{kN.m}/\text{m}$).....	76
Tabela 44. Momentos Fletores de Cálculo Das Lajes Nervuradas Pelo Software Eberick Em ($\text{kN.m}/\text{m}$).....	77
Tabela 45. Momentos fletores positivos pelos quatro métodos para lajes nervuradas.....	77
Tabela 46. Diferença entre os métodos para os Momentos fletores positivos para lajes nervuradas.....	78
Tabela 47. Áreas de armaduras longitudinais de flexão em (cm^2/m).....	78
Tabela 48. Diferença entre os métodos para os consumos de aço devido aos Momentos positivos para lajes nervuradas.....	79
Tabela 49. Flechas Totais E Admissíveis Por Marcus, Czerny, Bares E Eberick (mm).....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Normas Brasileiras

EPS - Poliestireno Expandido

ELU - Estado Limite Último

ELS - Estado Limite de Serviço

LISTA DE SÍMBOLOS

λ – Coeficiente De Esbeltes Da Laje;

l_x – Vão Efetivo de Menor Valor da Laje;

l_y – Vão Efetivo De Maior Lado Da Laje;

γ – Peso Específico;

g - Carga permanente;

q - Carga acidental;

p - Carga total;

γ_c – Coeficiente De Ponderação Da Resistência Do Concreto;

γ_s – Coeficiente De Ponderação Da Resistência Do Aço;

ϕ – Diâmetro Das Barras;

ξ – Coeficiente Em Função Do Tempo;

τ_{Rd} – Tensão De Cisalhamento De Calculo;

P – Taxa de Armadura;

f_{ck} – Resistência Característica À Compressão do concreto;

$f_{ct,m}$ – Resistencia Média À Tração Do Concreto;

$f_{y,k}$ – Resistencia de Escoamento característica.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	17
1.2 Motivação	18
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1.1 Tipos de Lajes de Concreto Armado	20
2.1.2 Lajes Maciças de Concreto Armado.....	23
2.1.2.1 Vantagens e Desvantagens das Lajes Maciças.....	24
2.1.3 Lajes Nervuradas Pré-Moldadas de Concreto Armado	25
2.1.3.1 Vantagens e Desvantagens das Lajes Nervuradas.....	25
2.1.3.2 Lajes Nervuradas Pré-Fabricadas	26
2.2 Considerações de Projeto de Lajes	27
2.2.1 Vinculação das Bordas.....	27
2.2.2 Ações a Considerar no Dimensionamento de Lajes	28
2.2.2.1 Ações Permanentes.....	28
2.2.2.1.1 Ações Permanentes em Lajes	29
2.2.2.2 Ações Variáveis.....	31
2.2.2.2.1 Ações Variáveis nas Lajes.....	31
2.2.2.3 Ações Excepcionais.....	32
2.2.3 Estados Limites para Projeto de Estruturas.....	32
2.2.4 Limites Mínimos.....	33
2.2.4.1 Limites Mínimos Para Lajes Maciças	33
2.2.4.2 Limites Mínimos Para Lajes Nervuradas	34
2.2.5 Deslocamentos Limites.....	35
2.2.6 Combinações de Ações	36
2.2.6.1 Combinações Últimas.....	36

2.2.6.2 Combinações de Serviço	38
2.2.7 Cobrimento Nominal.....	38
2.3 Sequência para Projeto de Lajes de Concreto Armado.....	39
2.4 Métodos de cálculo de dimensionamento de lajes	39
2.4.1 Dimensionamento pela Teoria de Marcus.....	40
2.4.2 Dimensionamento pelo Método de Czerny	41
2.4.3 Dimensionamento pelo Método de Bares	41
2.5 Cálculo Estrutural de Lajes Maciças por Métodos Tabelados	42
2.5.1 Vãos Efetivos.....	42
2.5.2 Estimativa da Altura Inicial das Lajes.....	42
2.5.3 Compatibilização dos Momentos Fletores	43
2.5.4 Dimensionamento das Armaduras Longitudinais de Flexão.....	43
2.5.5 Verificação do Esforço Cortante.....	45
2.5.6 Flechas.....	46
2.6 Cálculo Estrutural de Lajes Nervuradas por Métodos Tabelados	48
2.6.1 Determinação de Parâmetros Iniciais.....	49
2.6.2 Vãos Efetivos e Vinculação nas Bordas.....	49
2.6.3 Verificações	49
2.6.4 Ferramenta de cálculo e análise estrutural.....	50
3 METODOLOGIA DO TRABALHO	51
3.1 Considerações gerais	51
3.2 Tipologia e concepção dos sistemas estruturais adotados	51
3.3 Escolha do Pavimento Exemplo	51
3.4 Características do Projeto Estrutural	52
3.5 Lançamento e Cálculo Estrutural do Pavimento no Software EBERICK	54
3.6 Considerações para o Cálculo Estrutural de Lajes maciças	60
3.6.1 Vinculação nas Bordas.....	60
3.6.2 Pré-dimensionamento das Alturas das Lajes.....	60
3.6.3 Dimensionamento das Armaduras Longitudinais de Flexão.....	61

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 Resultados Obtidos para Lajes Maciças	62
4.1.1 Cálculo das Ações Atuantes.....	62
4.1.2 Reações de Apoio nas Vigas de Borda	62
4.1.3 Momentos Fletores	65
4.1.4 Dimensionamento das Armaduras Longitudinais.....	70
4.1.5 Flechas.....	71
4.2 Resultados Obtidos para Lajes Nervuradas	72
4.2.1 Cálculo das Ações Atuantes.....	72
4.2.2 Reações de Apoio nas Vigas de Borda	73
4.2.3 Momentos Fletores	75
4.2.4 Dimensionamento das Armaduras Longitudinais.....	78
4.2.5 Flechas.....	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS	82

ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJES DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO COMPARATIVO

1 INTRODUÇÃO

Com a atual concorrência no setor da construção civil torna-se inevitável reduzir custos que envolvem a construção de determinado empreendimento, dessa forma, as empresas do setor vêm investindo na aplicação de novas técnicas, minimizando o desperdício e, consequentemente, o custo total da obra. Aplicado às lajes, esse fator pode ser bastante significativo, pois dependendo do método aplicado ao dimensionamento dessa estrutura, poderá ocorrer redução na quantidade de material utilizado, o que diminui o custo da obra. Não só o lado econômico é beneficiado, mas também a rapidez proporcionada pelo método construtivo escolhido.

Uma laje ou placa é caracterizada por possuir duas dimensões, largura e comprimento, muito maiores que sua terceira dimensão, a altura, tendo como função descarregar os esforços solicitados para os apoios. Atualmente há diversos modelos estruturais empregando lajes de concreto armado: Lajes maciças, nervuradas (treliçadas ou lajes cogumelos), protendidas (alveolares) etc. e cada modelo, especificamente, apresenta suas vantagens e desvantagens.

É necessário buscar as maneiras mais econômicas e com qualidade para a obtenção de um melhor dimensionamento das lajes. Então, torna-se necessário o estudo comparativo sobre os métodos de cálculo estruturais aplicados aos tipos de lajes para se obter uma estimativa de qual método apresenta-se mais preciso.

1.1 Justificativa

O crescimento populacional vem provocando a verticalização das cidades, que é impulsionada por investimentos econômicos em infraestrutura, provocando um acelerado crescimento da economia e, consequentemente, um aumento na busca por moradias. Dessa forma, busca-se projetar edificações com uma quantidade maior de apartamentos, e então uma maior busca por profissionais especializados.

Com o surgimento de edifícios de grande porte na cidade de Caruaru, Estado de Pernambuco, de concreto armado, torna-se oportuno um estudo aprofundado da aplicação de lajes nos vários pavimentos, visando soluções economicamente viáveis.

1.2 Motivação

Conhecer os diversos tipos de sistemas estruturais para lajes de concreto armado é de extrema importância, pois um engenheiro civil deve estar capacitado a tomar decisões técnicas mais eficientes em determinado empreendimento durante sua vida profissional. E com o mercado cada vez mais competitivo, há um aumento na busca por projetos com menores custos, estimulando a busca por melhores soluções, visando: Segurança, Desempenho e Economia. E nesse trabalho, a melhoria é buscada através da comparação de resultados que comprovem qual modelo de cálculo estrutural de lajes de concreto armado é mais adequado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é permitir a análise comparativa do comportamento estrutural e seus custos aplicados em lajes maciças e nervuradas de concreto armado utilizando métodos aproximados.

1.3.2 Objetivos Específicos

Apresentar resultados que determinem os métodos mais precisos e econômicos para o cálculo de dimensionamento de lajes de concreto armado. Descrever e apontar as principais características, assim como as vantagens e desvantagens dos métodos de cálculo de dimensionamento de lajes de concreto armado.

Os métodos de cálculo estrutural de lajes de concreto armado estudados foram através de:

Método de Czerny;

Teoria de Marcus;

Análise Matricial (Software de Análise Estrutural).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

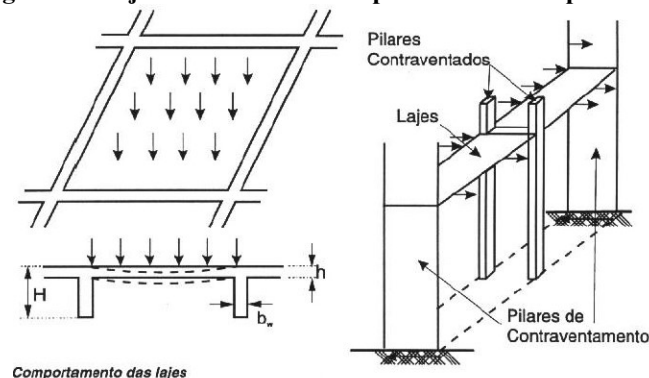
2.1 Lajes de Concreto Armado

“Placas são elementos de superfície plana sujeitos principalmente a ações normais ao seu plano. As placas de concreto são usualmente denominadas lajes [...]” ABNT NBR 6118, 2014, p.102).

As lajes são elementos estruturais em planos bidimensionais, onde duas dimensões, o comprimento e a largura, são da mesma ordem de grandeza e muito maiores que a terceira dimensão (espessura). As lajes são também conhecidas por placas ou elementos de superfície.

As lajes podem ser entendidas como elementos estruturais bidimensionais que têm a dupla função de resistir aos esforços normais que atuam perpendicularmente ao seu plano principal e aos esforços tangenciais que atuam paralelamente a este plano. Conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Laje funcionando como placa e como chapa.



Fonte: Fusco (1976).

A existência deste comportamento de chapa é essencial para a garantia do contraventamento da estrutura em edifícios altos, uma vez que as lajes são os principais responsáveis pela transmissão dos esforços horizontais, permitindo pilares contraventados se apoiarem nos pilares de contraventamento, garantindo a estabilidade global da estrutura. Se este comportamento de chapa for diminuído, a segurança da construção em relação a um possível colapso global ficará seriamente comprometida, pela impossibilidade de serem resistidos os esforços horizontais de contraventamento.

As lajes são dimensionadas para receber ações de pisos, paredes, móveis, pessoas etc. as quais são normalmente perpendiculares ao plano da laje e então transmitidas para as vigas de apoio nas bordas da laje.

2.1.1 Tipos de Lajes de Concreto Armado

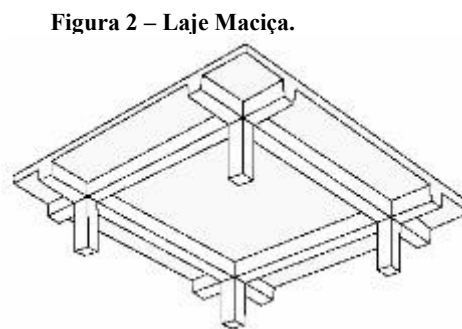
As lajes podem ser classificadas em dois grandes grupos quanto à fabricação: as lajes moldadas no local e as lajes pré-moldadas, que por sua vez podem. As lajes moldadas no local (*“in loco”*) recebem essa denominação por serem construídas em toda a sua totalidade na própria obra.

Já as lajes pré-moldadas recebem elementos pré-fabricados para a sua construção, normalmente produzidos fora do canteiro de obras, industrialmente. Porém, podem ser completamente construídas fora do canteiro ou parcialmente, tendo parte construída na própria obra.

Portanto, as lajes podem ser classificadas com base em fatores mais específicos, como sua natureza, tipo de apoio ou direção da armadura de flexão.

- **Quanto à Natureza:**

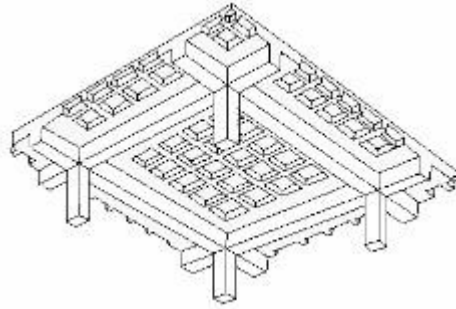
- ✓ Lajes Maciças: lajes de concreto armado ou protendido constituídas de uma placa maciça (Figura 2);



Fonte: Junior (2010).

- ✓ Lajes nervuradas: são as lajes em que a zona de tração é constituída de nervuras, onde são dispostas as armaduras, e de uma mesa comprimida. Entre as nervuras, pode-se ou não inserir um material inerte, sem função estrutural (Figura 3);

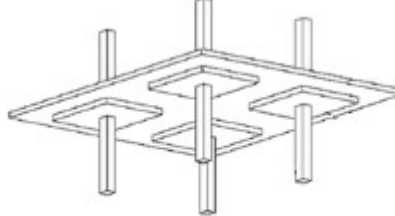
Figura 3 – Laje Nervurada.



Fonte: Junior (2010).

- ✓ Lajes cogumelo: são as lajes apoiadas em pilares, sem a presença de vigas, que possuem capitéis (Figura 4);

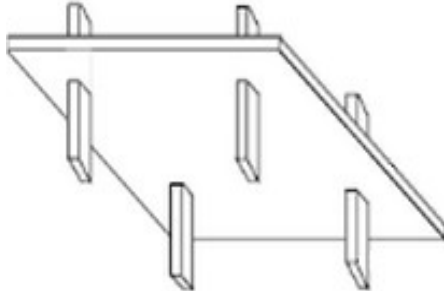
Figura 4 – Laje Cogumelo.



Fonte: Junior (2010).

- ✓ Lajes lisas: são as lajes que se apoiam diretamente sobre pilares e que não possuem capitéis (Figura 5);

Figura 5 – Laje Lisa.



Fonte: Junior (2010).

- **Quanto ao tipo de apoio**

- ✓ Apoiadas sobre o solo;

- ✓ Apoiadas sobre vigas;
- ✓ Apoiadas sobre pilares (lajes cogumelo, lisa, plana).

- **Quanto à direção da armadura principal**

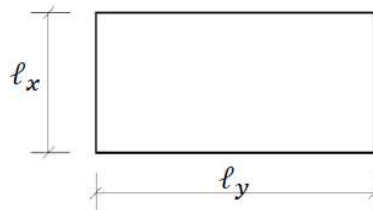
- ✓ Lajes armadas em uma direção: Geralmente apresentam-se com formato retangular, com determinada relação (Eq. 1) entre o lado maior e o lado menor, como pode ser visto na Figura 6:

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

Onde: l_x é o lado menor;

l_y é o lado maior.

Figura 6 - Laje armada em uma direção.



Fonte: Autor (2015).

Os esforços solicitantes de maior magnitude ocorrem segundo a direção do menor vão, chamada direção principal. Na outra direção, chamada secundária, os esforços solicitantes são bem menores e, por isso, são comumente desprezados nos cálculos (BASTOS, 2005).

As lajes armadas em uma direção, na realidade, possuem armaduras nas duas direções. A armadura principal, na direção do menor vão, é calculada para resistir o momento fletor nessa direção, obtido ignorando-se a existência da outra direção. Portanto, a laje é calculada como se fosse um conjunto de vigas-faixa na direção do menor vão.

Na direção do maior vão, coloca-se armadura de distribuição, com seção transversal mínima dada pela ABNT NBR 6118 (2014). Como a armadura principal é calculada para resistir à totalidade dos esforços, a armadura de distribuição tem o objetivo de solidarizar as faixas de laje da direção principal, prevendo-se, por exemplo, uma eventual concentração de esforços.

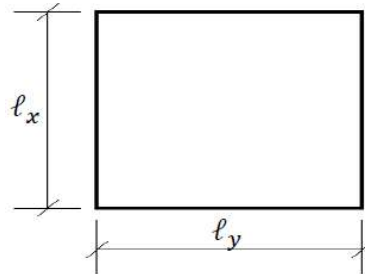
Lajes armadas em duas direções: Geralmente apresentam-se com formato quadricular, com determinada relação (Eq. 2) entre o lado menor e o lado maior, como pode ser visto na Figura 7.

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

Onde: l_y é o lado menor;

l_x é o lado maior.

Figura 7 - Laje armada em duas direções.



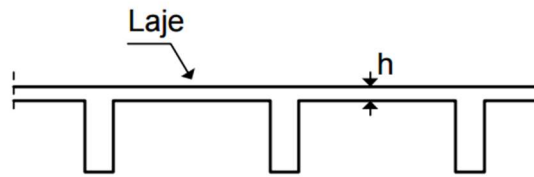
Fonte: Autor (2015).

Nas lajes armadas em duas direções, as duas armaduras são calculadas para resistir os momentos fletores nessas direções.

2.1.2 Lajes Maciças de Concreto Armado

As lajes maciças de concreto armado são de espessura uniforme composta por concreto, armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais apoiadas ao longo do seu contorno. Os apoios são constituídos por vigas e em casos particulares com bordas livres, sendo este o tipo de laje predominante nos edifícios residenciais, verificando-se vãos relativamente pequenos. Na Figura 8 está representado um esquema de laje maciça.

Figura 8- Esquema de laje maciça.



Fonte: Autor (2015).

As lajes maciças são as mais comuns dentre os diferentes tipos de lajes utilizadas em construções, incluindo pontes e edifícios de múltiplos pavimentos e obras de grande porte.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), as lajes maciças são projetadas com espessuras variando entre 7 cm e 15 cm para os mais variados tipos de construção porém, para construções de pequeno porte não são tão aplicadas, pois nesses tipos de construção as lajes nervuradas pré-fabricadas apresentam vantagens em alguns aspectos como custo e facilidade de execução.

2.1.2.1 Vantagens e Desvantagens das Lajes Maciças

A seguir é apresentada uma lista de vantagens e desvantagens relacionadas a lajes maciças de concreto armado.

I) Vantagens:

- Apresenta bom desempenho em relação à capacidade de redistribuição dos esforços;
- Apresenta boa rigidez devido a presença de vários pórticos, pois verifica-se elevada quantia de vigas;
- Apresenta mais resistência a fissuras e trincas provindas do excesso de dilatação térmica da placa, uma vez que, depois de seco, o concreto torna-se um bloco uniforme com dilatação uniforme.
- Adequada a situações de singularidade estrutural (por exemplo: um dois ou três bordos livres).

II) Desvantagens:

- Elevado consumo de fôrmas, escoras, concreto e aço;

- Elevado peso próprio implicando em maiores reações nos apoios (vigas, pilares e fundações);
- Elevado consumo de mão de obra referente às atividades dos profissionais: carpinteiro, armador, pedreiro e servente;
- Limitação quanto a sua aplicação a grandes vãos por conta da demanda de espessura média de concreto exigida para esta situação;
- Custo relativamente elevado;
- Elevado tempo para execução das formas e da desforma.

2.1.3 Lajes Nervuradas Pré-Moldadas de Concreto Armado

“As lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte” ABNT NBR 6118, 2014, p.115.

As nervuras, unidas e solidarizadas pela mesa (ou capa), que proporcionam a necessária resistência e rigidez, e a resistência do material de enchimento (materiais inertes) não contribui para aumentar a resistência da laje nervurada. Indicadas quando há necessidade de se vencer grandes vãos, as lajes nervuradas, ao vencer grandes vãos diminuem a quantidade de pilares e vigas na obra.

2.1.3.1 Vantagens e Desvantagens das Lajes Nervuradas

I) Vantagens

As lajes nervuradas de concreto armado apresentam uma série de vantagens, destacando-se:

- Permitem vencer grandes vãos, o que é vantajoso em locais como garagens;
- Podem ser utilizadas em pavimentos de edificações comerciais, residenciais, educacionais, hospitalares, garagens, “shopping centers”, clubes, etc.;
- São adequadas aos sistemas de lajes sem vigas, devendo manter-se regiões maciças apenas nas regiões dos pilares, onde há grande concentração de esforços.

II) Desvantagens

As desvantagens que as lajes nervuradas moldadas no local de concreto armado apresentam são:

- Normalmente aumentam a altura total da edificação;
- Dificuldade em projetar uma modulação única para o pavimento todo, de maneira que o espaçamento entre as nervuras seja sempre o mesmo;
- Exigem maiores cuidados durante a concretagem a fim de evitar que fiquem vazios nas nervuras, que costumam ser de pequena largura;
- Dificuldades na fixação dos elementos de enchimento, com a possibilidade de movimentação dos mesmos durante a concretagem.

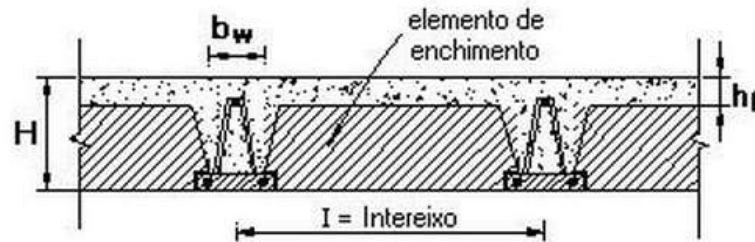
2.1.3.2 Lajes Nervuradas Pré-Fabricadas

Define-se como laje pré-fabricada, de concreto armado ou protendido, a laje que tem suas partes constituintes fabricadas em escala no canteiro de uma fábrica.

As lajes pré-fabricadas são constituídas por nervuras (também chamadas vigotas) de concreto e armadura, blocos de enchimento e capeamento superior de concreto. São muito comuns tanto para laje de piso como para laje de forro. Em função da armadura e da forma da vigota as lajes pré-fabricadas são hoje comumente encontradas segundo dois tipos diferentes: laje treliça (Figura 9) e laje convencional. São aplicadas tanto nas construções de grande porte como também nas de pequeno porte.

As normas brasileiras sobre lajes pré-fabricadas unidirecionais e bidirecionais ABNT NBR 14859-1 (2002), ABNT NBR 14859-2 (2002), ABNT NBR 14860-1 (2002), ABNT NBR 14860-2 (2002) e ABNT NBR 14861 (2002) apresentam as características exigíveis para alguns tipos de lajes pré-fabricadas.

Figura 9 – Esquema de laje nervurada pré-moldada com material inerte.



Fonte: Blog de Lajes Treliça¹ (2015).

2.2 Considerações de Projeto de Lajes

2.2.1 Vinculação das Bordas

Para o cálculo dos esforços solicitantes e das deformações nas lajes torna-se necessário estabelecer os vínculos da laje com os apoios, sejam eles pontuais como os pilares, ou lineares como as vigas de borda. Os tipos mais comuns de vínculo das lajes são o apoio simples e o engaste perfeito.

- **Bordas simplesmente apoiadas**

O apoio simples surge nas bordas onde não existe ou não se admite a continuidade da laje com outras lajes vizinhas.

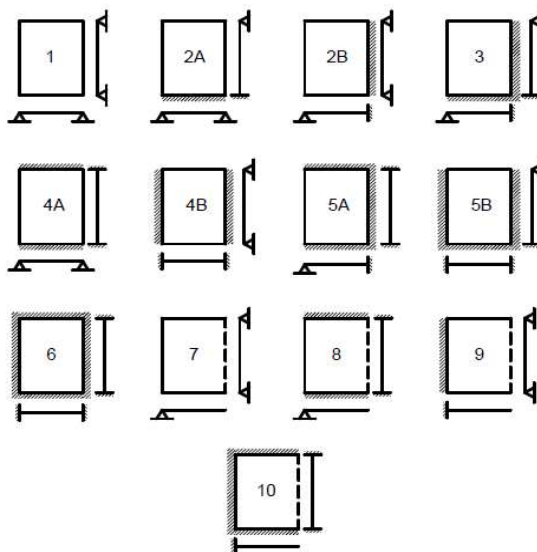
- **Bordas engastadas**

O engaste perfeito ocorre nas bordas onde há continuidade entre duas lajes vizinhas e no caso de lajes em balanço como marquises, varandas, etc.

De acordo com BASTOS (2005) “há várias combinações possíveis de vínculos nas quatro bordas das lajes retangulares, as lajes recebem números que diferenciam as combinações de vínculos nas bordas”, como indicados na Figura 10.

¹ Disponível em: <<http://lajestrellica.blogspot.com.br/p/nosso-produtos.html>> Acesso em 12 de Jul. de 2015.

Figura 10 – Tipos de lajes em função dos vínculos nas bordas.



Fonte: Bastos (2005).

2.2.2 Ações a Considerar no Dimensionamento de Lajes

Para determinação das ações atuantes nas lajes deve-se recorrer às normas ABNT NBR 6118 (2014), ABNT NBR 8681 (2003) e ABNT NBR 6120 (1980), entre outras pertinentes. As ações peculiares das lajes de cada obra também devem ser cuidadosamente avaliadas. Se as normas brasileiras não tratarem de cargas específicas, pode-se recorrer a normas estrangeiras, na bibliografia especializada, com os fabricantes de equipamentos mecânicos, de máquinas, etc. (BASTOS, 2005).

O item 4.3 da ABNT NBR 8681 (2003) define ações como causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. E verifica-se que nas construções de edifícios, geralmente as ações principais a serem consideradas são as ações permanentes (g) e as ações variáveis (q).

2.2.2.1 Ações Permanentes

O item 3.5 da ABNT NBR 8681 (2003) define ações permanentes como aquelas que “[...] ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção [...]”.

No item 4.2.1.1 da ABNT NBR 8681 (2003), classifica as ações permanentes em ações permanentes diretas e ações permanentes indiretas.

- a) ações permanentes diretas: são constituídas pelos pesos próprios dos elementos da construção, incluindo-se o peso próprio da estrutura e de todos os elementos construtivos permanentes, os pesos dos equipamentos fixos e os empuxos devidos ao peso próprio de terras não removíveis e de outras ações permanentes sobre elas aplicadas.
- b) ações permanentes indiretas são constituídas por deformações impostas por retração dos materiais, fluência, recalques de apoio, imperfeições geométricas e protensão.

2.2.2.1.1 Ações Permanentes em Lajes

Para o dimensionamento de lajes de concreto armado consideram-se como ações permanentes o peso próprio da laje, contrapiso, revestimento do teto, piso e paredes.

- **Peso Próprio da Laje**

O peso próprio da laje é o peso do concreto armado que forma a laje. Para o peso específico do concreto armado (γ_{conc}) a ABNT NBR 6120 (1980) indica o valor de 25 kN/m³. O peso próprio para lajes maciças com espessura constante é uniformemente distribuído na área da laje. O peso da laje pode ser calculado como:

$$g_{pp} = \gamma_{conc} \cdot h = 25 \cdot h \quad (3)$$

Onde: g_{pp} = peso próprio da laje (kN/m²);

h = altura da laje (m).

- **Contrapiso**

Contrapiso ou argamassa de regularização é o nome dado à camada de argamassa colocada logo acima do concreto da superfície das lajes. A sua função é de nivelar e diminuir a rugosidade da laje, preparando-a para receber o revestimento de piso final.

A espessura do contrapiso deve ser cuidadosamente avaliada e a argamassa do contrapiso tem comumente o traço 1:3 (em volume), sendo considerado o peso específico (γ_{contr}) de 21 kN/m³ de acordo com a ABNT NBR 6120 (1980).

A ação permanente do contrapiso é função da espessura (e) do contrapiso:

$$g_{contr} = \gamma_{contr} \cdot e = 21 \cdot e \quad (4)$$

Onde: g_{contr} = carga permanente do contrapiso (kN/m²);
 e = espessura do contrapiso (m).

- **Revestimento do Teto**

Na superfície inferior das lajes ou teto do pavimento inferior é comum executar-se uma camada de revestimento de argamassa, sobreposta à camada fina de chapisco. Para essa argamassa, menos rica em cimento, pode-se considerar, de acordo com a ABNT NBR 6120 (1980), o peso específico (γ_{rev}) de 19 kN/m³.

Para o revestimento de teto a ação permanente é:

$$g_{rev} = \gamma_{rev} \cdot e = 19 \cdot e \quad (5)$$

Onde: g_{rev} = carga permanente do revestimento do teto (kN/m²);
 e = espessura do revestimento (m).

- **Piso**

O piso é o revestimento final na superfície superior da laje, assentado sobre a argamassa de regularização. Para a sua correta quantificação é necessário definir o tipo ou material do qual o piso é composto, o que normalmente é feito com auxílio do projeto arquitetônico, que define o tipo de piso de cada ambiente da construção. Os tipos mais comuns são os de madeira, de cerâmica, carpetes ou forrações, e de rochas, como granito e mármore (BASTOS, 2005).

A ABNT NBR 6120 (1980) fornece os pesos específicos de diversos materiais, valores estes que auxiliam no cálculo da carga do piso por metro quadrado de área de laje.

- **Paredes**

Para determinar a carga das paredes sobre as lajes, é necessário conhecer o tipo de unidade de alvenaria (tijolo, bloco, etc.) que compõe a parede ou o peso específico da parede, a espessura e a altura da parede, bem como a sua disposição e extensão sobre a laje.

A carga de parede é considerada como uma força linearmente distribuída na direção da parede sobre a laje ou sobre a viga, cujo valor é dado por:

$$P = \gamma_{par} \cdot e \cdot h \quad (6)$$

Onde: P = força concentrada representativa da parede (kN/m);

γ_{par} = peso específico da parede (kN/m³);

e = espessura da parede (m);

h = altura da parede (m).

2.2.2.2 Ações Variáveis

“Consideram-se como ações variáveis as cargas acidentais das construções, bem como efeitos, tais como forças de frenação, de impacto e centrífugas, os efeitos do vento, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio e, em geral, as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. Em função de sua probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, as ações variáveis são classificadas em normais ou especiais” (NBR 8681, 2003, p.3).

- **Ações variáveis normais:** ações variáveis com probabilidade de ocorrência suficientemente grande para que sejam obrigatoriamente consideradas no projeto das estruturas de um dado tipo de construção;
- **Ações variáveis especiais:** nas estruturas em que devam ser consideradas certas ações especiais, como ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza ou de intensidade especiais, elas também devem ser admitidas como ações variáveis. As combinações de ações em que comparecem ações especiais devem ser especificamente definidas para as situações especiais consideradas.

2.2.2.2.1 Ações Variáveis nas Lajes

A ação variável nas lajes é tratada pela ABNT NBR 6120 (1980) no item 2.2 como carga acidental. Na prática, também costumam chamar a ação variável de sobrecarga de utilização. As cargas verticais que se consideram atuando nos pisos de edificações, além das

que se aplicam em caráter especial, referem-se a carregamentos devidos a pessoas, móveis, utensílios materiais diversos e veículos, e são supostas uniformemente distribuídas.

A Tabela 1 contém os valores mínimos usuais das cargas verticais atuantes para o dimensionamento de lajes de edifícios residenciais segundo a ABNT NBR 6120 (1980).

Tabela 1 – Valores mínimos das cargas verticais.

	Local	Carga (kN/m²)
Edifícios residenciais	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro	1,5
	Despensa, área de serviço e lavanderia	2,0
Escadas	Com acesso ao público	3,0
	Sem acesso ao público	2,5
Corredores	Com acesso ao público	3,0
	Sem acesso ao público	2,0
Forros	Sem acesso à pessoas	0,5

Fonte: ABNT NBR 6120 (1980) Adaptada.

2.2.2.3 Ações Excepcionais

“Consideram-se como excepcionais as ações decorrentes de causas tais como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais. Os incêndios, ao invés de serem tratados como causas de ações excepcionais, também podem ser levadas em conta por meio de uma redução da resistência dos materiais constitutivos da estrutura” (NBR 8681, 2003, p.3).

2.2.3 Estados Limites para Projeto de Estruturas

“Os estados limites podem ser estados limites últimos ou estados limites de serviço. Os estados limites considerados nos projetos de estruturas dependem dos tipos de materiais de construção empregados e devem ser especificados pelas normas referentes ao projeto de estruturas com eles construídas” (NBR 8681, 2003, p.2).

O estado limite último é empregado no dimensionamento de estruturas de concreto armado. O item 10.3 da ABNT NBR 6118 (2014) cita quando a consideração dos ELU deve ser considerada.

- a) Estado limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura. A segurança das estruturas de concreto deve sempre ser verificada em relação aos seguintes estados limites últimos: estado limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- b) Estado limite último de 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 [...];
- c) Estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) Estado limite último provocado por solicitações dinâmicas [...];
- e) Estado limite de colapso progressivo;
- f) Outros estados limites últimos que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

O item 10.4 da ABNT NBR 6118 (2014) explica que ELS:

[...] são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional das mesmas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos utilizados. (NBR 8681, 2003, p.73).

2.2.4 Limites Mínimos

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014) especifica alguns critérios para o dimensionamento de lajes maciças e nervuradas. Esses critérios são mostrados nos próximos itens.

2.2.4.1 Limites Mínimos Para Lajes Maciças

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014) os limites mínimos para lajes maciças são apresentados a seguir:

- a) 7 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- b) 8 cm para lajes de piso não em balanço;

- c) 10 cm para lajes em balanço;
- d) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- e) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- f) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, $L/42$ para lajes de piso biapoiadas e $L/50$ para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo.

2.2.4.2 Limites Mínimos Para Lajes Nervuradas

De acordo com o item 13.2.4.2 da ABNT NBR 6118 (2014) os limites mínimos para lajes nervuradas são apresentados a seguir:

A espessura da mesa, quando não houver tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre nervuras e não menor que 3 cm.

O valor mínimo absoluto deve ser 4 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro máximo 12,5 mm.

A espessura das nervuras não deve ser inferior a 5 cm.

Nervuras com espessura menor que 8 cm não devem conter armadura de compressão.(NBR 8681, 2003, p.92).

Para o projeto das lajes nervuradas devem ser obedecidas as seguintes condições:

- a) Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje;
- b) Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;

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

2.2.5 Deslocamentos Limites

“Deslocamentos limites são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado limite de deformações excessivas da estrutura” (NBR 6118, 2014, p.94). Para os efeitos da ABNT NBR 6118 (2014), são classificados nos quatro grupos básicos a seguir relacionados e devem obedecer aos limites estabelecidos na tabela seguinte:

- a) aceitabilidade sensorial: caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. A limitação da flecha para prevenir essas vibrações, em situações especiais de utilização, deve ser realizada como estabelecido na seção 23;
- b) efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;
- c) efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados;
- d) efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando 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-as ao modelo estrutural adotado.

Tabela 2 – Limites para deslocamentos.

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	1/250
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido às cargas acidentais	1/350
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar	Coberturas e varandas	Total	1/250
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásio e pistas de boliche	Total	1/350 + contraflecha
			Ocorrido após a construção	1/600

	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500$ ou 10mm ou $\Theta=0,0017\text{rad}$
Efeitos em elementos não estruturais	Forros	Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$l/350$
	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 adotado	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		

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014) Adaptada.

2.2.6 Combinações de Ações

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014):

Um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido.

A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura; a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos e aos estados limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e combinações de serviço, respectivamente. (NBR 8681, 2003, p.84).

As ações permanentes são consideradas em sua totalidade, enquanto que para as ações variáveis são consideradas apenas as parcelas que produzem efeitos desfavoráveis para a segurança.

2.2.6.1 Combinações Últimas

Segundo a ABNT NBR 6118/14, no item 11.8.2, “Uma combinação última pode ser classificada em normal, especial ou de construção e excepcional”.

- **Combinações Últimas Normais**

A ABNT NBR 6118 (2014), afirma que:

Em cada combinação devem estar incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas como secundárias, com seus valores reduzidos de combinação, conforme ABNT NBR 8681.

- **Combinações Últimas Especiais ou de Construção**

A ABNT NBR 6118 (2014), afirma que:

Em cada combinação devem estar presentes as ações permanentes e a ação variável especial, quando existir, com seus valores característicos e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação, conforme ABNT NBR 8681.

- **Combinações Últimas Excepcionais**

A ABNT NBR 6118 (2014), afirma que:

Em cada combinação devem figurar as ações permanentes e a ação variável excepcional, quando existir, com seus valores representativos e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação, conforme ABNT NBR 8681. Nesse caso se enquadram, entre outras, sismo e incêndio.

- **Combinações Últimas Usuais no Dimensionamento de Lajes de Concreto**

Armado

Os tipos de combinações últimas usuais para o dimensionamento de lajes estão dispostos na tabela 11.3 do item 11.8.2.4 da ABNT NBR 6118 (2014) e os coeficientes de ponderação estão dispostos nas tabelas 11.1 e 11.2 do item 11.7 da ABNT NBR 6118 (2014).

2.2.6.2 Combinações de Serviço

São classificadas de acordo com sua permanência na estrutura e devem ser verificadas como estabelecido a seguir:

- a) quase permanentes: podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado limite de deformações excessivas;
- b) frequentes: se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura e sua consideração pode ser necessária na verificação dos estados limites de formação de fissuras, de abertura de fissuras e de vibrações excessivas. Podem também ser consideradas para verificações de estados limites de deformações excessivas decorrentes de vento ou temperatura que podem comprometer as vedações;
- c) raras: ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado limite de formação de fissuras.

De forma geral, as combinações de serviço usuais estão dispostas na tabela 11.4 do item 11.8.3.2 da ABNT NBR 6118 (2014).

2.2.7 Cobrimento Nominal

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014) o cobrimento nominal é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução. E depende da classe de agressividade ambiental e do tipo de estrutura, apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.

Tipo de cobertura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014) Adaptada.

2.3 Sequência para Projeto de Lajes de Concreto Armado

Da mesma maneira que para qualquer elemento estrutural, em projetos de lajes, as seguintes etapas devem ser seguidas:

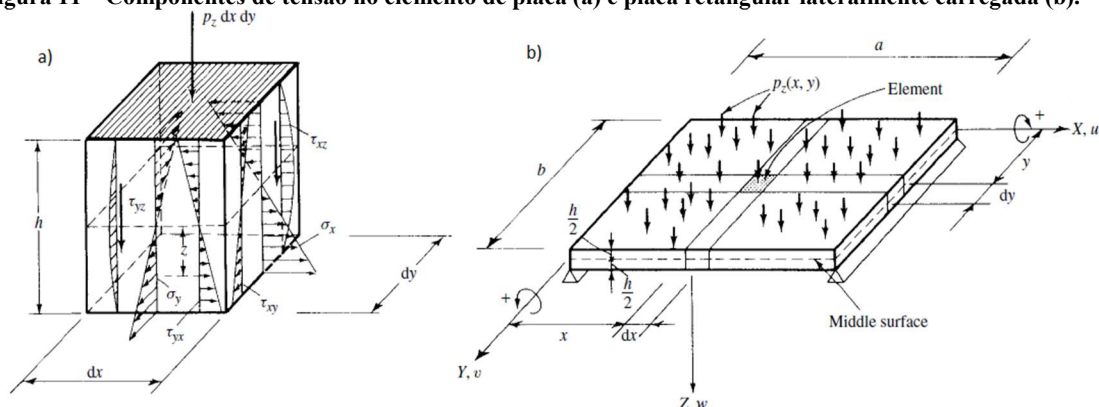
- Pré-dimensionamento das espessuras das lajes;
- Lançamento das lajes;
- Determinação do tipo de vinculação existente nas bordas das lajes;
- Determinar as ações (carregamentos) atuantes;
- Determinar os esforços solicitantes bem como a compatibilização destes para o painel completo de lajes;
- Determinação das armaduras longitudinais;
- Verificação do efeito das forças cortantes;
- Detalhamento das armaduras.

2.4 Métodos de cálculo de dimensionamento de lajes

O cálculo dos esforços solicitantes pode ser feito pela teoria clássica de placas delgadas (Teoria de Kirchhoff), supondo material homogêneo, isótropo, elástico e linear.

A equação diferencial da placa obtida a partir do equilíbrio de um elemento infinitesimal ($d_x d_y$) (Figura 11-a) localizado genericamente no plano da placa (Figura 11-b). O elemento infinitesimal ($d_x d_y$) sofre esforços solicitantes como se pode ver.

Figura 11 – Componentes de tensão no elemento de placa (a) e placa retangular lateralmente carregada (b).



Fonte: RUDOLPH SZILARD (2004).

A partir das equações de equilíbrio, das leis constitutivas do material elástico (Lei de Hooke) e das relações entre deslocamentos e deformações, fazendo-se as operações matemáticas necessárias, obtém-se a equação fundamental que rege o problema de placas (equação de Lagrange).

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p_z(x,y)}{D} \quad (7)$$

Onde,

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (8)$$

$w \rightarrow$ função que representa os deslocamentos verticais;

$p \rightarrow$ carga total uniformemente distribuída;

$D \rightarrow$ rigidez da placa à flexão;

$E \rightarrow$ módulo de elasticidade;

$h \rightarrow$ espessura da placa;

$\nu \rightarrow$ coeficiente de Poisson.

Nem sempre é possível determinar, de forma exata, uma solução para a equação diferencial (7) mesmo que, ainda, satisfaça às condições de contorno. Dessa forma, costuma-se recorrer a processos numéricos para a resolução dessa equação.

2.4.1 Dimensionamento pela Teoria de Marcus

O método de Marcus é baseado na Teoria da Elasticidade, de forma que os momentos fletores e força cortante são dados pelas equações abaixo:

$$M_x = \frac{q \cdot l_x^2}{m_x} \quad (9)$$

$$M_y = \frac{q \cdot l_y^2}{m_y} \quad (10)$$

$$q_x = k_x \cdot q \quad (11)$$

Os valores de M_y ocorrem na direção onde possui a maior quantidade de bordas engastadas e M_x atuando na outra direção. Porém, para melhor entendimento, os valores M_x e M_y serão apresentados como atuantes nas direções de menor e maior vão, respectivamente.

Os coeficientes m_x , m_y e k_x são obtidos através da tabela que relaciona a geometria da placa com os tipos de apoio nos bordos da mesma.

2.4.2 Dimensionamento pelo Método de Czerny

O método de Czerny é baseado na Teoria da Elasticidade, de forma que os momentos fletores e forças cortantes são dados pela equação abaixo:

$$M_x = \frac{q \cdot l_x^2}{m_x} \quad (12)$$

$$M_y = \frac{q \cdot l_y^2}{m_y} \quad (13)$$

$$R_x = V_x \cdot q \cdot l_x \quad (14)$$

$$R_y = V_y \cdot q \cdot l_y \quad (15)$$

Os coeficientes m_x , m_y , V_x e V_y são obtidos através da tabela que relaciona a geometria da placa com os tipos de apoio nos bordos da mesma.

2.4.3 Dimensionamento pelo Método de Bares

O método de Bares é baseado na Teoria da Elasticidade, de forma que os momentos fletores e forças cortantes são dados pela equação abaixo:

$$M_x = m_x \cdot \frac{q \cdot l_x^2}{100} \quad (16)$$

$$M_y = m_y \cdot \frac{q \cdot l_y^2}{100} \quad (17)$$

$$V_x = v_x \cdot \frac{q \cdot l_x}{10} \quad (18)$$

$$V_y = v_y \cdot \frac{q \cdot l_y}{10} \quad (19)$$

Os coeficientes m_x , m_y , v_x e v_y são obtidos através da tabela que relaciona a geometria da placa com os tipos de apoio nos bordos da mesma.

2.5 Cálculo Estrutural de Lajes Maciças por Métodos Tabelados

2.5.1 Vãos Efetivos

Para cálculo dos vãos efetivos é necessário conhecer a altura das lajes, o vão livre nas duas direções e a largura das vigas de apoio. Por outro lado, para estimativa da altura das lajes, conforme a Eq. 21, é preciso conhecer os vãos efetivos das lajes. Para resolver o problema será adotada uma altura comum a todas as lajes, de 8 cm. Também serão consideradas as larguras das vigas de apoio de 13 cm. Dessa forma, os vãos efetivos (Eq. 21) nas duas direções das lajes serão os vãos livres acrescidos dos valores de acordo com a Eq. 20:

$$a_1 = a_2 \leq \begin{cases} \frac{t_1}{2} = 6,5 \text{ cm} \\ 0,3h = 2,4 \text{ cm} \end{cases} \quad (20)$$

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \quad (21)$$

2.5.2 Estimativa da Altura Inicial das Lajes

A estimativa da altura das lajes pode ser feita através da seguinte equação:

$$d \cong (2,5 - 0,1n)l^* \quad (22)$$

onde: d = altura útil da laje (cm);

n = número de bordas engastadas da laje;

l^* = dimensão da laje assumida da seguinte forma:

2.5.3 Compatibilização dos Momentos Fletores

No dimensionamento de lajes consideram-se as lajes de um pavimento como isoladas umas das outras, o que gera diferentes momentos fletores negativos numa borda comum às duas lajes adjacentes.

O item 14.7.6.2 da ABNT NBR 6118 (2014) especifica que:

- a) Quando houver predominância de cargas permanentes, as lajes vizinhas podem ser consideradas como isoladas, realizando-se compatibilização dos momentos sobre os apoios de forma aproximada.
- b) Permite-se, simplificarmente, a adoção do maior valor de momento negativo ao invés de equilibrar os momentos de lajes diferentes sobre uma borda comum.

2.5.4 Dimensionamento das Armaduras Longitudinais de Flexão

De acordo com a Tabela 4, as armaduras mínimas negativas e positivas das lajes armadas em duas direções devem ser $\rho_s \geq \rho_{mín}$ e $\rho_s \geq 0,67\rho_{mín}$, respectivamente.

Tabela 4 - Valores mínimos para armaduras passivas aderentes.

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{mín}$
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67\rho_{mín}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{mín}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq 20 \% \text{ da armadura principal}$
	$\rho_s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$
	$\rho_s \geq 0,5 \rho_{mín}$

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014) Adaptada.

$$\rho_s = A_s/bw.d$$

Os valores de $\rho_{\min}$ constam da Tabela 5.

Tabela 5 - Taxas mínimas $\rho_{\min}$ (%) de armadura de flexão para seção retangular.

f_{ck} (Mpa)						
20	25	30	35	40	45	50
0,150	0,150	0,173	0,201	0,230	0,259	0,288

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014) Adaptada.

Depois de calculados os momentos fletores máximos nas lajes, o dimensionamento à flexão normal simples é feito de modo semelhante às vigas, fazendo a largura b_w igual a um metro (100 cm), assim pode-se calcular o coeficiente tabelado K_c . Os cálculos de K_c foram feitos com aplicação da Eq. 23:

$$K_c = \frac{100.d^2}{M_d} \quad (23)$$

A partir da Tabela 1 da apostila de “Flexão Normal Simples – Vigas Bastos (2004)” de valores de K_c e K_s , determina-se o coeficiente K_s e o domínio.

O item 19.2 da ABNT 6118 (2014) especifica que “*Nas regiões de apoio das lajes devem ser garantidas boas condições de ductilidade, atendendo às disposições de 14.6.4.3*”.

Segundo o item 14.6.4.3 da ABNT NBR 6118 (2014):

Para proporcionar o adequado comportamento dúctil em vigas e lajes, a posição da linha neutra no ELU deve obedecer aos seguintes limites:

- a) $x/d \leq 0,45$, para concretos com $f_{ck} \leq 50$ Mpa;
- b) $x/d \leq 0,35$, para concretos com $50 \text{ Mpa} \leq f_{ck} \leq 50$ Mpa.

A equação que determina a área de armadura, em cm^2/m , é dada pela Eq. 24:

$$A_s = K_s \frac{M_d^2}{d} \quad (24)$$

Algumas considerações devem ser feitas para realização do detalhamento. São elas:

- **Diâmetro máximo**

De acordo com a ABNT NBR (6118) “*Qualquer barra da armadura de flexão deve ter diâmetro no máximo igual a $h/8$* ”.

- **Espaçamento máximo e mínimo**

De acordo com a ABNT NBR (6118) “*As barras da armadura principal de flexão devem apresentar espaçamento no máximo igual a $2h$ ou 20 cm , prevalecendo o menor desses dois valores na região dos maiores momentos fletores*”.

A norma não especifica valores para o espaçamento mínimo. A rigor, pode-se adotar o valor recomendado para as barras de numa mesma camada horizontal das armaduras longitudinais das vigas:

$$e_{h,\text{mín}} \geq \begin{cases} 2\text{cm} \\ \Phi_{lh,\text{mín}} \\ 1,2d_{\text{máx,agr}} \end{cases} \quad (25)$$

2.5.5 Verificação do Esforço Cortante

Raramente as lajes maciças de edifícios residenciais necessitam de armadura transversal para resistir aos esforços cortantes. Para não ser necessária a armadura transversal deve-se ter Eq. 26:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (26)$$

O esforço cisalhante máximo que pode ser aplicado é dado pela Eq. 27:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k (1,2 + 40 \cdot \rho_1)] b_w d \quad (27)$$

Onde τ_{Rd} é dado por:

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} \quad (28)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}} \quad (29)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{(0,7.0,3.\sqrt[3]{f_{ck}})}{\gamma_c} \quad (30)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w.d}, \text{ desde que } \rho_1 \leq 0,02 \quad (31)$$

2.5.6 Flechas

Para o cálculo da flecha é necessário conhecer o estágio de cálculo da seção crítica considerada. Segundo o item 17.3.1 da ABNT NBR 6118 (2014) “*Nos estados limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre essas duas partes é definida pelo momento de fissuração. Esse momento pode ser calculado pela seguinte expressão aproximada:*”.

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad (32)$$

A resistência do concreto à tração direta (f_{ck}) pode ser calculada em função da resistência característica do concreto à compressão, como a resistência média à tração direta ($f_{ct,m}$ – Eq. 33):

$$f_{ct} = f_{ct,m} = 0,3\sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (33)$$

Momento de inércia da laje considerando seção homogênea não fissurada

$$I_c = \frac{bh^3}{12} \quad (34)$$

É necessário calcular o momento fletor (M_a) atuante na laje referente à combinação rara. A combinação rara de serviço é dada pela seguinte equação:

$$F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + F_{q1k} + \Sigma \Psi_{1j} F_{qjk} \quad (35)$$

Nas lajes de construções residenciais correntes, de modo geral, existe apenas uma ação variável, a carga acidental, conforme definida pela ABNT NBR 6120 (1980), de modo que a Eq. 35 fica reduzida aos dois primeiros termos.

Se o momento fletor solicitante na laje for menor que o momento fletor de fissuração, a seção estará no estágio I, ou seja, não está fissurada. As deformações podem ser determinadas no estágio I, com o momento de inércia da seção bruta de concreto.

Se o momento fletor solicitante de uma seção na laje for maior que o momento fletor de fissuração, a seção estará no estágio II, ou seja, está fissurada. Neste caso deve-se considerar o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) e a posição da linha neutra deve ser calculada no estágio II.

a) Flecha imediata

A flecha imediata é aquela que ocorre quando é aplicado o primeiro carregamento na peça, que não leva em conta os efeitos da deformação lenta. O item 17.3.2.1.1 da ABNT NBR 6118 (2014) prescreve que “*Para uma avaliação aproximada da flecha imediata em vigas, pode-se utilizar a expressão de rigidez equivalente dada a seguir:*”.

$$EI_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (36)$$

Para as lajes armadas em duas direções a flecha imediata pode ser calculada com através da equação 37:

$$a_i = \frac{\alpha}{12} \frac{p l_x^4}{EI} \quad (37)$$

b) Flecha diferida no tempo

A flecha diferida no tempo é aquela que leva em conta o fato do carregamento atuar na estrutura ao longo do tempo, causando a sua deformação lenta ou fluência. Segundo o item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118 (2014), “*A flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão:*”.

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1+50p'} \quad (38)$$

Onde:

$$p' = \frac{A'_s}{b d} \quad (39)$$

ξ = coeficiente função do tempo, que pode ser obtido diretamente na Tabela 6 ou ser calculado pelas expressões seguintes:

Tabela 6 - Valores do coeficiente ξ em função do tempo.

Tempo	0,0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
$\xi(t)$	0,0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2,00

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014) Adaptada.

A flecha total é obtida a partir da equação 40:

$$a_t = a_i(1 + \alpha_f) \quad (40)$$

2.6 Cálculo Estrutural de Lajes Nervuradas por Métodos Tabelados

De acordo com o item 13.4.2 da ABNT NBR 6118 (2014) são feitas algumas recomendações quanto ao dimensionamento de lajes nervuradas:

- a) A espessura da mesa, quando não houver tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a 1/15 da distância entre as faces das nervuras e não menor que 4 cm;
- b) O valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser 5 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm. Para tubulações com diâmetro ϕ maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de 4 cm + ϕ , ou 4 cm + 2 ϕ no caso de haver cruzamento destas tubulações;
- c) A espessura das nervuras não deve ser inferior a 5 cm;
- d) Nervuras com espessura menor que 8 cm não devem conter armadura de compressão.

2.6.1 Determinação de Parâmetros Iniciais

2.6.2 Vãos Efetivos e Vinculação nas Bordas

O cálculo dos vãos efetivos e vinculação nas bordas das lajes acontecem da mesma maneira que para lajes maciças (item 2.5.1).

2.6.3 Verificações

A ABNT NBR (6118) especifica que “*para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje*”.

$$l_0 \leq 65 \text{ cm} \begin{cases} \text{não é necessário fazer verificação da mesa à flexão} \\ \text{esforço cortante nas nervuras verificado como nas lajes maciças} \end{cases}$$

a) Verificações de h_f , b_1 , B_f

É necessário verificar se a largura da nervura (h_f), abas da seção (b_1) e largura colaborante (B_f) respeitam os valores especificados na Eq.41, Eq. 42 e Eq. 43 nas direções x e y, onde o valor de “a” é determinado pela Eq. 20, “a*” é dado pela distancia do comprimento efetivo e b_2 é a distância entre as faces da nervura.

$$h_f \geq \begin{cases} \frac{a}{15} \\ 4cm \end{cases} \quad (41)$$

$$b_1 \leq \begin{cases} 0,1. a * \\ 0,5. b_2 \end{cases} \quad (42)$$

$$B_f = 2. b_1 + b_w \quad (43)$$

2.6.4 Ferramenta de cálculo e análise estrutural

O software utilizado realiza cálculos estruturais em concreto armado, que utiliza análise matricial para realizar os cálculos, EBERICK versão 2013 para a análise e detalhamento dos diversos sistemas estruturais. Este software permite a modelagem de estruturas de concreto armado para o dimensionamento de lajes maciças, nervuradas moldadas no local e pré-moldadas, dentre outras finalidades como dimensionamento de vigas, pilares, fundações etc.

Foi feito o processamento da estrutura considerando-se o comportamento elástico-linear dos elementos estruturais e foram extraídas do programa, detalhamentos de armaduras e quantitativos, tais como o volume de concreto e taxa de armadura para lajes maciças e lajes nervuradas.

3 METODOLOGIA DO TRABALHO

3.1 Considerações gerais

Neste trabalho é apresentada uma análise comparativa entre os métodos de cálculo de lajes de concreto armado. Primeiramente, foram definidas as lajes a serem analisadas, em seguida, foi escolhido um pavimento modelo para ser utilizado como base para as concepções estruturais de cada um dos sistemas em análise.

Numa segunda etapa, fez-se o lançamento e análise da estrutura para aplicando-se os métodos de dimensionamento de lajes estudados, obtendo-se os quantitativos de materiais, que permitiram calcular os índices definidos para comparação. Foram analisados parâmetros estruturais tais como esforços e deslocamentos nas lajes mais solicitadas do pavimento.

3.2 Tipologia e concepção dos sistemas estruturais adotados

a) Sistema Estrutural:

- ✓ Estrutura convencional com lajes maciças de concreto armado;
- ✓ Estrutura convencional com lajes nervuradas pré-moldadas com EPS como material de enchimento.

b) Etapas consideradas

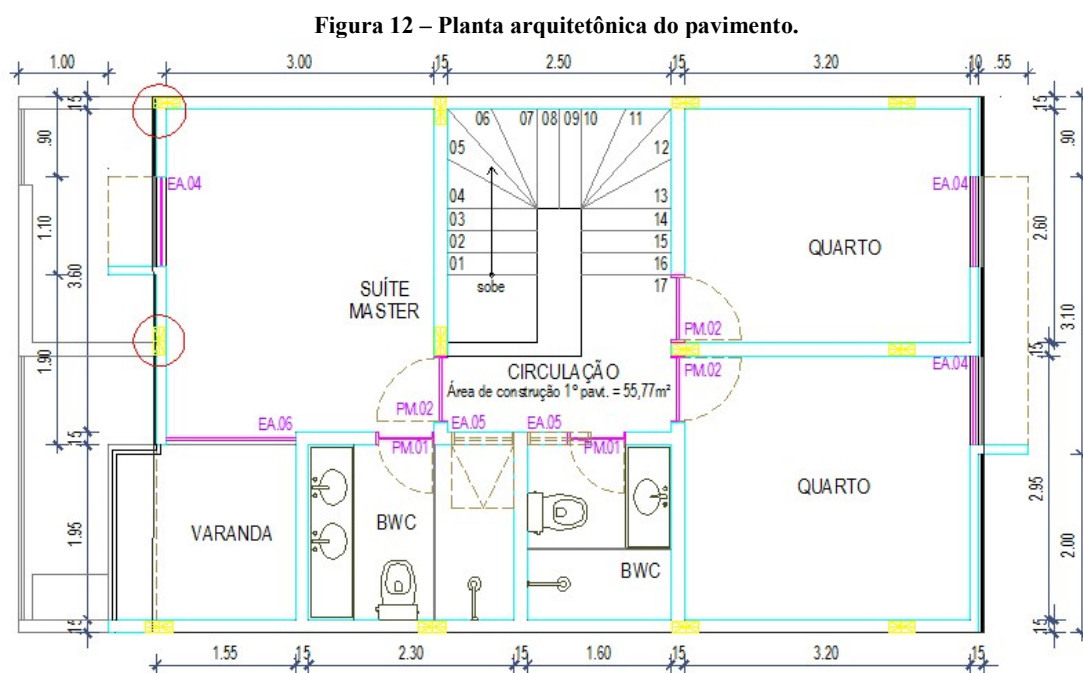
- ✓ Análise estrutural das lajes do pavimento escolhido através do método de Czerny, método de Marcus, método de Bares e por Software de análise estrutural, aplicados em lajes maciças e nervuradas pré-moldadas do tipo treliça;

3.3 Escolha do Pavimento Exemplo

A arquitetura do pavimento exemplo foi cedida pelo projetista estrutural. Essa edificação constitui-se de um Duplex e localiza-se à Rua Projetada R-1, Lote 15-A da Quadra 50, Bairro Jardim Panorama, na Cidade de Caruaru, Estado de Pernambuco.

Na figura 12 está mostrada a planta de arquitetura do pavimento superior de um duplex, com disposição das paredes divisórias.

O objetivo deste exemplo é ilustrar os métodos de cálculos de dimensionamento de lajes de concreto armado aplicados às lajes maciças e nervuradas pré-moldadas tipo treliça do pavimento.



Fonte: Projetista (2015).

3.4 Características do Projeto Estrutural

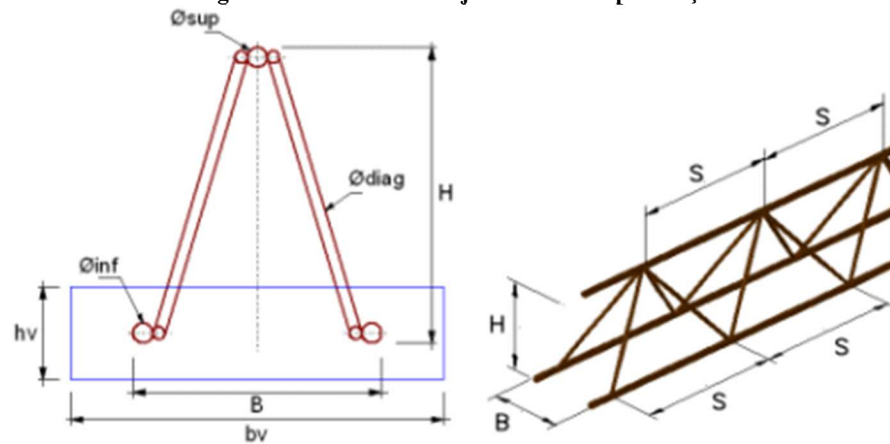
Considerou-se a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) igual a 25 MPa para todos os elementos estrutura (lajes, vigas e pilares e fundações).

Foi adotado classe de agressividade ambiental II, logo os cobrimentos das armaduras de vigas e pilares são iguais a 3,0 cm, enquanto que para as lajes são iguais a 2,5 cm segundo a tabela 7.2 da ABNT NBR 6118 (2014).

Na figura 13 está representada a nervura treliçada TR08644 comercialmente utilizada que foi adotada neste projeto. Com suas referencias abaixo, na Tabela 7:

No sistema estrutural de laje nervurada tipo treliçada consideraram-se nervuras bidirecionais com espessura das almas iguais a 12,0 cm, inteiros iguais a 52,0 utilizando EPS, como pode ser visto na figura 14.

Figura 13 – Nervura da laje nervurada tipo treliça.



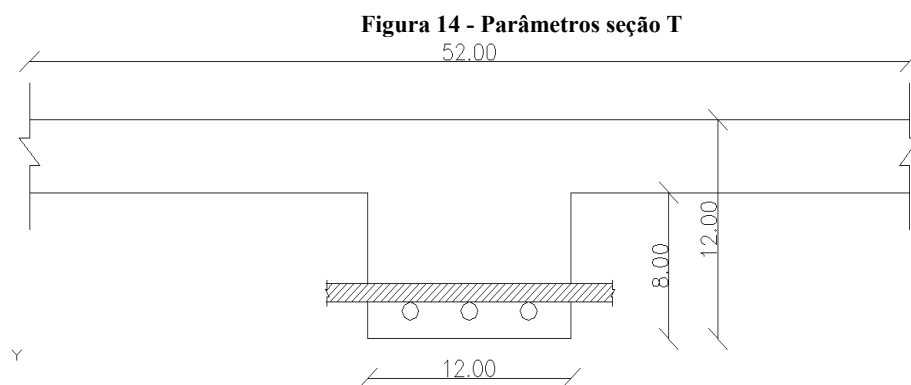
Fonte: Software Eberick (2015).

Tabela 7 – Referências das nervuras.

Laje	bv (cm)	hv (cm)	Treliça	Altura (cm)	Base (cm)	Armaduras treliça (mm)			S (cm)
						øsup	ødiag	øinf	
L1	12	3	TR 08644	8	8	6.0	4.2	4.2	20
L2	12	3	TR 08644	8	8	6.0	4.2	4.2	20
L3	12	3	TR 08644	8	8	6.0	4.2	4.2	20
L4	12	3	TR 08644	8	8	6.0	4.2	4.2	20
L5	12	3	TR 08644	8	8	6.0	4.2	4.2	20

Fonte: Software Eberick (2015).

Para cálculo da estrutura é necessário conhecer os parâmetros pré-determinados pelas nervuras. As informações referentes a cada nervura de cada laje estão ilustradas na figura 14. As nervuras nas direções x e y possuem as mesmas dimensões.



Fonte: Autor (2015).

No sistema estrutural de laje maciça considerou-se altura de 8 cm.

São considerados os seguintes carregamentos:

- Peso próprio: peso da estrutura calculado diretamente pelo programa com base nas dimensões dos elementos e no peso específico do concreto armado;
- Peso de revestimento: 1,00 kN/m² valor estimado;
- Carga accidental: de acordo com a Tabela 2 (valores mínimos das cargas verticais) da ABNT NBR 6120 (2014) prescreve:
 - 1,5 kN/m² para dormitórios, salas, copas, cozinha e banheiro;
 - 2,0 kN/m² para despensas, áreas de serviço e lavandeira;

A utilização destas cargas accidentais, aplicadas para lajes maciças, não demonstrou resultados possíveis de comparação, visto que as armaduras foram dimensionadas baseadas nos valores mínimos, possuindo valores iguais.

A fim de obter resultados possíveis para comparativo entre os métodos de dimensionamento, será aplicada a seguinte carga accidental para lajes maciças:

- 6,00 kN/m², que é o valor mínimo prescrito pela ABNT NBR 6120 (2014) norma e para salas com estantes de livros.

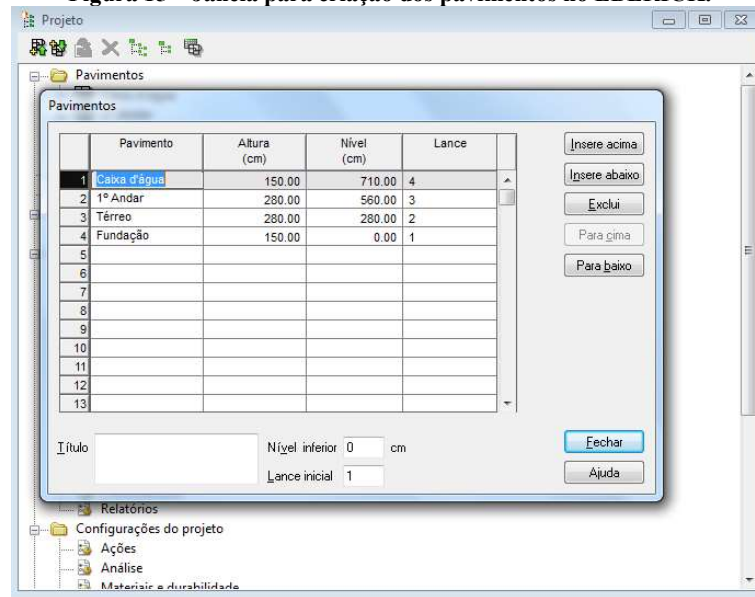
3.5 Lançamento e Cálculo Estrutural do Pavimento no Software EBERICK

De maneira geral as etapas executadas para realização do lançamento e do cálculo estrutural no programa EBERICK são as seguintes:

1ª Etapa: Definição do número de pisos, bem como suas características, tais como, cotas, pé-direito e nomenclaturas.

Neste arranjo é definido o esquema vertical dos andares da estrutura como fundação, térreo, pavimentos tipo, caixa d'água, com suas respectivas alturas, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Janela para criação dos pavimentos no EBERICK.

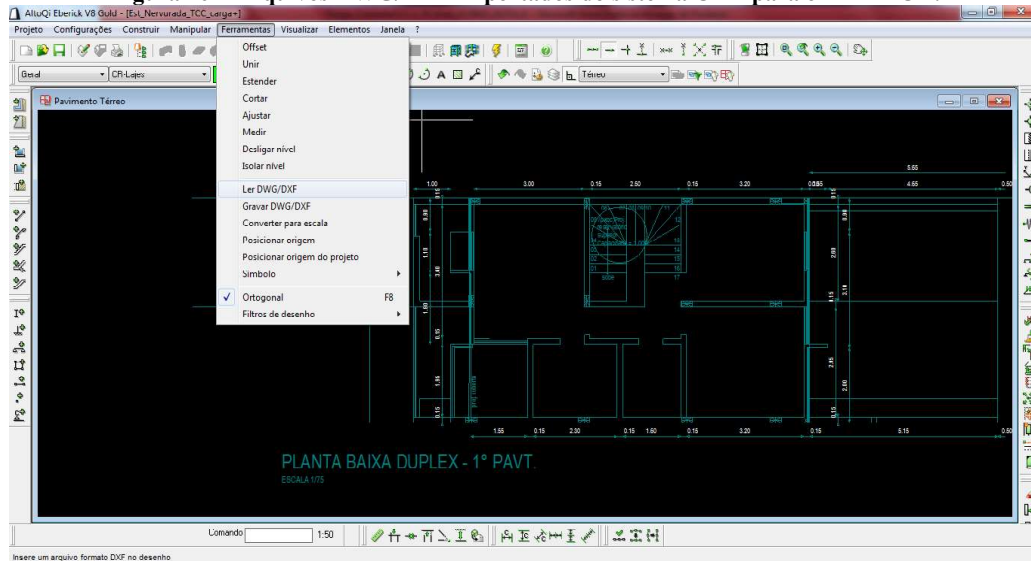


Fonte: Software Eberick (2015).

2ª Etapa: Importação de arquivos DXF/DWG

O usuário seleciona os arquivos DWG ou DXF para cada andar de modo que o desenho seja utilizado como base na modelagem da estrutura, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Arquivos DWG/DXF importados do sistema CAD para o EBERICK.



Fonte: Software Eberick (2015).

3ª Etapa: Materiais e Durabilidade

No menu “Configurações” pode ser escolhida a opção “Materiais e Durabilidade”. Nesta janela são definidas as propriedades do concreto e aço, tais como, dimensão do agregado, classe de agressividade ambiental, resistência do concreto, cobrimentos, bitolas de aço. A Figura 17 mostra o menu de Materiais e durabilidade do EBERICK.

Figura 17 - Materiais e durabilidade.

Materiais e durabilidade

Aplicação
☒ Projeto inteiro
☐ Por pavimento

Pavimento
 Laje de água
 1ª Andar
 Térreo
 Fundação

Avisos
 Todas as informações estão definidas corretamente
 Detalhes...

Geral
 Classe de agressividade: II (moderada)
 Dimensão do agregado: 19 mm
☐ Controle rigoroso nas dimensões dos elementos

Abertura máxima das fissuras
 Contato com o solo: 0.2 mm
 Contato com a água: 0.1 mm
 Demais peças: 0.3 mm

Elementos	Concreto	Cobrimento (peças externas)	Cobrimento (peças internas)	Bitolas...
Vigas	C-25	3 cm	3 cm	Bitolas...
Pilares	C-25	3 cm	3 cm	Bitolas...
Lajes	C-25	2.5 cm		Bitolas...
Reservatórios	C-25	3 cm		Bitolas...
Bloços	C-25	3 cm		Bitolas...
Sapatas	C-25	3 cm		Bitolas...
Tubulões	C-20	3 cm		Bitolas...
Muros	C-25	3 cm		Bitolas...
Radier	C-25	3 cm		Bitolas...

OK Cancelar Ajuda Fluência... Barras... Classes...

Fonte: Software Eberick (2015).

É possível considerar o vento existente na edificação de acordo com a NBR 6123 (1988), onde a velocidade do vento pode ser consultada diretamente das curvas isopletas.

Figura 18 - Configurações de vento.

Configurações de Vento

Velocidade: 30 m/s Mapa...

Aplicação do Vento
☒ Direção X
☒ Direção Y
 Ângulo: 0

Topografia
☐ Encostas e cristas de montes em que ocorre aceleração do vento. Vales com efeito de atenuamento (S1 = 1.1)
☐ Vales profundos, protegidos de todos os ventos (S1 = 0.9)
☒ Demais casos (S1 = 1.0)

Edificação
 Nível do solo: 100 cm
 Maior dimensão horizontal ou vertical: Menor que 20 m
 Rugosidade do terreno: Categoria III

Fator Estatístico S3
☐ Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicações, etc.); 1.10
☒ Edificações para hotéis e residências. Edificação para comércio e indústria com alto fator de ocupação; 1.00
☐ Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.); 0.95

OK Cancelar Ajuda

Velocidade do Vento

Mapa de isopletas de velocidade do vento (30, 35, 40, 45, 50 m/s).

OK Ajuda

Fonte: Software Eberick (2015).

4ª Etapa: Lançamento dos pilares

Os pilares podem ser de vários tipos, retangular, retangular vazada, seção L, seção T, seção I, seção U, seção +, seção circular e seção L aberta. São pré-estabelecidas as dimensões da seção escolhida. Também é possível optar pelo uso de capitel e determinar o tipo de vínculo, a verticalidade e o tipo do ambiente em que o pilar se encontra.

Figura 19 - Configurações de lançamento de Pilares.

Pilar

Dados do pilar

Nome: P13 Vínculo: Engastado

Elevação: 0 cm Verticalidade: Automático

Ângulo de rotação: 270 ° Ambiente: Externo

Seção

Tipo: retangular

b: 14 cm h: 30 cm

b1: 0 cm h1: 0 cm

Ângulo de abertura: 90 °

Capitel

☐ Usar capitel

Ângulo de rotação: 0 ° b: 100 cm

Espessura: 30 cm h: 100 cm

OK Cancelar Desenho... Ajuda

Fonte: Software Eberick (2015).

5ª Etapa: Lançamento das vigas

As vigas podem ser de vários tipos, vigas retangulares, seção T, seção T invertida, seção I, seção L, seção L invertida. São pré-estabelecidas as dimensões da seção escolhida. Também é possível inserir cargas de paredes e cargas extras, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Configurações de lançamento de Vigas.

Viga

Dados da viga

Nome: V12 Ambiente: Externo Modelo...

Seção do trecho

Tipo: retangular

bw: 12 cm h: 30 cm

bf: 0 cm hf: 0 cm

Elevação: 0 cm

Cargas

Parede: 0.00 kgf/m Lançar... Remover

Carga extra: 0 kgf/m Editar... Remover

OK Cancelar Desenho... Ajuda

Fonte: Software Eberick (2015).

5ª Etapa: Lançamento das Lajes

O programa calcula diversos tipos de lajes tais como: maciças, nervuradas, pré-moldadas, treliçadas 1D e 2D, painéis com enchimento 1D e 2D, painéis maciços 1D e 2D e vigotas protendidas. O processo de lançamento das lajes é muito simples, uma vez inseridas as vigas o software cria planos de lajes onde permite-se a inserção das mesmas através da

opção “Laje”. Então, são determinadas as cargas acidentais e de revestimento e pré-dimensionamento das dimensões da laje e materiais de enchimentos quando for necessário, conforme mostra a Figura 21.

Figura 21 - Configuração de lançamento de Lajes.

Laje

Nome: 1 Tipo: Trelçada 2D Grelha...

Cargas

Acidental: 200 kgf/m² Revestimento: 100 kgf/m²

Extra: 0 kgf/m² Editar... Remover

Trelça

Tipo: TR 16747 Repetições: 1

Altura sapata: 3 cm Largura sapata: 10 cm

Enchimento

Tipo: EPS Bidirecional

Dimensão: B16/40/40 ...

Seção

Espessura: 22 cm Elevação: 0 cm

ec: 6 cm ee: 16 cm enx: 9 cm eny: 7 cm

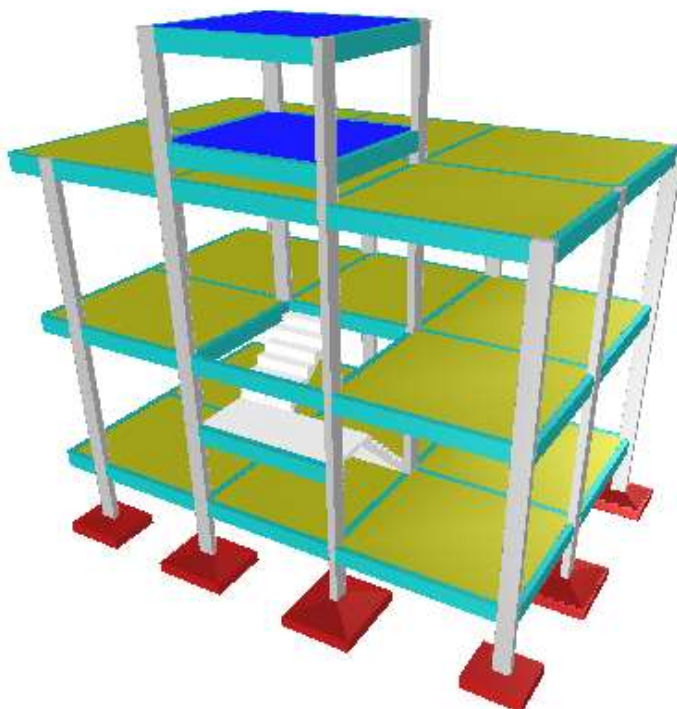
Diagrama de seção transversal da laje com reforço e enchimento.

OK Cancelar Desenho... Ajuda

Fonte: Software Eberick (2015).

Conforme a estrutura é modelada, a qualquer momento pode-se optar pela visualização espacial 3D, conforme é possível visualizar na Figura 22.

Figura 22 – Estrutura em 3D da edificação estudada gerada pelo EBERICK.

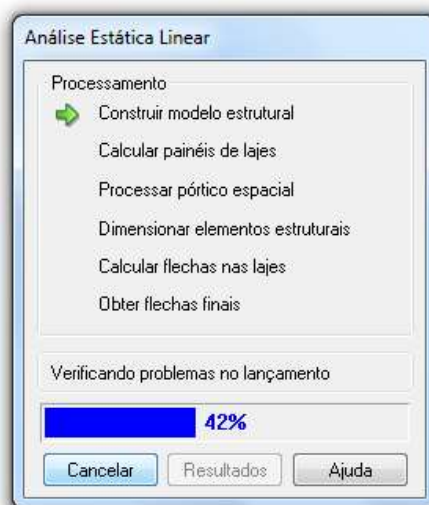


Fonte: Software Eberick (2015).

6ª Etapa: Cálculo da estrutura

Depois de todos os parâmetros estabelecidos pelo usuário, como dimensões da estrutura, carregamento, resistência do concreto, entre outros, a estrutura pode ser calculada através da opção “processar estrutura”. A Figura 23 mostra a janela que é exibida durante o processamento dos cálculos.

Figura 23 - Janela visível no instante do processamento da estrutura.



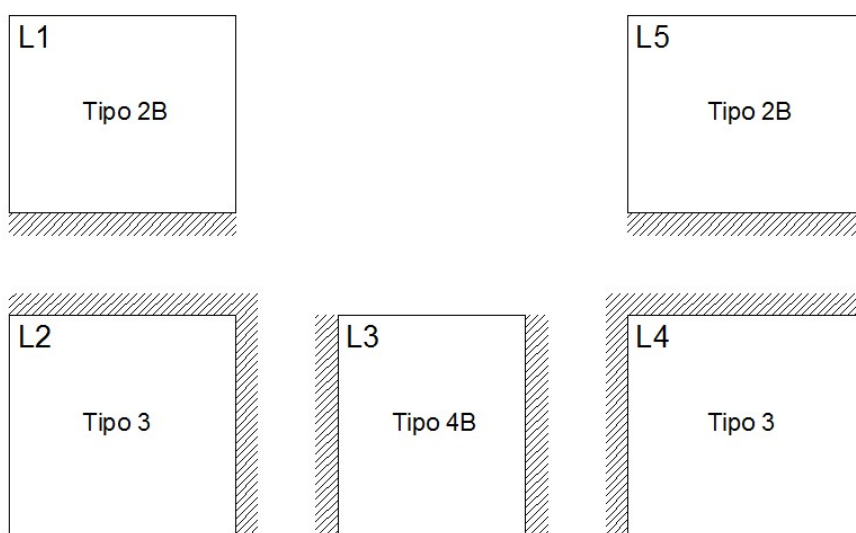
Fonte: Software Eberick (2015).

3.6 Considerações para o Cálculo Estrutural de Lajes maciças

3.6.1 Vinculação nas Bordas

Admitem-se dois tipos de vínculos das lajes nas bordas: apoio simples ou engaste perfeito. Neste trabalho todas as lajes do pavimento encontram-se ligadas às vigas na sua borda superior e nenhuma das lajes está rebaixada, ou seja, as lajes podem ser consideradas contínuas umas com as outras. Os vínculos nas bordas e o tipo de laje para as cinco lajes do pavimento estão mostrados na Figura 24.

Figura 24 - Vínculos das lajes nas vigas de borda.



Fonte: Autor (2015).

Tabela 8 - Vãos efetivos das lajes.

Laje	lx (m)	ly (cm)	λ	Tipo	Observação
L1	269,8	308,8	1,14	2B	Armada em 2 direções
L2	302,8	308,8	1,02	3	Armada em 2 direções
L3	256,8	302,8	1,18	4B	Armada em 2 direções
L4	302,8	326,3	1,08	3	Armada em 2 direções
L5	269,8	326,3	1,21	2B	Armada em 2 direções

Fonte: Autor (2015).

3.6.2 Pré-dimensionamento das Alturas das Lajes

As alturas das lajes foram calculadas fazendo: $h = d + c + \varphi_{1/2} = d + 2,0 + 1,0/2 = d + 2,5$ cm. O valor foi arredondado para o inteiro mais próximo. Para laje de piso a altura mínima é de 7 cm. A Tabela 9 facilita os cálculos a serem feitos.

Tabela 9 - Pré-dimensionamento das alturas das lajes.

Laje	l_x (cm)	l_y (cm)	λ	$0,7l_y$	l^* (cm)	n	d (cm)	h (cm)	h, adotada (cm)
L1	270,4	309,4	1,14	216,58	216,58	1	5,20	8,00	8,00
L2	302,8	308,8	1,02	216,16	216,16	2	4,97	8,00	8,00
L3	257,4	303,4	1,18	212,38	212,38	1	5,10	8,00	8,00
L4	303,4	326,9	1,08	228,83	228,83	2	5,26	8,00	8,00
L5	270,4	326,9	1,21	228,83	228,83	1	5,49	8,00	8,00

Fonte: Autor (2015).

3.6.3 Dimensionamento das Armaduras Longitudinais de Flexão

No cálculo das armaduras das lajes foram utilizados os seguintes valores para a altura útil d:

$d = h - 2,5$ cm para os momentos fletores positivos;

$d = h - 2,0$ cm para os momentos fletores negativos.

Para as armaduras positivas foi considerado o cobrimento de 2,0 cm e para as armaduras negativas o cobrimento foi de 1,5 cm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o lançamento e o dimensionamento da estrutura com todos os métodos de dimensionamento de lajes de concreto armado, serão apresentados os resultados da análise estrutural e de consumo de materiais de todos os métodos avaliados na pesquisa.

4.1 Resultados Obtidos para Lajes Maciças

4.1.1 Cálculo das Ações Atuantes

O cálculo das ações atuantes nas lajes fica facilitado com o auxílio da Tabela 10. Para o carregamento total nas lajes devem ser consideradas todas as ações possíveis, como: peso próprio, revestimentos, paredes e ações variáveis.

Tabela 10 - Ações atuantes nas lajes em (kN/m²).

Laje	h (cm)	g_{pp}	Revestimentos ⁽¹⁾	Paredes	Perman. Total	Variável	Total
L1	8,00	2,00	1,00	0,00	3,00	6,00	9,00
L2	8,00	2,00	1,00	1,59 ⁽²⁾	4,59	6,00	10,59
L3	8,00	2,00	1,00	2,96 ⁽²⁾	5,96	6,00	11,96
L4	8,00	2,00	1,00	0,00	3,00	6,00	9,00
L5	8,00	2,00	1,00	0,00	3,00	6,00	9,00

Fonte: Autor (2015).

Observações:

- (1) Piso mais contrapiso;
- (2) As cargas de parede foram distribuídas uniformemente sobre as lajes.

4.1.2 Reações de Apoio nas Vigas de Borda

As reações de apoio das lajes nas vigas de borda para cada método de cálculo estão calculadas e mostradas nas Tabelas 11, 12, 13 e 14.

Onde:

V = reação de apoio (kN/m);

v = coeficiente tabelado em função de $\lambda = l_y/l_x$, onde:

v_x = reação nos apoios simples perpendiculares à direção de l_x ;

v_y = reação nos apoios simples perpendiculares à direção de l_y ;

v'_x = reação nos apoios engastados perpendiculares à direção de l_x ;
 v'_y = reação nos apoios engastados perpendiculares à direção de l_y .

Tabela 11 - Reações de apoio nas vigas de borda das lajes maciças para o método de MARCUS em (kN/m).

Laje	p (kN/m ²)	v_x	v_y	v'_x	v'_y	V_x	V'_x	V_y	V'_y
L1	9,00	0,808	0,808	0,808	0,808	7,27	7,27	7,27	7,27
L2	10,59	0,520	0,520	0,520	0,520	5,51	5,51	5,51	5,51
L3	11,96	0,906	0,906	0,906	0,906	10,84	10,84	10,84	10,84
L4	9,00	0,576	0,576	0,576	0,576	5,18	5,18	5,18	5,18
L5	9,00	0,843	0,843	0,843	0,843	7,58	7,58	7,58	7,58

Fonte: Autor (2015).

Tabela 12 - Reações de apoio nas vigas de borda das lajes maciças para o método de CZERNY em (kN/m).

Laje	p (kN/m ²)	v_x	v_y	v'_x	v'_y	V_x	V'_x	V_y	V'_y
L1	9,00	0,248	0,429	0,161	0,00	6,04	10,45	4,49	0,00
L2	10,59	0,186	0,323	0,180	0,311	5,97	10,36	5,88	10,17
L3	11,96	0,00	0,371	0,129	0,00	0,00	13,45	4,67	0,00
L4	9,00	0,194	0,338	0,180	0,296	4,49	7,83	5,29	8,72
L5	9,00	0,254	0,44	0,153	0,00	6,18	10,71	4,50	0,00

Fonte: Autor (2015).

Tabela 13 - Reações de apoio nas vigas de borda das lajes maciças para o método de BARES em (kN/m).

Laje	p (kN/m ²)	v_x	v_y	v'_x	v'_y	V_x	V'_x	V_y	V'_y
L1	9,00	2,95	4,42	1,83	0,00	7,16	10,73	4,44	0,00
L2	10,59	2,2	3,25	2,17	3,17	7,05	10,42	6,96	10,17
L3	11,96	0,00	3,77	1,44	0,00	0,00	13,65	5,21	0,00
L4	9,00	2,32	3,39	2,17	3,17	5,36	7,83	5,02	7,33
L5	9,00	3,02	4,42	1,83	0,00	7,33	10,73	4,44	0,00

Fonte: Autor (2015).

Tabela 14 – Reações de apoio das lajes maciças pelo software Eberick em (kN/m).

Laje	p (kN/m ²)	V_x	V'_x	V_y	V'_y
L1	9,00	7,05	11,19	6,76	0,00
L2	10,59	7,04	10,48	5,71	10,31
L3	11,96	0,00	13,12	4,03	4,19
L4	9,00	8,33	11,23	2,52	7,69
L5	9,00	7,91	18,68	5,26	0,00

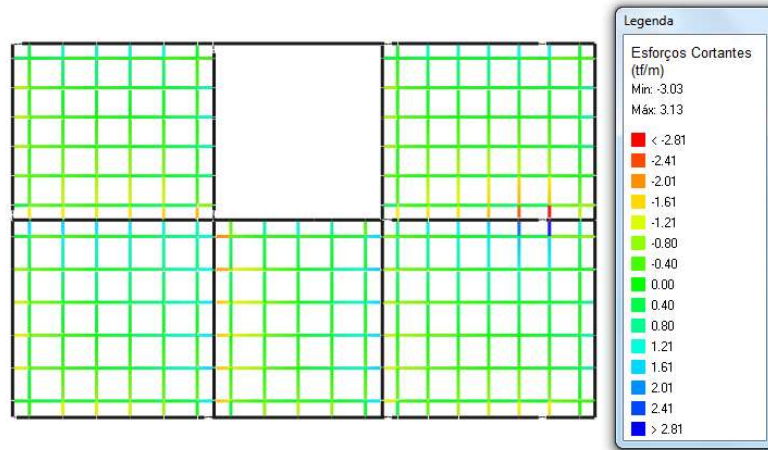
Fonte: Autor (2015).

Visando a simplificação do esquema de demonstração da atuação das reações de apoio, são demonstrados resultados baseados no método de BARES.

A figura 25, extraída do Eberick simula as reações de apoio atuantes nas lajes de acordo com a legenda.

As reações de apoio das lajes do pavimento estão indicadas na figura 26 onde é apresentado um desenho esquemático representando a planta de fôrma da estrutura.

Figura 25 – Atuação dos esforços cortantes nas lajes.



Fonte: Software Eberick (2015).

Figura 26 - Reações de apoio (kN/m) das lajes maciças nas vigas de borda por BARES.

L1 7,16 4,44 ← y → 4,44 10,73		L5 7,33 4,44 ← y → 4,44 10,73
L2 10,42 6,96 ← y → 10,17 7,05	L3 5,21 13,65 ↑ y ↓ 13,65 5,21	L4 7,83 7,33 ← y → 5,02 5,36

Fonte: Autor (2015).

As verificações dos esforços cortantes nas lajes para cada método de cálculo estão calculadas e mostradas nas Tabelas 15, 16 e 17.

Tabela 15 - Verificação dos esforços cortantes para o método de MARCUS.

Laje	τ_{rd} (kN/cm ²)	$\rho_{1,x}$	$\rho_{1,y}$	k	V_{Sd} (kN/m)	V_{Rd1} (kN/m)	Verificação
L1	0,03206	0,0020	0,0013	1,54	10,18	33,91	OK!
L2	0,03206	0,0020	0,0018	1,54	7,71	34,56	OK!
L3	0,03206	0,0025	0,0012	1,54	15,17	33,58	OK!
L4	0,03206	0,0013	0,0006	1,54	7,26	33,13	OK!
L5	0,03206	0,0021	0,0010	1,60	10,62	34,80	OK!

Fonte: Autor (2015).

Tabela 16 - Verificação dos esforços cortantes para o método de CZERNY.

Laje	τ_{rd} (kN/cm ²)	$\rho_{1,x}$	$\rho_{1,y}$	k	V_{Sd} (kN/m)	V_{Rd1} (kN/m)	Verificação
L1	0,03206	0,0016	0,0009	1,54	14,62	33,61	OK!
L2	0,03206	0,0018	0,0014	1,54	14,50	34,12	OK!
L3	0,03206	0,0026	0,0011	1,54	18,83	33,80	OK!
L4	0,03206	0,0012	0,0015	1,54	12,21	33,88	OK!
L5	0,03206	0,0019	0,0013	1,60	14,99	35,32	OK!

Fonte: Autor (2015).

Tabela 17 - Verificação dos esforços cortantes para o método de BARES.

Laje	τ_{rd} (kN/cm ²)	$\rho_{1,x}$	$\rho_{1,y}$	k	V_{Sd} (kN/m)	V_{Rd1} (kN/m)	Verificação
L1	0,03206	0,0020	0,0013	1,54	15,03	33,96	OK!
L2	0,03206	0,0020	0,0018	1,54	14,59	34,56	OK!
L3	0,03206	0,0025	0,0012	1,54	19,11	33,88	OK!
L4	0,03206	0,0013	0,0006	1,54	10,97	33,28	OK!
L5	0,03206	0,0021	0,0010	1,60	15,03	35,00	OK!

Fonte: Autor (2015).

4.1.3 Momentos Fletores

Os momentos fletores solicitantes para cada método de cálculo estão calculados e mostrados nas Tabelas 18, 19, 20 e 21.

M = momento fletor (kN.m/m);

μ = coeficiente tabelado, de acordo com cada tipo de laje e em função de $\lambda = l_y / l_x$, sendo:

μ_x e μ_y = coeficientes para cálculo dos momentos fletores positivos atuantes nas direções paralelas a l_x e l_y , respectivamente;

μ'_x e μ'_y = coeficientes para cálculo dos momentos fletores negativos atuantes nas bordas perpendiculares às direções l_x e l_y , respectivamente.

Tabela 18 – Momentos fletores solicitantes das lajes maciças para o método de MARCUS em (kN.m/m).

Laje	p (kN/m ²)	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	M_x	M'_x	M_y	M'_y
L1	9,00	24,83	9,89	40,55	0,00	2,64	6,62	1,62	0,00
L2	10,59	35,72	15,39	37,16	16,01	2,72	6,31	2,61	6,06
L3	11,96	32,32	13,24	68,91	0,00	3,39	8,28	1,59	0,00
L4	9,00	32,11	13,88	37,45	16,19	1,85	4,28	1,58	3,67
L5	9,00	23,11	9,45	42,99	0,00	2,83	6,94	1,52	0,00

Fonte: Autor (2015).

Tabela 19 – Momentos fletores solicitantes das lajes maciças para o método de CZERNY em (kN.m/m).

Laje	p (kN/m ²)	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	M_x	M'_x	M_y	M'_y
L1	9,00	26,10	21,08	46,70	0,00	2,52	3,12	1,84	0,00
L2	10,59	39,32	13,90	40,52	14,10	2,47	6,99	2,49	7,16
L3	11,96	30,00	13,10	70,36	0,00	3,66	8,37	1,56	0,00
L4	9,00	36,84	13,06	41,40	13,72	1,62	4,57	2,32	7,01
L5	9,00	24,50	10,20	48,80	0,00	2,69	6,45	1,97	0,00

Fonte: Autor (2015).

Tabela 20 – Momentos fletores solicitantes das lajes maciças para o método de BARES em (kN.m/m).

Laje	p (kN/m ²)	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	M_x	M'_x	M_y	M'_y
L1	9,00	4,19	9,49	2,68	0,00	2,74	6,22	1,76	0,00
L2	10,59	2,73	7,10	2,73	7,10	2,65	6,89	2,65	6,89
L3	11,96	3,52	7,63	1,68	0,00	3,86	8,37	1,84	0,00
L4	9,00	2,92	7,58	2,69	7,58	1,73	4,50	1,60	4,50
L5	9,00	4,47	9,93	2,55	0,00	2,93	6,51	1,67	0,00

Fonte: Autor (2015).

Tabela 21 - Momentos fletores solicitantes das lajes maciças pelo software Eberick em (kN.m/m).

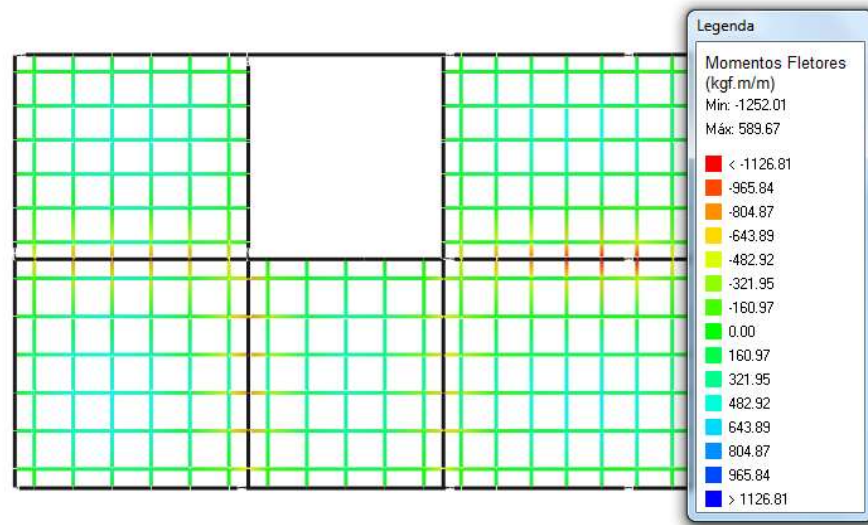
Laje	p (kN/m ²)	M_x	M'_x	M_y	M'_y
L1	9,00	4,69	7,91	4,00	0,00
L2	10,59	5,43	8,05	4,98	8,27
L3	11,96	4,08	8,32	3,88	0,00
L4	9,00	5,87	12,52	2,44	6,61
L5	9,00	5,63	7,91	2,36	0,00

Fonte: Autor (2015).

Visando a simplificação do esquema de demonstração da atuação dos momentos fletores solicitantes nas lajes do pavimento, serão demonstrados apenas resultados baseados no método de BARES.

A Figura 27, extraída do Eberick simula os momentos fletores de cálculo atuantes nas lajes de acordo com a legenda.

Figura 27 – Atuação dos momentos fletores nas lajes.

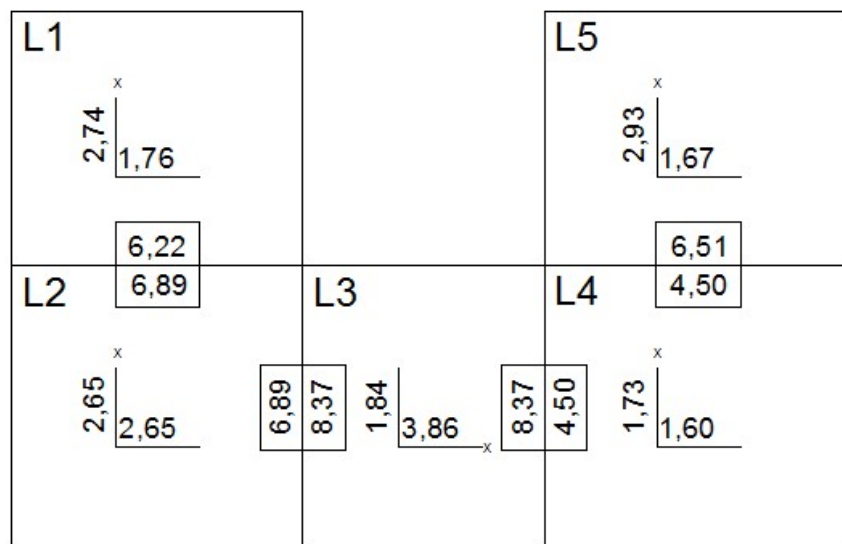


Fonte: Software Eberick (2015).

Os momentos fletores solicitantes característicos não compatibilizados estão plotados na Figura 28, conforme os valores contidos na Tabela 20.

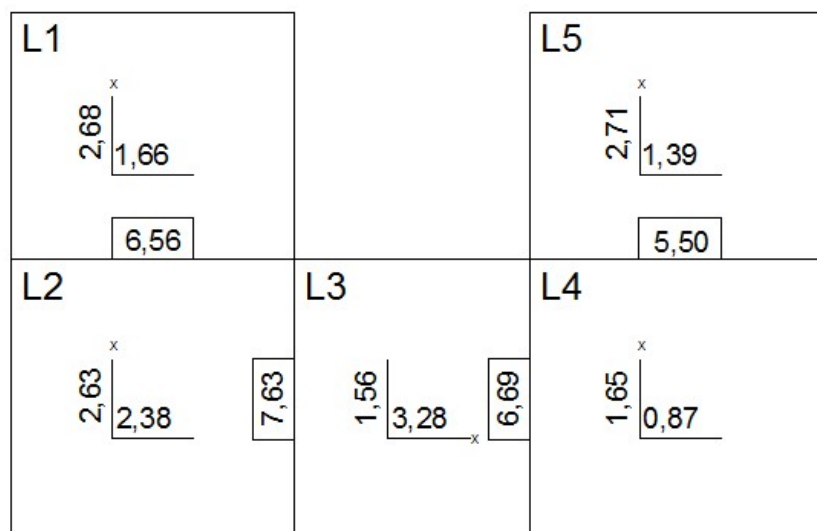
Na Figura 29 estão plotados os momentos fletores compatibilizados.

Figura 28 - Momentos fletores solicitantes característicos não compatibilizados em (kN.m/m) .



Fonte: Autor (2015).

Figura 29 - Momentos fletores solicitantes característicos compatibilizados em (kN.m/m).



Fonte: Autor (2015).

A Tabela 22 mostra o resumo dos momentos fletores de cálculo máximos positivos, em kN.m/m obtidos pelos quatro métodos de cálculo para todas as cinco lajes maciças.

Tabela 22 - Momentos fletores positivos pelos quatro métodos para lajes maciças.

	Marcus		Czerny		Bares		Eberick V8	
Laje	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y
L1	2,64	1,62	2,52	1,84	2,74	1,76	4,69	4,00
L2	2,72	2,61	2,47	2,49	2,65	2,65	5,43	4,98
L3	3,39	1,59	3,66	1,56	3,86	1,84	4,08	3,88
L4	1,85	1,58	1,62	2,32	1,73	1,60	5,87	2,44
L5	2,83	1,52	2,69	1,97	2,93	1,67	5,63	2,36

Fonte: Autor (2015).

A análise da Tabela 22 permite observar que os momentos fletores positivos obtidos através da utilização das tabelas possuem uma variação máxima de aproximadamente 32%. Observou-se também que na grande maioria das lajes, os momentos fletores positivos obtidos com o uso das tabelas de Czerny são menores que os obtidos pelos outros métodos, sendo possível afirmar que este é o método mais desfavorável do ponto de vista da segurança.

Para efeito de comparação, tomaram-se como base os resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha). A Tabela 23 apresenta, em percentual, as diferenças entre os métodos para os momentos fletores positivos, quando comparados aos resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha). A análise deste quadro permite verificar variações de até 72,4 %, no caso do momento na direção x da Laje L4.

Tabela 23 - Diferenças entre os métodos para os momentos fletores positivos para lajes maciças.

Laje	Marcus		Czerny		Bares	
	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y
L1	43,7%	59,5%	46,3%	54,0%	41,6%	56,0%
L2	49,9%	47,6%	54,5%	50,0%	51,2%	46,8%
L3	16,9%	59,0%	10,3%	59,8%	5,4%	52,6%
L4	68,5%	35,2%	72,4%	4,9%	70,5%	34,4%
L5	49,7%	35,6%	52,2%	16,5%	48,0%	29,2%

Fonte: Autor (2015).

Da mesma forma, a Tabela 24 mostra o resumo dos momentos fletores máximos negativos, de engastamento, entre as lajes do projeto definido. E a Tabela 25 apresenta, em percentual, as diferenças entre os métodos para os momentos fletores negativos, em kN.m/m, quando comparados aos resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha).

Tabela 24 – Momentos fletores negativos pelos quatro métodos para lajes maciças.

Lajes	Marcus	Czerny	Bares	Eberick V8
L1-L2	-9,05	-7,82	-9,18	-8,05
L2-L3	-10,04	-10,87	-10,68	-8,32
L3-L4	-9,28	-10,77	-9,37	-6,61
L4-L5	-7,85	-7,71	-7,70	-12,52

Fonte: Autor (2015).

Tabela 25 – Diferenças entre os métodos para os momentos fletores negativos.

Lajes	Marcus	Czerny	Bares
L1-L2	12,5%	2,8%	14,0%
L2-L3	20,7%	30,7%	28,4%
L3-L4	40,3%	62,9%	41,8%
L4-L5	37,3%	38,4%	38,5%

Fonte: Autor (2015).

A análise da Tabela 24 permite observar que os momentos fletores negativos obtidos através da utilização das tabelas possuem uma variação máxima de aproximadamente 14,8%.

A partir da análise das Tabelas 24 e 25 percebe-se que em todas as lajes os momentos fletores negativos obtidos através das tabelas de Marcus e Bares possuem resultados muito parecidos, com variação máxima de apenas 6,0%.

Nota-se também que, os valores encontrados para os momentos fletores negativos com o Eberick V8 em geral são inferiores aos outros processos de cálculo.

4.1.4 Dimensionamento das Armaduras Longitudinais

As áreas de armadura mínimas positivas e negativas estão calculadas e mostradas nas Tabelas 26 e 27, respectivamente.

Tabela 26 - Dimensionamento das armaduras mínimas positivas.

Laje	d (cm)	h (cm)	$A_{s,min}$ (cm ² /m)
L1	5,5	8	0,53
L2	5,5	8	0,50
L3	5,5	8	0,52
L4	5,5	8	0,53
L5	5,5	8	0,56

Fonte: Autor (2015).

Tabela 27 Dimensionamento das armaduras mínimas negativas.

Lajes	d (cm)	$A'_{s,min}$ (cm ² /m)
L1-L2	6,00	0,90
L2-L3	6,00	0,90
L3-L4	6,00	0,90
L4-L5	6,00	0,90

Fonte: Autor (2015).

As armaduras longitudinais positivas calculadas por cada método de cálculo em cada direção estão apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 – Áreas de armaduras longitudinais de flexão em (cm²/m).

Laje	Marcus		Czerny		Bares		Eberick V8	
	A_x	A_y	A_x	A_y	A_x	A_y	A_x	A_y
L1	1,63	0,97	1,31	0,76	1,64	1,01	2,58	1,87
L2	1,65	1,45	1,48	1,13	1,61	1,45	3,10	2,36
L3	1,62	0,73	2,06	0,90	2,00	0,95	1,91	2,10
L4	1,07	0,40	0,96	1,17	1,01	0,51	3,27	1,10
L5	1,55	0,67	1,52	1,04	1,66	0,81	3,12	1,06
Total	7,52	4,22	7,33	5,00	7,92	4,73	13,98	8,49

Fonte: Autor (2015).

A análise da Tabela 28 permite observar que o consumo de aço devido à atuação dos momentos fletores positivos obtidos através da utilização das tabelas possuem uma variação máxima de aproximadamente 15,6%. Observou-se também que na grande maioria das lajes, o consumo de aço devido aos momentos positivos obtidos com o uso das tabelas de Czerny são

menores que os obtidos pelos outros métodos, sendo possível afirmar que este é o método mais desfavorável do ponto de vista da segurança.

Foram somadas as áreas de aço nas direções x e y de cada laje para fins de comparação. Tomaram-se como base os resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha). A Tabela 27 apresenta, em percentual, as diferenças entre os métodos para o consumo de aço devido aos momentos fletores positivos, quando comparados aos resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha). A análise deste quadro permite verificar variações de até 47,8 %, no caso do momento positivo da Laje L4.

Tabela 29 - Diferenças entre os métodos para os consumos de aço devido aos momentos positivos para lajes maciças.

Lajes	Marcus	Czerny	Bares
Todas as Lajes	47,8%	45,1%	43,7%

Fonte: Autor (2015).

Da mesma forma, a Tabela 30 mostra o resumo dos momentos fletores máximos negativos, de engastamento, entre as lajes do projeto definido. E a Tabela 31 apresenta, em percentual, as diferenças entre os métodos para os momentos fletores negativos, em cm^2/m , quando comparados aos resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha).

Tabela 30 – Áreas de armaduras negativas (cm^2/m).

Lajes	A'_{sx} <i>Marcus</i>	A'_{sx} <i>Czerny</i>	A'_{sx} <i>Bares</i>	A'_{sx} <i>Eberick</i>
L1-L2	3,92	3,39	3,98	4,10
L2-L3	4,35	4,71	4,63	4,26
L3-L4	4,02	4,67	4,06	3,28
L4-L5	3,27	3,21	3,21	7,04

Fonte: Autor (2015).

Tabela 31 - Diferenças entre os métodos para os consumos de aço devido aos momentos negativos para lajes maciças.

Lajes	Marcus	Czerny	Bares
Todas as Lajes	16,7%	14,5%	15,0%

Fonte: Autor (2015).

A partir da análise das Tabelas 30 e 31 percebe-se que o total de consumo de aço das continuidades das lajes obtidos através de todos os métodos possuem resultados muito parecidos. Nota-se também que, os valores encontrados para o consumo de aço nas continuidades das lajes com as tabelas de Czerny é inferior aos outros processos de cálculo.

4.1.5 Flechas

A Tabela 32 mostra os valores das flechas totais e admissíveis de cada laje maciça do pavimento exemplo.

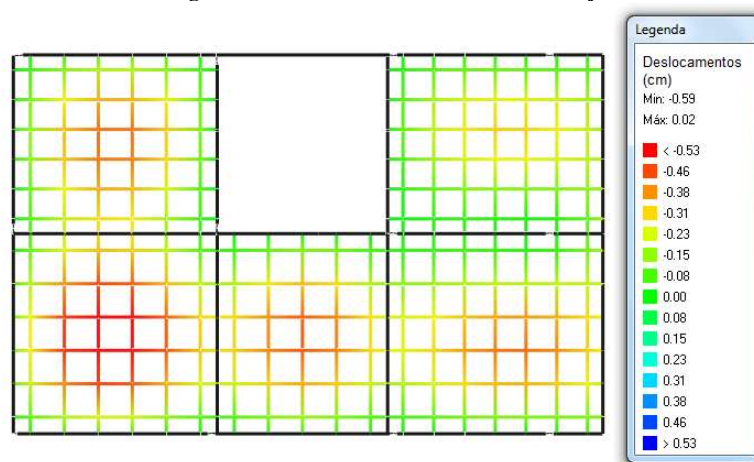
Tabela 32 - Flechas totais e admissíveis por MARCUS, CZERNY, BARES, EBERICK (mm).

Laje	a_t (Marcus / Bares / Czerny)	a_t Eberick	a_{adm}
L1	3,2	4,5	10,8
L2	2,6	6,9	12,1
L3	1,7	6,2	10,3
L4	2,2	4,9	12,1
L5	2,0	3,1	10,79

Fonte: Autor (2015).

A figura 30, extraída do Eberick simula os valores das flechas nas lajes de acordo com a legenda ao lado.

Figura 30 – Ocorrência das flechas nas lajes.



Fonte: Software Eberick (2015).

4.2 Resultados Obtidos para Lajes Nervuradas

4.2.1 Cálculo das Ações Atuantes

O cálculo das ações atuantes nas lajes fica facilitado com o auxílio da Tabela 33. Para o carregamento total nas lajes devem ser consideradas todas as ações possíveis, como: peso próprio, revestimentos, paredes e ações variáveis.

Para as lajes do pavimento será considerada carga acidental como $q = 1,5kN/m^2$.

Tabela 33 - Ações atuantes nas lajes nervuradas em (kN/m²).

Laje	h (cm)	ce (cm)	g_{pp}	Revestimentos	Paredes	Perman. Total	Variável	Total
L1	8,00	4,00	2,20	1,00	0,00	3,20	1,50	4,70
L2	8,00	4,00	2,20	1,00	1,59	4,79	1,50	6,29
L3	8,00	4,00	2,20	1,00	2,96	6,16	1,50	7,66
L4	8,00	4,00	2,20	1,00	0,00	3,20	1,50	4,70
L5	8,00	4,00	2,20	1,00	0,00	3,20	1,50	4,70

Fonte: Autor (2015).

4.2.2 Reações de Apoio nas Vigas de Borda

As reações de apoio das lajes nas vigas de borda para cada método de cálculo estão calculadas e mostradas nas Tabelas 34, 35, 36 e 37.

Tabela 34 - Reações de apoio nas vigas de borda das lajes nervuradas para o método de MARCUS em (kN/m).

Laje	p (kN/m ²)	K	R
L1	4,70	0,628	2,81
L2	6,29	0,52	3,15
L3	7,66	0,66	4,90
L4	4,70	0,576	2,57
L5	4,70	0,682	3,05

Fonte: Autor (2015).

Tabela 35 - Reações de apoio nas vigas de borda das lajes nervuradas para o método de CZERNY em (kN/m).

Laje	p (kN/m ²)	vx	vy	Vx	Vy
L1	4,70	0,283	0,217	3,42	3,00
L2	6,29	0,256	0,241	4,70	4,51
L3	7,66	0,288	0,213	6,47	4,79
L4	4,70	0,268	0,233	3,08	3,40
L5	4,70	0,296	0,204	3,58	2,98

Fonte: Autor (2015).

Tabela 36 - Reações de apoio nas vigas de borda das lajes nervuradas para o método de BARES em (kN/m).

Laje	p (kN/m ²)	vx	vy	Vx	Vy
L1	4,70	2,83	2,5	3,42	3,02
L2	6,29	2,06	2,5	3,78	4,59
L3	7,66	2,875	2,5	6,47	5,62
L4	4,70	2,675	2,5	3,08	2,88
L5	4,70	2,96	2,5	3,58	3,02

Fonte: Autor (2015).

As reações de apoio das lajes do pavimento estão indicadas na figura 32 onde é apresentado um desenho esquemático da planta de fôrma da estrutura.

Tabela 37 – Reações de apoio das lajes nervuradas pelo software Eberick em (kN/m).

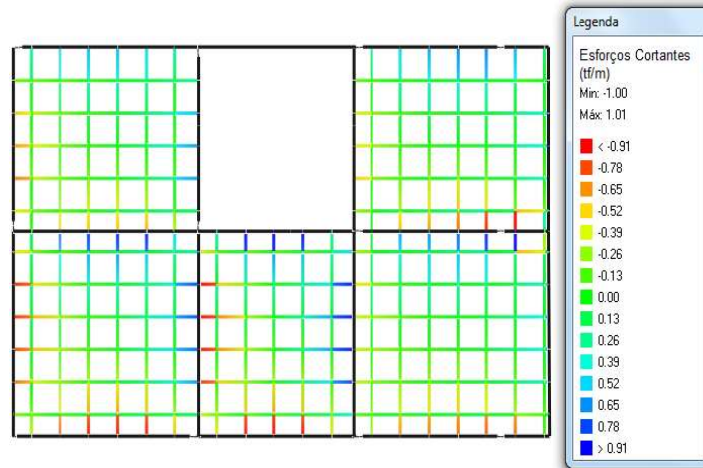
Laje	p (kN/m ²)	Vx	Vy
L1	4,70	5,8	6,9
L2	6,29	9,1	8,5
L3	7,66	09,6	10,1
L4	4,70	10,1	5,6
L5	4,70	10,0	5,6

Fonte: Autor (2015).

Visando a simplificação do esquema de demonstração da atuação das reações de apoio, são demonstrados resultados baseados no método de BARES.

A figura 31, extraída do Eberick, simula as reações de apoio atuantes nas lajes de acordo com a legenda.

Figura 31 – Atuação dos esforços cortantes.



Fonte: Software Eberick (2015).

Figura 32 - Reações de apoio (kN/m) das lajes maciças nas vigas de borda por BARES.

L1 3,42 3,02 $\swarrow \searrow$ 3,02 3,42		L5 3,58 3,02 $\swarrow \searrow$ 3,02 3,58
L2 3,78 4,59 $\swarrow \searrow$ 4,59 3,78	L3 5,62 9,53 $\swarrow \searrow$ 9,53 5,62	L4 3,08 2,88 $\swarrow \searrow$ 2,88 3,08

Fonte: Autor (2015).

A verificação do esforço cortante em lajes nervuradas acontece de forma semelhante às lajes maciças. Do mesmo modo, foram obtidos os seguintes valores para cada método:

Tabela 38 - Verificação dos esforços cortantes para o método de MARCUS.

Laje	τ_{rd} (kN/cm ²)	$\rho_{1,x}$	$\rho_{1,y}$	k	V_{Sd} (kN/m)	V_{Rd1} (kN/m)	Verificação
L1	0,03206	0,0003	0,0002	1,50	5,06	7,29	OK!
L2	0,03206	0,0004	0,0003	1,50	4,41	7,32	OK!
L3	0,03206	0,0004	0,0002	1,50	9,42	7,29	ERRO!
L4	0,03206	0,0002	0,0001	1,50	3,60	7,26	OK!
L5	0,03206	0,0003	0,0001	1,60	5,27	7,79	OK!

Fonte: Autor (2015).

Tabela 39 - Verificação dos esforços cortantes para o método de CZERNY.

Laje	τ_{rd} (kN/cm ²)	$\rho_{1,x}$	$\rho_{1,y}$	k	V_{Sd} (kN/m)	V_{Rd1} (kN/m)	Verificação
L1	0,03206	0,0003	0,0001	1,50	7,26	7,28	OK!
L2	0,03206	0,0004	0,0003	1,50	8,30	7,31	ERRO!
L3	0,03206	0,0005	0,0002	1,50	11,70	7,30	ERRO!
L4	0,03206	0,0002	0,0002	1,50	6,06	7,29	OK!
L5	0,03206	0,0003	0,0002	1,60	7,45	7,81	OK!

Fonte: Autor (2015).

Tabela 40 - Verificação dos esforços cortantes para o método de BARES.

Laje	τ_{rd} (kN/cm ²)	$\rho_{1,x}$	$\rho_{1,y}$	k	V_{Sd} (kN/m)	V_{Rd1} (kN/m)	Verificação
L1	0,03206	0,0031	0,0016	1,50	7,48	7,64	OK!
L2	0,03206	0,0036	0,0027	1,50	8,35	7,89	ERRO!
L3	0,03206	0,0047	0,0020	1,50	11,88	8,40	ERRO!
L4	0,03206	0,0020	0,0007	1,50	5,46	7,41	OK!
L5	0,03206	0,0033	0,0015	1,60	7,48	8,14	OK!

Fonte: Autor (2015).

Observa-se, com os valores obtidos, que há erros quanto à verificação dos esforços cortantes em algumas lajes. Deve-se, quando há erro, calcular armadura de cisalhamento ou redimensionar a seção. Porém, existe armadura de cisalhamento na composição das vigotas treliçadas, que, nesse caso, deve ser considerada, para não seja necessário adicionar armadura de cisalhamento ou alterar a seção.

4.2.3 Momentos Fletores

Os momentos fletores solicitantes para cada método de cálculo estão calculados e mostrados nas Tabelas 41, 42, 43 e 44.

Tabela 41 – Momentos fletores solicitantes característicos das lajes nervuradas para o método de MARCUS em (kN.m/m).

Laje	p (kN/m ²)	m_x	m_y	M_x	M_y
L1	4,47	21,32	27,71	1,53	1,18
L2	6,06	26,37	27,43	2,11	2,03
L3	7,43	20,04	27,90	3,40	2,44
L4	4,47	23,60	27,52	1,26	1,08
L5	4,47	19,17	28,07	1,71	1,16

Fonte: Autor (2015).

Tabela 42 – Momentos fletores solicitantes característicos das lajes nervuradas para o método de CZERNY em (kN.m/m).

Laje	p (kN/m ²)	m_x	m_y	M_x	M_y
L1	4,47	21,55	28,15	1,52	1,16
L2	6,06	25,85	27,45	2,15	2,02
L3	7,43	19,9	28,75	3,42	2,37
L4	4,47	23,45	27,7	1,26	1,07
L5	4,47	18,45	29,5	1,77	1,11

Fonte: Autor (2015).

Tabela 43 – Momentos fletores solicitantes característicos das lajes nervuradas para o método de BARES em (kN.m/m).

Laje	p (kN/m ²)	μ_x	μ_y	M_x	M_y
L1	4,47	5,3	4,25	1,73	1,39
L2	6,06	4,54	4,24	2,52	2,36
L3	7,43	5,57	4,24	3,79	2,89
L4	4,47	4,81	4,26	1,42	1,26
L5	4,47	5,925	4,195	1,94	1,37

Fonte: Autor (2015).

Visando a simplificação do esquema de demonstração da atuação dos momentos fletores solicitantes nas lajes do pavimento, serão demonstrados apenas resultados baseados no método de BARES.

Os momentos fletores solicitantes característicos estão plotados na Figura 34, conforme os valores contidos na Tabela 43.

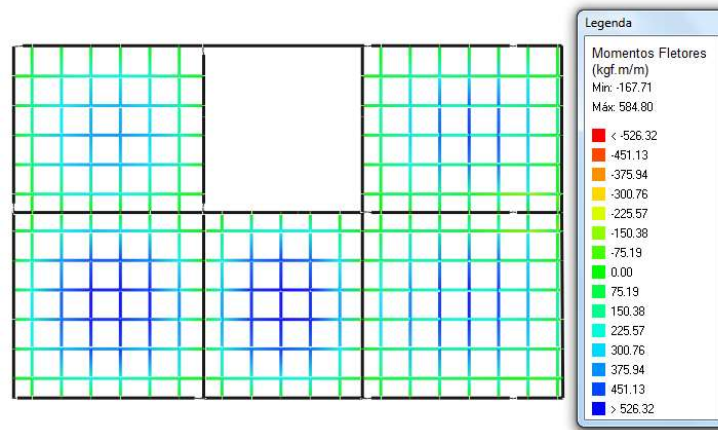
Tabela 44 – Momentos fletores de cálculo das lajes nervuradas pelo software Eberick em (kN.m/m).

Laje	p (kN/m ²)	M_x	M_y
L1	9,00	3,64	3,74
L2	10,59	5,79	5,10
L3	11,96	5,81	5,50
L4	9,00	5,13	2,44
L5	9,00	4,81	2,15

Fonte: Autor (2015).

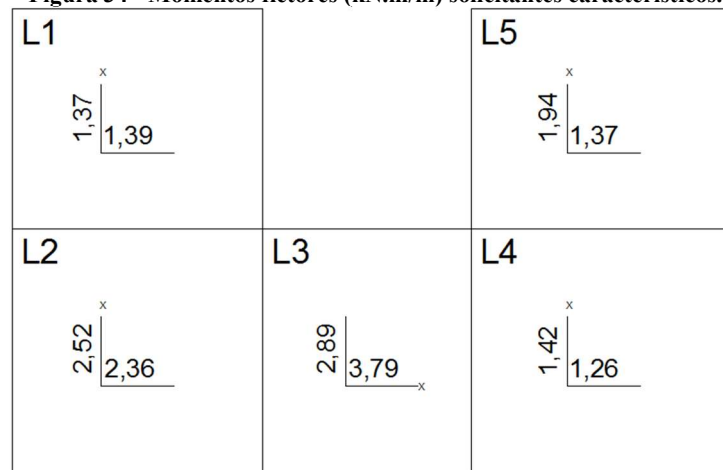
A figura 33, extraída do Eberick simula os momentos fletores atuantes nas lajes de acordo com a legenda.

Figura 33 – Atuação dos momentos fletores nas lajes.



Fonte: Software Eberick (2015).

Figura 34 - Momentos fletores (kN.m/m) solicitantes característicos.



Fonte: Autor (2015).

Tabela 45 - Momentos fletores positivos pelos quatro métodos para lajes nervuradas.

	Marcus		Czerny		Bares		Eberick V8	
Laje	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y
L1	1,12	0,86	1,10	0,85	1,26	1,01	3,64	3,74
L2	1,53	1,47	1,56	1,47	1,84	1,72	5,79	5,10
L3	2,47	1,78	2,49	1,73	2,76	2,10	5,81	5,50
L4	0,91	0,78	0,92	0,78	1,04	0,92	5,13	2,44
L5	1,24	0,85	1,29	0,81	1,41	1,00	4,81	2,15

A análise da Tabela 45 permite observar que os momentos fletores positivos obtidos através da utilização das tabelas possuem uma variação máxima de aproximadamente 19%. Observou-se também, que na grande maioria das lajes, os momentos fletores positivos obtidos com o uso das tabelas de Marcus são menores que os obtidos pelos outros métodos, sendo possível afirmar que este é o método mais desfavorável do ponto de vista da segurança.

Para efeito de comparação, tomaram-se como base os resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha). A Tabela 46 apresenta, em percentual, as diferenças entre os métodos para os momentos fletores positivos, quando comparados aos resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha). A análise deste quadro permite verificar variações de até 82,3 %, no caso do momento na direção x da Laje L4.

Tabela 46 - Diferenças entre os métodos para os momentos fletores positivos para lajes nervuradas.

Laje	Marcus		Czerny		Bares	
	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y
L1	69,2%	77,0%	69,8%	77,3%	65,4%	73,0%
L2	73,6%	71,2%	73,1%	71,2%	68,2%	66,3%
L3	57,5%	67,6%	57,1%	68,5%	52,5%	61,8%
L4	82,3%	68,0%	82,1%	68,0%	79,7%	62,3%
L5	74,2%	60,5%	73,2%	62,3%	70,7%	53,5%

Fonte: Autor (2015).

4.2.4 Dimensionamento das Armaduras Longitudinais

As áreas de armadura mínimas positivas e negativas são dimensionadas do mesmo modo que as lajes maciças (item 2.5.3).

O cálculo das armaduras para lajes nervuradas ocorrem da mesma maneira como visto no item 2.5.4 para as lajes maciças. Desta forma, tem-se:

As armaduras longitudinais calculadas por cada método de cálculo em cada direção estão apresentadas na tabela 45.

As armaduras longitudinais positivas calculadas por cada método de cálculo em cada direção estão apresentadas na Tabela 47.

Tabela 47 – Áreas de armaduras longitudinais de flexão em (cm²/m).

Laje	Marcus		Czerny		Bares		Eberick V8	
	A_x	A_y	A_x	A_y	A_x	A_y	A_x	A_y
L1	0,24	0,19	0,24	0,19	0,28	0,22	0,40	0,34
L2	0,34	0,32	0,34	0,32	0,40	0,38	0,79	0,46
L3	0,57	0,39	0,55	0,38	0,61	0,46	0,53	0,75
L4	0,20	0,17	0,20	0,17	0,23	0,20	0,70	0,28
L5	0,27	0,19	0,28	0,18	0,31	0,22	0,64	0,28
Total	1,62	1,26	1,61	1,24	1,83	1,48	3,06	2,11

Fonte: Autor (2015).

A análise da Tabela 47 permite observar que o consumo de aço devido à atuação dos momentos fletores positivos obtidos através da utilização das tabelas possuem uma variação

máxima de aproximadamente 16,22%. Observou-se também que na grande maioria das lajes, o consumo de aço devido aos momentos positivos obtidos com o uso das tabelas de Czerny é menor que os obtidos pelos outros métodos, sendo possível afirmar que este é o método mais desfavorável do ponto de vista da segurança, embora tenha se assemelhado bastante ao método de Marcus.

Foram somadas as áreas de aço nas direções x e y de cada laje para fins de comparação. Tomaram-se como base os resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha). A Tabela 48 apresenta, em percentual, as diferenças entre os métodos para o consumo de aço devido aos momentos fletores positivos, quando comparados aos resultados obtidos pelo Eberick V8 (analogia de grelha). A análise deste quadro permite verificar variações de até 44,9 %, no consumo total de aço devido a cada momento positivo atuante nas lajes do pavimento.

Tabela 48 - Diferenças entre os métodos para os consumos de aço devido aos momentos positivos para lajes nervuradas.

Lajes	Marcus	Czerny	Bares
Todas as Lajes	44,3%	44,9%	36,0%

Fonte: Autor (2015).

4.2.5 Flechas

A Tabela 49 mostra os valores das flechas totais e admissíveis de cada laje maciça do pavimento exemplo.

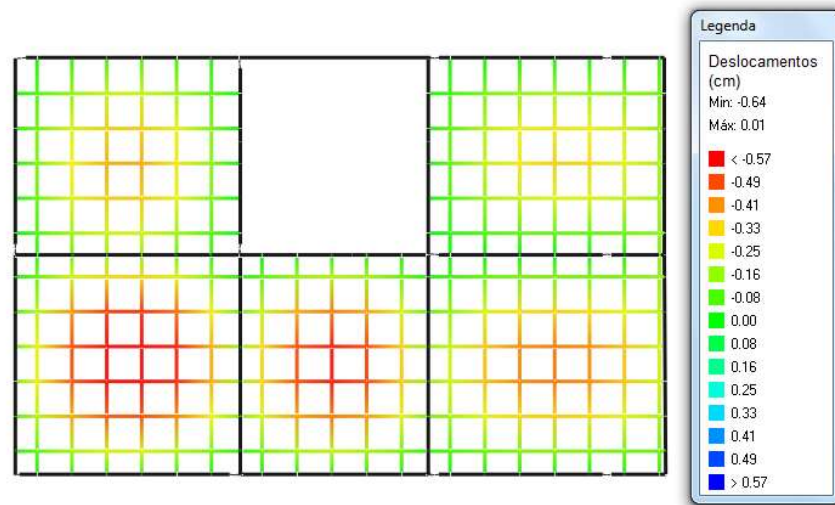
Tabela 49 - Flechas totais e admissíveis por MARCUS, CZERNY, BARES, EBERICK (mm).

Laje	a_t (Marcus / Bares / Czerny)	a_t Eberick	a_{adm}
L1	3,61	5,20	10,8
L2	1,18	15,10	12,1
L3	1,01	13,80	10,3
L4	0,89	6,80	12,1
L5	0,03	4,90	10,79

Fonte: Autor (2015).

A figura 35, extraída do Eberick simula os valores das flechas nas lajes de acordo com a legenda ao lado.

Figura 35 – Ocorrência das flechas nas lajes.



Fonte: Software Eberick (2015).

Na Tabela 49 observa-se que as flechas totais das lajes L2 e L3 utilizando o Eberick encontram-se acima do limite de flecha admissível e, segundo a tabela 13.3 do item 13.3 da ABNT NBR 6118 (2014) para suprir essa deformação pode ser dada uma contraflecha máxima estabelecida.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou verificar se as diferenças eram significativas entre os valores dos momentos fletores para lajes maciças de concreto armado, encontrados com as tabelas de Marcus, de Czerny, de Bares e pelo processo de analogia de grelha através do uso do software Eberick V8. Ao término se conclui que o objetivo principal foi alcançado.

Para as lajes maciças os Métodos de Marcus, Czerny e Bares apresentaram-se muito semelhantes, porém o método de Czerny apresentou-se com os menores valores para os momentos fletores calculados.

As lajes nervuradas se comportaram da mesma maneira que as maciças, de forma que os Métodos de Marcus, Czerny e Bares apresentaram-se muito semelhantes, porém o método de Marcus apresentou-se com os menores valores para os momentos fletores calculados.

Os momentos encontrados pelas tabelas e comparados com os encontrados pelo software Eberick V8, não divergem tanto quando negativos.

A diferença observada nos resultados (momentos fletores, armadura positiva e negativa e flechas) entre os métodos tabelados e a analogia de grelha (Eberick V8) ocorre devido ao fato de que o Eberick analisa o pavimento como um todo, considerando as deformações das vigas e pilares. Já os métodos tabelados consideram que os apoios das lajes são indeslocáveis.

Quanto aos métodos tabelados, estes possuem dificuldades inerentes ao uso de tabelas, pois se deve tomar cuidado na distinção das direções a serem consideradas nas lajes (o que seria direção x e direção y), de maneira que não haja confusão por parte do calculista. No entanto, ainda pode-se afirmar que o dimensionamento de lajes de concreto armado através da utilização das tabelas é muito útil para uma análise inicial ou ainda um pré-dimensionamento, porém sempre que possível se deve buscar processos de cálculo mais sofisticados e precisos.

Sugestões de estudos para continuidade da pesquisa:

- Realizar um estudo comparativo entre softwares de análise estrutural;
- Utilizar para o processo de analogia de grelha outros softwares compatíveis.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**, NBR 8681, Rio de Janeiro, ABNT, 2003, 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios – Procedimento**, NBR 2007, Rio de Janeiro, ABNT, 2007, 99p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas para o cálculo das edificações**, NBR 6120, Rio de Janeiro, ABNT, 1980,6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Laje pré-fabricada – Requisitos – Parte 1: Lajes bidirecionais**, NBR 14859-1, Rio de Janeiro, ABNT, 2002, 15p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Laje pré-fabricada – Pré-laje – Requisitos - Parte 1: Lajes unidirecionais**, NBR 14860-1, Rio de Janeiro, ABNT, 2002, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Laje pré-fabricada – Requisitos – Parte 2: Lajes bidirecionais**, NBR 14859-2, Rio de Janeiro, ABNT, 2002, 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Laje pré-fabricada – Pré-laje – Requisitos - Parte 2: Lajes unidirecionais**, NBR 14860-2, Rio de Janeiro, ABNT, 2002, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, NBR 6118, Rio de Janeiro, ABNT, 2014, 256p.
- BASTOS, P. S. S. **Lajes de Concreto**. Bauru, Faculdade de Engenharia de Bauru – USP, Departamento de Engenharia Civil, 2005, 132p.
- FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2013.
- JUNIOR, F. M. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Vitória, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Departamento de Engenharia Civil, 2010, 113p.
- LOPES, A. F. O. **Estudo técnico comparativo entre lajes maciças e nervuradas com diferentes tipos de materiais de enchimento**. 2012. 131f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.
- MIRANDA, Daniel Teodoro. **Laje treliçada com EPS**. São Paulo. Disponível em: <<http://lajestrelica.blogspot.com.br/p/nosso-produtos.html>>. Acesso em: 12 jul. 2015.
- SILVA, L. P. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas e maciças em função dos vãos entre apoios**. 2010. 99f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SIMON, P. R. **Comparação de métodos de cálculo analíticos e aproximados de lajes bi-dimensionais**. 2006. 81f. Trabalho de Estágio Supervisionado II (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Comunitária Regional de Chapecó, Chapecó.

SZILARD, R. 2004 - Theories and applications of plate analysis: classical, numerical and engineering methods. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2004.

ZENZEN, A. Comparação de métodos de cálculo para determinação dos momentos fletores em lajes de concreto armado. 2012. 92f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Regional Do Noroeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul, Ijuí.