



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE - CCTS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

THALES DA SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE LAJES
MACIÇAS E PRÉ-FABRICADAS TRELIÇADAS: CUSTOS E CONSUMO DE
MATERIAIS**

**ARARUNA - PB
2017**

THALES DA SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE LAJES
MACIÇAS E PRÉ-FABRICADAS TRELIÇADAS: CUSTOS E CONSUMO DE
MATERIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Paraíba.

Área de concentração: Estruturas, construção civil.

Orientador: Prof. Me. Leonardo Medeiros da Costa.

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

R484a Ribeiro, Thales da Silva.

Análise comparativa entre sistemas estruturais de lajes maciças e pré-fabricadas treliçadas: custos e consumo de materiais [manuscrito] : / Thales da Silva Ribeiro. - 2017.
77 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2017.

"Orientação : Prof. Me. Leonardo Medeiros da Costa ,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Lajes maciças. 2. Lajes Pré-fabricadas treliçadas. 3.
Custos. 4. Comparativos.

21. ed. CDD 624

THALES DA SILVA RIBEIRO

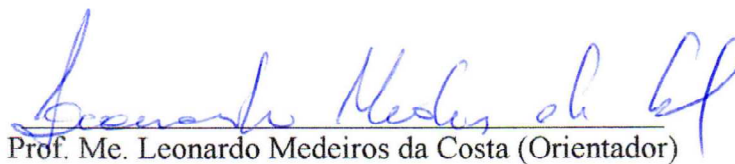
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE LAJES MACIÇAS
E PRÉ-FABRICADAS TRELIÇADAS: CUSTOS E CONSUMO DE MATERIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual da Paraíba como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade Estadual da Paraíba.

Área de concentração: Estruturas, construção
civil.

Aprovada em: 14/12/2017.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Leonardo Medeiros da Costa (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Marinaldo dos Santos Júnior
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Pedro Filipe de Luna Cunha
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos meus pais, Israel Rodrigues Ribeiro e Maria de Fátima da Silva Ribeiro, que sempre me apoiaram e me concederam uma educação de qualidade; a Deus que além de suprir todas as necessidades, esteve sempre perto ajudando em todas as dificuldades, cuidando do corpo, mente e espírito, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me concedeu sabedoria desde a escolha do curso, passando por todas as dificuldades, até aqui me ajudou e não deixou faltar coisa alguma. Que esteve presente tanto nos dias bons, quanto nos dias de angústia em que me dava força e paz para seguir adiante e não desistir porque Ele sempre estava comigo.

Ao meu pai, Israel Rodrigues Ribeiro, que sempre procurou dar a seus filhos o melhor, ensinando o caminho por onde devemos andar. Que se desloca semanalmente 800 quilômetros a trabalho para que possamos ter o essencial, não deixando nada nos faltar.

A minha mãe, Maria de Fátima da Silva Ribeiro, que mesmo distante não passava um dia sequer sem falar comigo, seja pra saber como estou, seja pra simplesmente ouvir minha voz. Que esperava ansiosamente pelos finais de semana, que era quando eu estava em casa, e fazia aquela comida que somente ela sabe fazer.

Ao meu orientador, Leonardo Medeiros da Costa, que sempre esteve bem presente para dar solução às dúvidas que surgiam; se preocupava com o andamento e estava sempre propondo alternativas para a composição do trabalho.

Aos professores do Curso de Graduação em Engenharia Civil da UEPB, em especial, Valdecir Alves dos Santos e Israel Buriti Galvão, que foram de fundamental importância para o crescimento intelectual no início do curso; Marinaldo dos Santos Júnior, que, por meio de seu esforço e ensino, foi fundamental por minha escolha de seguir a área de estruturas na engenharia civil; Rafael de Brito Cândido Gomes e Laércio Leal dos Santos, que além de professores, foram amigos. Todos contribuíram de certa forma ao longo de cinco anos, por meio das disciplinas, para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos funcionários da UEPB, Joaline Cavalcante e Elisafi Donato, e a minha prima, Gabriela Ribeiro Oliveira, pela presteza e atendimento quando me foi necessário.

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade e apoio, em especial, Paulo César Ferreira Dias Filho e José Livaldo Carvalho por dividir o peso carregado de cada dia e fazendo com que essa amizade perdure mesmo depois da graduação.

De nada adianta ao homem ganhar o mundo inteiro, ter o que o dinheiro possa comprar, construir tudo do nada, se na estrutura, sua base não for alicerçada sobre a rocha, se não tiver os pés no chão e não saber que o que ele faz, o faz para ajudar o seu próximo, mas pensa só em si mesmo, e perder sua alma.

O autor

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa de insumos e custos dos sistemas estruturais de lajes maciças e lajes pré-fabricadas treliçadas, verificando se há mais vantagem de uma em relação à outra a partir de uma determinada área. Além do foco nas lajes, também se levou em conta os elementos estruturais vigas e pilares. Ainda são apresentados conceitos, classificações, vantagens, desvantagens, e como se fazer os cálculos estruturais para o sistema estrutural de lajes maciças e adotando algumas considerações normativas para as lajes pré-fabricadas, obedecendo-se as normas da ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 14859:2002. Para o cálculo estrutural utilizou-se de um software computacional usual no mercado. O software além de fazer todo cálculo estrutural, também forneceu o resumo dos materiais pelo qual se foi possível fazer as tabelas de consumo de materiais dos dois tipos de lajes, fazendo-se um comparativo no final. A partir das tabelas contendo o consumo de materiais e da tabela SINAPI encontrada no site da Caixa Econômica Federal, que fornece os valores médios unitários dos materiais, pode-se analisar os custos tanto dos elementos estruturais isolados vigas, pilares e lajes, quanto dos sistemas no geral. Assim, fazendo-se comparações com os dois modelos de lajes, definiu-se para cada tipo de área estudada qual era o modelo mais vantajoso, chegando a conclusão de que tanto a composição de materiais, quanto os custos são mais vantajosos para o sistema de lajes pré-fabricadas.

Palavras-Chave: Lajes maciças. Lajes Pré-fabricadas treliçadas. Custos. Comparativos.

ABSTRACT

The present paper aims at making a comparative analysis of the inputs and costs of the structural systems of bulk slabs and prefabricated trussed slabs, evaluating if one is more advantageous than the other in a given area. Besides the slabs, it has also been considered the structural elements such as beams and columns. Furthermore, concepts, classifications, advantages and drawbacks have been presented, as well as the structural calculation for each structural system, in compliance with the norms NBR 6118/2014 and NBR 14859/2002. For structural calculation it has been used a software commonly adopted by the market. Besides performing all the necessary calculations, this operating system has also provided a summary of the materials, which enabled the depiction of the material usage charts for both types of slabs, leading to a final comparison. From the material usage charts and the SINAPI table, displayed on Caixa Econômica Federal website, which provides the materials average unit value, it has been possible to analyze the costs of both the entire structural system and its structural elements alone - beams, columns and slabs. Therefore, by comparing both types of slabs, it has been established the most advantageous model for each specific area, reaching the conclusion that both a composition of materials, as well as costs are more than advantageous for the prefabricated system.

Keywords: Bulk slabs. Prefabricated Trussed slabs. Costs. Comparative.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema estrutural	18
Figura 2 – Carregamento das lajes.....	21
Figura 3 – Laje armada em duas direções	22
Figura 4 – Laje armada em uma direção.....	23
Figura 5 – Vão teórico	24
Figura 6 – Momentos fletores nas lajes armadas em uma direção.....	28
Figura 7 – Reações de apoio	30
Figura 8 – Discretização da laje em forma de grelha.....	31
Figura 9 – Altura útil.....	36
Figura 10 – Posicionamento das armaduras de flexão em corte	41
Figura 11 – Detalhamento das armaduras positivas.....	43
Figura 12 – Disposição usual das armaduras de canto	44
Figura 13 – Disposição de armaduras para lajes maciças.....	46
Figura 14 – Concretagem de lajes maciças	46
Figura 15 – Laje pré-fabricada com vigotas treliçadas.....	48
Figura 16 – Elementos de enchimento	49
Figura 17 – Laje treliçada de área 6x6 m ²	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tensão versus deformação para materiais do tipo elástico-linear	19
Gráfico 2 – Comparativo da composição dos custos entre os sistemas estruturais.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de materiais para laje maciça de área 2x2 m ²	56
Tabela 2 – Consumo de materiais para laje maciça de área 2x4 m ²	56
Tabela 3 – Consumo de materiais para laje maciça de área 2x6 m ²	56
Tabela 4 – Consumo de materiais para laje maciça de área 4x4 m ²	57
Tabela 5 – Consumo de materiais para laje maciça de área 4x5 m ²	57
Tabela 6 – Consumo de materiais para laje maciça de área 4x8 m ²	57
Tabela 7 – Consumo de materiais para laje maciça de área 6x6 m ²	57
Tabela 8 – a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 2x2 m ²	58
Tabela 8 – b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 2x2 m ²	58
Tabela 9 – a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 2x4 m ²	58
Tabela 9 – b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 2x4 m ²	58
Tabela 10 – a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 2x6 m ²	58
Tabela 10 – b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 2x6 m ²	58
Tabela 11 – a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 4x4 m ²	59
Tabela 11 – b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 4x4 m ²	59
Tabela 12 – a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 4x5 m ²	59
Tabela 12 – b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 4x5 m ²	59
Tabela 13 – a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 4x8 m ²	59
Tabela 13 – b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 4x8 m ²	59
Tabela 14 – a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 6x6 m ²	60
Tabela 14 – b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 6x6 m ²	60
Tabela 15 – Comparativo do consumo de materiais.....	60
Tabela 16 – Composição dos custos das vigas para diferentes áreas de lajes maciças.....	62
Tabela 17 – Composição dos custos dos pilares para diferentes áreas de lajes maciças.....	65
Tabela 18 – Composição dos custos das lajes maciças para diferentes áreas.....	67
Tabela 19 – Composição dos custos das vigas para diferentes áreas de lajes treliçadas.....	69
Tabela 20 – Composição dos custos dos pilares para área 6x6 m ² de lajes treliçadas.....	71
Tabela 21 – Composição dos custos das lajes treliçadas para diferentes áreas.....	71
Tabela 22 – Comparativo da composição dos custos dos elementos estruturais.....	73
Tabela 23 – Comparativo da composição dos custos entre os sistemas estruturais.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Peso específico dos materiais de construção.....	25
Quadro 2 –	Valores mínimos das cargas verticais.....	26
Quadro 3 –	Coeficiente k.....	29
Quadro 4 –	Equações para reações de apoio.....	30
Quadro 5 –	Classe de agressividade ambiental.....	33
Quadro 6 –	Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto....	34
Quadro 7 –	Cobrimento nominal (cm) das armaduras para concreto armado.....	34
Quadro 8 –	Cobrimento nominal (cm) das armaduras para concreto pré-fabricado.....	35
Quadro 9 –	Abertura limite de fissuras.....	35
Quadro 10 –	Coeficiente de minoração γ_c e γ_s	37
Quadro 11 –	Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas.....	41
Quadro 12 –	Área da seção de armaduras por metro de largura (cm ² /m).....	42
Quadro 13 –	Área da seção de armadura A_s (cm ²).....	43
Quadro 14 –	Dimensões padronizadas dos elementos de enchimento.....	48
Quadro 15 –	Diâmetro nominal mínimo e máximo para lajes pré-fabricadas.....	49
Quadro 16 –	Área mínima e quantidade de armadura de distribuição.....	50
Quadro 17 –	Capa mínima resistente para as alturas totais padronizadas.....	50
Quadro 18 –	Altura total da laje pré-moldada.....	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	SISTEMA ESTRUTURAL	17
3.2	ANÁLISE ESTRUTURAL	18
3.2.1	Análise linear	19
3.3	ELEMENTO ESTRUTURAL – LAJES	21
3.3.1	Classificação das lajes quanto à fabricação	21
3.3.2	Classificação das lajes quanto à armação	22
3.3.2.1	Lajes armadas em duas direções	22
3.3.2.2	Lajes armadas em uma direção	23
3.3.3	Vãos teóricos das lajes	23
3.3.4	Cargas nas lajes	24
3.3.4.1	Cargas permanentes	24
3.3.4.2	Cargas acidentais	26
3.4	CÁLCULO DE LAJES MACIÇAS	27
3.4.1	Cálculo de lajes armadas em uma direção	27
3.4.1.1	Laje apoiada em dois lados	27
3.4.1.2	Laje apoiada em um lado e engastada no outro	28
3.4.1.3	Laje engastada em dois lados	28
3.4.1.4	Laje em balanço	28
3.4.1.5	Cálculo de flecha na laje	29
3.4.1.6	Cálculo das reações de apoio	29
3.4.2	Cálculo de lajes armadas em duas direções	30
3.4.2.1	Analogia de grelha equivalente	30
3.4.3	Critérios de projeto	33
3.4.3.1	Classe de agressividade ambiental	33
3.4.3.2	Qualidade do concreto	34
3.4.3.3	Cobrimento nominal das armaduras	34
3.4.3.4	Aberturas limites de fissuras	35
3.4.3.5	Altura útil	36
3.4.4	Resistências de cálculo	36
3.4.5	Dimensionamento de seções retangulares	38
3.4.5.1	Dimensionamento de seções retangulares com armadura simples	39
3.4.5.2	Dimensionamento de seções retangulares com armadura dupla	39
3.4.6	Cálculo das armaduras de flexão	40
3.4.7	Detalhamento das armaduras de flexão	41
3.5	LAJES MACIÇAS	44
3.5.1	Limites mínimos de espessura	44

3.5.2	Vantagens e desvantagens	45
3.5.2.1	Vantagens	45
3.5.2.2	Desvantagens	45
3.6	LAJES PRÉ-FABRICADAS DO TIPO TRELIÇA	47
3.6.1	Vigotas pré-fabricadas treliçadas	47
3.6.2	Elementos de enchimento	48
3.6.3	Armaduras e aço utilizados	49
3.6.3.1	Armadura longitudinal	49
3.6.3.2	Armadura transversal	49
3.6.3.3	Armadura de distribuição	50
3.6.4	Capa	50
3.6.5	Requisitos gerais	51
3.6.5.1	Alturas padronizadas e intereixos	51
3.6.6	Vantagens e desvantagens	51
3.6.6.1	Vantagens	51
3.6.6.2	Desvantagens	52
4	METODOLOGIA	53
4.1	DESCRICHÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS E MATERIAIS ENVOLVIDOS	53
4.2	DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS, DOS PILARES E LAJES	54
4.3	LEVANTAMENTO DOS CONSUMOS E MATERIAIS	55
4.4	LEVANTAMENTO DOS CUSTOS	55
5	RESULTADOS	56
5.1	CONSUMO DE MATERIAIS	56
5.1.1	Lajes maciças	56
5.1.2	Lajes pré-fabricadas treliçadas	57
5.1.3	Comparativo do consumo de materiais	60
5.2	COMPOSICHÃO DOS CUSTOS	62
5.2.1	Lajes maciças	62
5.2.1.1	Composição dos custos das vigas	62
5.2.1.2	Composição dos custos dos pilares	65
5.2.1.3	Composição dos custos das lajes	67
5.2.2	Lajes treliçadas	69
5.2.2.1	Composição dos custos das vigas	69
5.2.2.2	Composição dos custos dos pilares	71
5.2.2.3	Composição dos custos das lajes	71
5.2.3	Comparativo da composição dos custos	73
5.2.3.1	Comparativo da composição dos custos dos elementos estruturais	73
5.2.3.2	Comparativo da composição dos custos entre os sistemas estruturais	74
6	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Por volta dos anos 80, segundo Bastos (2006), nas construções se priorizava o modelo estrutural de lajes maciças, isso porque era mais conhecido entre os profissionais tanto para o cálculo como para mão de obra. Com o aumento de novas tecnologias e visando sempre a diminuição dos custos, as construções com modelos estruturais de lajes pré-fabricadas foram crescendo no mercado nacional.

Segundo Albuquerque (1999), a evolução da tecnologia da construção e da informática trouxeram grandes benefícios para a construção civil. Com o emprego de concretos mais resistentes, pode-se desenvolver novas opções estruturais de lajes como: pré-fabricadas, nervuradas, maciças e protendidas. A partir disto, cada vez mais softwares de cálculo estrutural foram se desenvolvendo e hoje são de uso comum no mercado, sendo grande auxílio para os calculistas.

Com um maior interesse das empresas em diminuir os desperdícios e custos na construção civil, teve-se um grande aumento do número de construções com modelo estrutural de lajes pré-fabricadas, o que motivou a criação da norma brasileira para lajes pré-fabricadas, a ABNT NBR 14859:2002. Silva (2012) avalia o sistema com elementos pré-fabricados e diz que proporciona bons resultados, ganho de tempo e redução de custos, levando a fazer parte do mercado atual com grande aceitação, mas precisam de mais estudos sobre procedimentos de projeto e execução e ter maior divulgação no meio técnico, principalmente no que se refere à análise estrutural.

Cada tipo de laje tem suas vantagens e desvantagens, logo é de necessária importância se ter conhecimento de ambas e assim fazer uma melhor escolha. Neste trabalho se fará a análise dos sistemas estruturais de lajes maciças e lajes pré-fabricadas treliçadas através de uso de software de cálculo estrutural usual no mercado nacional. Para isso serão feitos comparativos do consumo de materiais e custos de cada sistema, avaliando o mais vantajoso.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é realizar uma análise comparativa de insumos e custos dos sistemas estruturais de lajes maciças e lajes pré-fabricadas treliçadas, visando concluir qual sistema estrutural é mais vantajoso técnica e economicamente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Se fazer conhecido o procedimento de cálculo estrutural dos sistemas de lajes maciças e pré-fabricadas pela revisão bibliográfica;
- Apresentar os resultados comparativos de custos para cada tipo de laje a partir da variação dos vãos;
- Além do foco nas lajes, também verificar os resultados dos elementos estruturais vigas e pilares;
- Apresentar vantagens e desvantagens de cada sistema estrutural.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

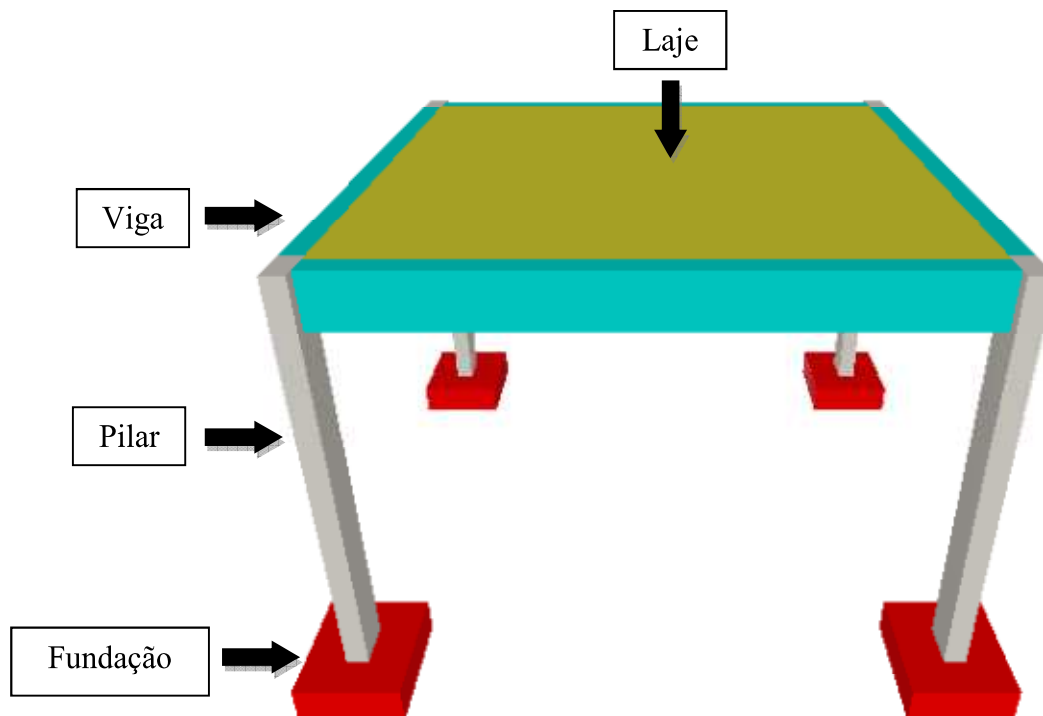
O estudo será disposto de forma a se ter um melhor conhecimento acerca das lajes maciças e pré-fabricada do tipo treliça, facilitando o entendimento dos resultados comparativos estruturais e orçamentais entre ambas.

3.1 SISTEMA ESTRUTURAL

A estrutura de um edifício é composta por diferentes tipos de elementos estruturais, no qual as lajes correspondem a um destes; sendo os outros formados por vigas, pilares, fundações, etc. Assim, o conjunto de todos os elementos com função principal de suportar as cargas em que a edificação está sujeita é chamado de sistema estrutural.

Elementos estruturais são peças, geralmente com uma ou duas dimensões preponderantes sobre as demais (vigas, lajes, pilares, etc.), que compõem uma estrutura. O modo como são arranjados pode ser chamado de **sistema estrutural**. Alguns comportamentos são dependentes apenas desse arranjo, não influenciando o material com que são feitos os elementos. (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014, p. 23, grifo do autor).

Em um modelo estrutural básico das edificações, as lajes tem função de receber as cargas de utilização da edificação (cargas acidentais), aplicadas nos pisos, e junto com seu próprio peso, peso de revestimento e alvenaria sobre laje (cargas permanentes), serão transmitidas às vigas. Da mesma forma, as vigas transmitem as cargas aos pilares, que, por consequentemente, irá transmiti-las as fundações, chegando ao destino final, o solo. Na Figura 1 são mostrados componentes de elementos estruturais, formando um sistema estrutural em concreto armado.

Figura 1 - Sistema estrutural.

Fonte: AUTO QI - EBERICK .

3.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

“A análise estrutural é a previsão do desempenho de uma dada estrutura sob cargas prescritas e/ou outros efeitos externos, como os movimentos dos apoios e as mudanças de temperatura.” (KASSIMALI, 2015, p. 3).

Os efeitos das ações de uma estrutura são determinados pela análise estrutural com o intuito de se fazer verificações dos estados-limites últimos e de serviço, permitindo o estabelecimento das distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamento, seja de uma só parte ou de toda estrutura.

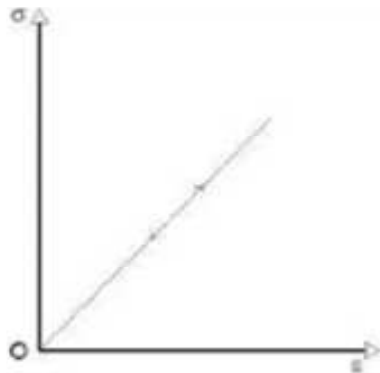
Os tipos de análises estruturais mais usuais e previstos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) são: análise linear, análise linear com redistribuição, análise plástica, análise não linear e análise através de modelos físicos. Para este trabalho, tomou-se como método o da análise linear, pois é o mesmo utilizado pelo software de cálculo estrutural em que se obtiveram os resultados da análise.

3.2.1 Análise linear

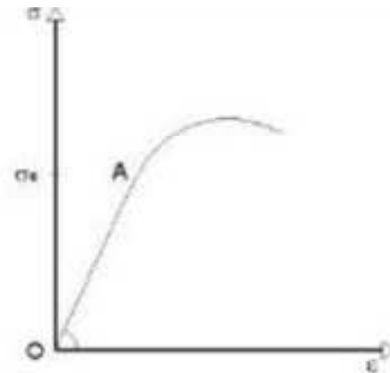
A análise linear considera que os materiais tenham um comportamento elástico-linear. Para que um material se enquadre nesse tipo de comportamento, é necessário que quando submetido a um carregamento, ou a ações externas, que provoque uma deformação, ele tenha capacidade de voltar a sua configuração inicial ao retirar ou aliviar tal carregamento. Se o material voltar exatamente a sua forma inicial ele é chamado de perfeitamente elástico (Gráfico 1-a); se apenas uma parte dele voltar, chama-se parcialmente elástico (Gráfico 1-b).

Gráfico 1 - Tensão versus deformação para materiais do tipo elástico-linear.

a) Perfeitamente elástico.



b) Parcialmente elástico



Fonte: Fontes, 2005.

Cada material possui um chamado módulo de elasticidade, que é uma constante de proporcionalidade responsável pela relação linear das componentes tensão-deformação. Em 1678, o cientista inglês Robert Hooke (1635-1703) ficou conhecido como o primeiro a obter experimentalmente uma relação entre tais componentes, e assim foi dada a equação (1), em sua homenagem, como Lei de Hooke.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

σ - tensão atuante, dado em Pa;

E - módulo de elasticidade longitudinal do material, dado em Pa;

ε - deformação específica longitudinal, adimensional.

O módulo de elasticidade (Equação 2 e 3) e o módulo de deformação secante (Equação 4) são obtidos utilizando as equações disponibilizadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), quando não forem realizados ensaios segundo o método estabelecido na NBR 8522 (ABNT, 2017).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa.} \quad (3)$$

Sendo:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

Onde:

E_{ci} - Módulo de elasticidade;

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

α_E - Constante de elasticidade do material utilizado.

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (4)$$

Sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (5)$$

Onde:

E_{cs} - Módulo de deformação secante;

α_i - Constante dependente do fck.

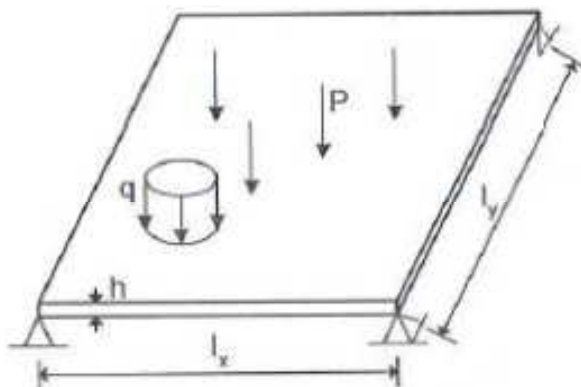
A NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 85) diz que “os resultados de uma análise linear são usualmente empregados para a verificação de estados limites de serviço”. Podendo servir de base para o dimensionamento dos elementos estruturais no estado limite último desde que se garanta uma ductilidade mínima às peças.

3.3 ELEMENTO ESTRUTURAL – LAJES

Além de receber as cargas de utilização das edificações e transmitir às vigas, como já dito, Araújo (2014, p. 1) diz que:

As lajes também servem para distribuir as ações horizontais entre os elementos estruturais de contraventamento, além de funcionarem como mesas de compressão das vigas T; são elementos bidimensionais planos, cuja espessura h é bem inferior às outras duas dimensões (l_x, l_y), e que são solicitadas, predominantemente, por cargas perpendiculares ao seu plano médio, conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 - Carregamento das lajes.



Fonte: Araújo, 2014.

3.3.1 Classificação das lajes quanto à fabricação

As lajes podem ser feitas inteiramente na obra, no qual a armadura é montada e o concreto é lançado no mesmo local. Podem ser do tipo semi-pré-fabricadas, em que as armaduras que irão resistir aos esforços de tração, são executadas em fábricas e transportadas até o local da obra onde será feita a concretagem. E também, as lajes podem ser completamente pré-fabricadas, no qual tanto a armadura quanto o concreto são executados na indústria e depois levados ao destino final da construção.

Em suas notas de aula de Estruturas de Concreto I, o professor Dr. Paulo Bastos (2006) afirma que as lajes maciças de concreto são mais encontradas em construções de grande porte, como escolas, indústrias, hospitais, pontes, etc. Ainda disse que não são comumente aplicadas em construções residenciais e outras de pequeno porte devido a esses tipos de obras serem utilizadas lajes do tipo pré-fabricadas que apresentam vantagens nos aspectos custo e facilidade de construção.

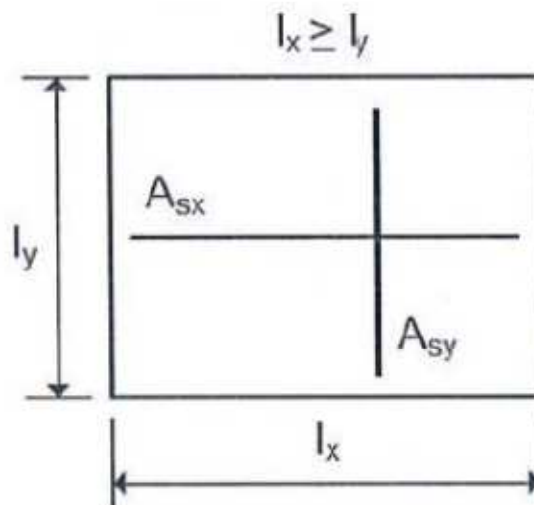
3.3.2 Classificação das lajes quanto à armadura

De acordo com a teoria de flexão de placas, segundo Araújo (2014), o momento fletor solicitante é maior na direção do menor vão da laje. Assim, quando um vão for muito maior que o outro, o momento gerado no vão maior será relativamente pequeno em relação ao de menor vão, a partir disso se classificam as lajes em armadas em duas direções ou armadas em uma direção.

3.3.2.1 Lajes armadas em duas direções

Nas lajes armadas em duas direções, os momentos fletores solicitantes nas duas direções são importantes, devendo-se calcular e dispor as armaduras em ambas às direções. As lajes serão armadas em duas direções quando a divisão do comprimento do vão maior pelo vão menor for menor ou igual a 2, conforme na Figura 3.

Figura 3 - Laje armada em duas direções.



Fonte: Araújo, 2014.

$$\frac{l_x}{l_y} \leq 2 \quad (6)$$

Onde:

l_x - Vão maior;

l_y - vão menor;

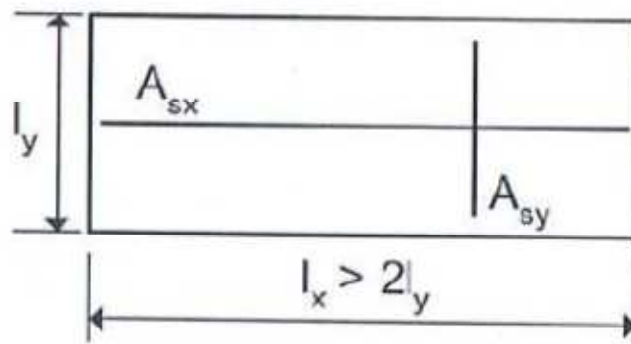
A_{sx} - armadura calculada na direção do vão maior;

A_{sy} - armadura calculada na direção do vão menor.

3.3.2.2 Lajes armadas em uma direção

Nas lajes armadas em uma direção, somente a armadura do vão menor é calculada, isso se dá pelo fato do momento fletor solicitante atuante no vão maior ser pequeno e não sendo necessário o cálculo. No vão maior são colocadas armaduras adotadas pelo projetista estrutural, chamadas de armaduras de distribuição. As lajes serão armadas em uma direção quando o vão maior for pelo menos duas vezes maior que o vão menor, ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Laje armada em uma direção.



Fonte: Araújo, 2014.

Onde:

l_x - Vão maior;

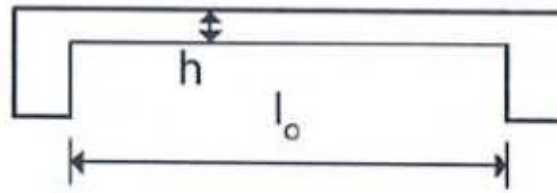
l_y - vão menor;

A_{sx} - Armadura de distribuição na direção do vão maior (adotada);

A_{sy} - Armadura na direção do vão menor (calculada).

3.3.3 Vãos teóricos das lajes

Araújo (2014) diz que vão teórico é a distância entre as faces internas dos apoios (vão livre), acrescido de 60% da espessura da laje, para apoios de mesmas dimensões, ver Figura 5. Para o caso de lajes em balanço, o vão teórico será a distância entre o centro do apoio até a extremidade livre.

Figura 5 - Vão teórico.

Fonte: Araújo, 2014.

$$l = l_0 + 0,6h \quad (7)$$

Onde:

l - Vão teórico;

l_0 - vão livre;

h - espessura da laje.

3.3.4 Cargas nas lajes

As cargas atuantes nas lajes podem ser classificadas de duas formas, as cargas permanentes e as cargas acidentais. As cargas permanentes são aquelas em que em toda vida útil da laje, elas permanecem constantes, ou seja, não há variação considerável de carga. Diferente das cargas permanentes, as cargas acidentais sofrem variações consideráveis durante sua vida útil.

3.3.4.1 Cargas permanentes

As cargas permanentes são formadas pelo peso próprio da estrutura e pelas sobrecargas fixas (revestimentos, alvenarias e enchimentos). Os valores característicos das cargas permanentes são obtidos através dos pesos específicos dos materiais de construção, podendo ser obtidos pela NBR 6120 (ABNT, 1980). São fornecidos valores do peso específico de alguns materiais de construção no Quadro 1. A carga a ser calculada é feita pela multiplicação do peso específico de cada material pela espessura do mesmo, como visto na equação (8).

Quadro 1 - Peso específico dos materiais de construção.

Materiais		Peso específico aparente (kN/m ³)
Rochas	Arenito	26
	Basalto	30
	Gneiss	30
	Granito	28
	Mármore e calcáreo	28
Blocos artificiais	Blocos de argamassa	22
	Cimento amianto	20
	Lajotas cerâmicas	18
	Tijolos furados	13
	Tijolos maciços	18
	Tijolos silico-calcáreos	20
Revestimentos e Concretos	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cimento e areia	21
	Argamassa de gesso	12,5
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25
Madeiras	Pinho, cedro	5
	Louro, imbuia, pau óleo	6,5
	Guajuvira, guatambu, grápia	8
	Angico, cabriúva, ipê róseo	10
Metais	Aço	78,5
	Alumínio e ligas	28
	Bronze	85
	Chumbo	114
	Cobre	89
	Ferro fundido	72,5
	Estanho	74
	Latão	85
	Zinco	72
Materiais Diversos	Alcatrão	12
	Asfalto	13
	Borracha	17
	Papel	15
	Plástico em folhas	21
	Vidro plano	26

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6120, 1980.

$$P = \gamma \times h$$

(8)

Onde:

P - Carga permanente, em kN/m^2 ;

γ - peso específico aparente, em kN/m^3 ;

h - espessura ou altura do material, em m.

3.3.4.2 Cargas acidentais

As cargas acidentais são aquelas que atuam na estrutura a partir do seu uso. São elas: o peso de pessoas, móveis, utensílios, veículos e materiais diversos. A NBR 6120 (ABNT, 1980) também fornece as cargas verticais mínimas a partir de cada cômodo ou local da estrutura, o Quadro 2 dispõe de alguns desses valores.

Quadro 2 - Valores mínimos das cargas verticais.

(Continua)

Local		Carga (kN/m^2)
Arquibancadas		4
Balcões		-
Bancos	Escritórios e banheiros	2
	Salas de diretoria	1,5
Bibliotecas	Sala de leitura	2,5
	Sala de depósito de livros	4
Casas de máquinas		7,5
Cinemas	Plateia com assentos	4
	Banheiro	2
Clubes	Sala de refeições	3
	Sala de assembleia	4
	Salão de danças	5
	Sala de bilhar e banheiro	2
Corredores	Acesso ao público	3

Quadro 2 - Valores mínimos das cargas verticais.
(Conclusão)

Corredores	Sem acesso ao público	2
Escadas	Acesso ao público	3
	Sem acesso ao público	2,5
Escolas		3
Garagens e estacionamentos		3

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6120, 1980.

3.4 CÁLCULO DE LAJES MACIÇAS

3.4.1 Cálculo de lajes armadas em uma direção

Como já visto, para esse tipo de laje, calcula-se somente o momento fletor do vão menor. Araújo (2014, p. 13) diz que “esse cálculo pode ser feito, de maneira simplificada e a favor da segurança, considerando-se uma faixa de largura unitária na direção do vão menor. O momento fletor nessa direção é obtido como para uma viga de largura unitária”. O cálculo desses momentos irá depender das condições de apoio das lajes, dividindo-se em quatro casos: laje apoiada em dois lados; laje apoiada em um lado e engastada no outro; laje engastada em dois lados; e laje em balanço. A Figura 6 ilustra todos os casos de lajes armadas em uma direção.

3.4.1.1 Laje apoiada em dois lados

$$M = \frac{\rho l_x^2}{8} \quad (9)$$

Onde:

M - Momento positivo máximo;

ρ - carga uniformemente distribuída;

l_x^2 - menor vão.

3.4.1.2 Laje apoiada em um lado e engastada no outro

$$M = \frac{pl_x^2}{14,22}; \quad M_e = -\frac{pl_x^2}{8} \quad (10)$$

Onde:

M_e - Momento negativo no engaste.

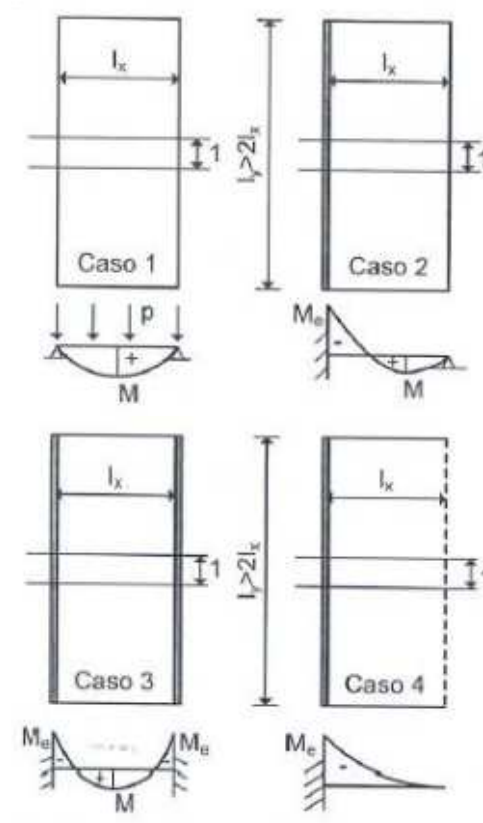
2.4.1.3 Laje engastada em dois lados

$$M = \frac{pl_x^2}{24}; \quad M_e = -\frac{pl_x^2}{12} \quad (11)$$

3.4.1.4 Laje em balanço

$$M_e = -\frac{pl_x^2}{2} \quad (12)$$

Figura 6 - Momentos fletores nas lajes armadas em uma direção.



Fonte: Araújo, 2014.

3.4.1.5 Cálculo de flecha na laje

Da mesma forma que se foi calculado os momentos, como para uma viga de largura unitária e na direção do vão menor, pode-se calcular a flecha.

$$W = \frac{k}{384} \frac{p l_x^4}{D}; \quad (13)$$

$$D = \frac{E_{cs} h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (14)$$

Onde:

W - Flecha;

k - coeficiente dependente da condição de apoio;

D - rigidez à flexão da laje;

E_{cs} - módulo de deformação secante do concreto (Equação 4);

h - espessura da laje;

ν - coeficiente de Poisson, $\nu = 0,2$.

O coeficiente k, necessário para o cálculo da flecha, é dado a partir da condição de apoio da laje em cada caso apresentado. O Quadro 3 mostra os valores desse coeficiente para cada caso e o local onde é aplicada a flecha.

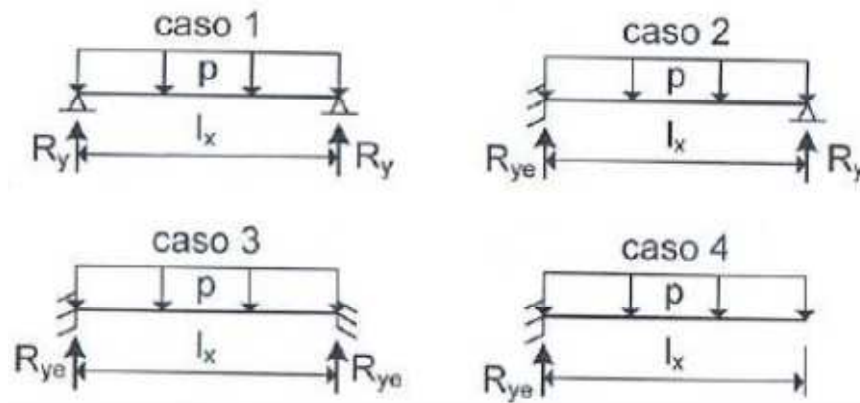
Quadro 3 - Coeficiente k.

Condição de apoio	k	Local
Laje apoiada em dois lados	5	Centro
Laje apoiada em um lado e engastada no outro	2	Centro
Lajes engastada em dois lados	1	Centro
Laje em balanço	48	Extremidade

Fonte: Adaptado de Araújo, 2014.

3.4.1.6 Cálculo das reações de apoio

Da mesma forma que o cálculo dos momentos e da flecha, as reações de apoio também são calculadas levando em consideração uma faixa de largura unitária na direção do vão menor. As reações são indicadas na Figura 7 para cada condição de apoio, e no Quadro 4 se encontram as equações para o cálculo das mesmas.

Figura 7 - Reações de apoio.

Fonte: Araújo, 2014.

Quadro 4 - Equações para reações de apoio.

Laje apoiada em dois lados	Laje apoiada em um lado e engastada no outro	Lajes engastada em dois lados	Laje em balanço
$R_y = \frac{pl_x}{2}$	$R_y = \frac{3pl_x}{8}$	$R_{ye} = \frac{pl_x}{2}$	$R_{ye} = pl_x$
	$R_{ye} = \frac{5pl_x}{8}$		

Fonte: Adaptado de Araújo, 2014.

3.4.2 Cálculo de lajes armadas em duas direções

Como já dito antes, quando a relação entre os vãos for menor que 2, deve-se fazer o cálculo da armadura de flexão para ambos os lados da laje, assim deixando mais complexo de se fazer tais cálculos.

Existem diversos métodos de cálculo como: teoria das Grelhas; teoria das linhas de ruptura; teoria de flexão de placas; método das diferenças finitas; método dos elementos finitos; e analogia da grelha equivalente. Como o software utilizado para se fazer os cálculos da armadura da estrutura faz uso do método da analogia da grelha equivalente, então somente este método será apresentado neste trabalho.

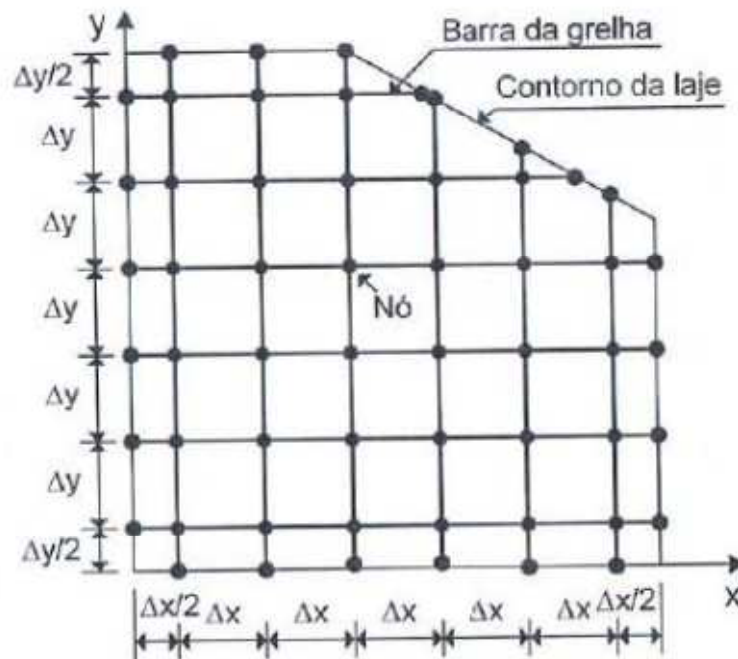
3.4.2.1 Analogia de grelha equivalente

A analogia de grelha é um dos métodos mais utilizados para análise de lajes de concreto armado. Além de sua facilidade de compreensão e utilização, apresenta resultados satisfatórios, fazendo com que seja o método mais implementado nos softwares comerciais.

O procedimento consiste em substituir a laje por uma malha de linhas uniformemente espaçadas, formando uma grelha equivalente, como mostra a Figura 8. Carvalho, Figueiredo Filho e Silva (2003, p. 2) dizem que:

Para analisar um pavimento através do processo de analogia de grelha deve-se dividir as lajes que o compõem em um número adequado de faixas, as quais terão larguras dependentes da geometria e das dimensões do pavimento. Considerando que, assim como as vigas, estas faixas possam ser substituídas por elementos estruturais de barras exatamente nos seus eixos, obtém-se então uma grelha equivalente que passa a representar o pavimento.

Figura 8 - Discretização da laje em forma de grelha.



Fonte: Araújo, 2014.

Quanto aos carregamentos, os mesmos consideram que as cargas distribuídas atuantes no pavimento são divididas entre as barras da grelha equivalente de acordo com a área de influência de cada uma; podendo ser consideradas uniformemente distribuídas ao longo das barras da grelha ou então concentradas nos seus nós. (CARVALHO, FIGUEIREDO FILHO e SILVA 2003, p. 3). A carga uniforme equivalente é dada por:

$$P_{eq} = \frac{(g + q)A}{l_{tot}}, \text{ kN/m} \quad (15)$$

Onde:

g - Carga permanente (kN/m²);

q - carga acidental (kN/m²);

A - área da laje poligonal (m²);

I_{tot} - soma dos comprimentos das barras da grelha (m).

Quanto à rigidez à torção e à flexão, ambas são consideradas como concentradas aos elementos correspondentes da grelha equivalente. Carvalho e Figueiredo Filho (2014, p. 326) afirmam que “cada uma deve ter valor tal que, ao se carregar a estrutura real e a da grelha equivalente, se obtenha o mesmo estado de deformação e os mesmos esforços nas duas estruturas”.

A rigidez à flexão das barras da grelha é dada por:

$$K = \frac{E_{cs} b h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (16)$$

Onde:

E_{cs} - Módulo de deformação secante do concreto (Equação 4);

$b = \Delta x$, quando as barras forem dispostas na direção y ; $b = \Delta y$, quando as barras forem dispostas na direção x .

h - espessura da laje;

ν - coeficiente de Poisson, $\nu = 0,2$.

A rigidez à torção das barras da grelha equivalente é dada por:

$$k_t = \beta(1-\nu)K \quad (17)$$

Onde:

$\beta \leq 1$ é um coeficiente de redução da rigidez à torção.

“Reduzindo-se o valor de β , aumentam-se os momentos fletores e a flecha no centro da laje, devido à redução dos momentos torçores. A forma como as reações de apoio se distribuem também depende do coeficiente β fornecido como dado de entrada do programa.” (ARAÚJO, 2014, p. 119).

Os momentos fletores por unidade de comprimento são obtidos a partir de:

$$M_x = \frac{M_{x0}}{\Delta y}; \quad M_y = \frac{M_{y0}}{\Delta x} \quad (18)$$

Onde:

M_{x0} - Momento fletor nas barras da grelha na direção x;

M_{y0} - momento fletor nas barras da grelha na direção y.

Fazendo-se o uso da analogia de grelha em softwares computacionais, é possível resolver problemas com pavimentos muito grandes de edifícios, contornos não regulares, vazios internos e lajes com e sem vigas, segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

3.4.3 Critérios de projeto

3.4.3.1 Classe de agressividade ambiental

Uma das primeiras providências, e de fundamental importância, na elaboração do projeto estrutural, é conhecer a classe de agressividade ambiental do local onde será construído. A sua importância se dá a partir de que quando conhecida, pode-se definir outros fatores importantes como: a resistência característica do concreto, o cobrimento nominal das armaduras e as aberturas limites das fissuras. Assim, caso haja alguma mudança na classe de agressividade ambiental adotada, todo o dimensionamento dos elementos estruturais serão mudados.

“A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica e da retração hidráulica” (ABNT NBR 6118, 2014, p. 16). Por meio do Quadro 5, disposto abaixo, classifica-se a agressividade a partir de cada tipo de ambiente onde será exposta a estrutura, normatizado pela NBR 6118 (ABNT,2014).

Quadro 5 - Classe de agressividade ambiental.

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118, 2014.

A norma ainda permite que a classificação seja considerada mais agressiva que a estabelecida no Quadro 5, caso se tenha posse dos dados relativos ao ambiente.

3.4.3.2 Qualidade do concreto

Um dos fatores para a qualidade do concreto se dá pela relação água-cimento, pois esta influencia fatores como resistência, durabilidade e retração do concreto. Esta relação cresce com o aumento do volume de água na mistura e quanto maior a relação, maior será porosidade, melhor será a trabalhabilidade, porém menor será a resistência do concreto. A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta valores que devem ser adotados para a relação água-cimento e a classe do concreto em função da classe de agressividade, podendo ser encontrados no Quadro 6.

Quadro 6 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto ^a	Tipo ^{b,c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
^{a.} O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655. ^{b.} CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado. ^{c.} CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118, 2014.

3.4.3.3 Cobrimento nominal das armaduras

Essencial para a durabilidade e bom desempenho das armaduras, o cobrimento nominal é a espessura de concreto entre a armadura e o meio externo, protegendo-as das ações que deterioram o aço como agentes físicos, químicos e mecânicos. Como já dito, o que irá determinar a espessura do cobrimento será a agressividade do meio. O Quadro 7 mostra valores para o cobrimento nominal para concreto armado em função das classes de agressividades.

Quadro 7 - Cobrimento nominal (cm) das armaduras para concreto armado.

Elemento	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Laje	2,0	2,5	3,5	4,5
Viga e pilar	2,5	3,0	4,0	5,0

Fonte: Adaptado de Araújo, 2014.

No caso de elementos estruturais pré-fabricados, os valores relativos ao cobrimento das armaduras são encontrados na NBR 9062 (ABNT, 2001). No Quadro 8 são apresentados valores de cobrimentos nominais para estruturas de elementos pré-fabricados em ambientes não agressivos, no qual tenham resistência característica não inferior a 25 MPa e consumo mínimo de 400 kg de cimento por metro cúbico e fator água-cimento menor ou igual a 0,45.

Quadro 8 - Cobrimento nominal (cm) das armaduras para concreto pré-fabricado.

Tipos de elementos pré-fabricados	Localização	
	No interior de edifícios	Ao ar livre
Lajes, mesas das vias T, placas de vedação não estruturais e elementos construtivos sujeitos a cargas até 3 kN/m ²	1	11,5
Vigas, pilares, arco, nervuras das vigas T e placas de vedação estruturais	1,5	2

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9062, 2001.

Para elementos em meio medianamente agressivo e em meio muito úmido, devem-se usar valores do Quadro 8, acrescidos de 0,5 cm. Para concreto em meio fortemente agressivo, o cobrimento não deve ser menor que 3,5 cm, sendo que para cobrimentos maiores que 6 cm, deve-se colocar uma armadura de pele (ABNT NBR 9062, 2001, p. 30).

3.4.3.4 Aberturas limites de fissuras

Quanto à abertura máxima característica das fissuras, a NBR-6118 (ABNT, 2014, p. 79) diz que “desde que não exceda valores da ordem de 0,2 mm a 0,4 mm, sob ação das combinações frequentes, não tem importância significativa na corrosão das armaduras passivas.” Logo, podem-se adotar os seguintes limites para a abertura das fissuras, em função da classe de agressividade ambiental a partir do Quadro 9.

Quadro 9 - Abertura limite de fissuras.

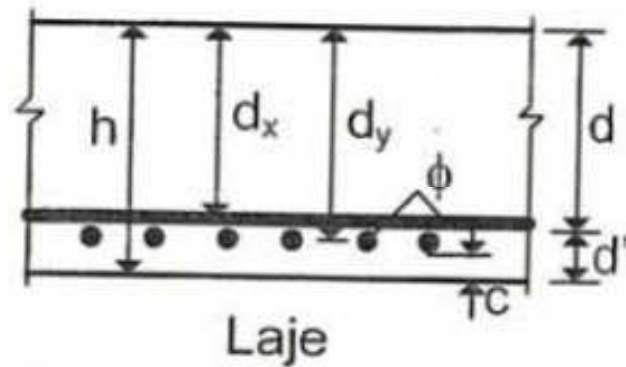
Classe de agressividade	Abertura máxima (mm)
I	0,4
II e III	0,3
IV	0,2

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 6118, 2014.

3.4.3.5 Altura útil

Outro fator importante de projeto é a altura útil, que é dado pela altura total da seção da laje menos o cobrimento nominal e diâmetro médio das armaduras, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Altura útil.



Fonte: Araújo, 2014.

$$d = h - d' \quad (19)$$

$$d' = c + \phi \quad (20)$$

Onde:

- d - Altura útil;
- h - altura total da seção da laje;
- d' - parâmetro de cálculo;
- c - cobrimento nominal;
- ϕ - diâmetro médio das armaduras.

3.4.4 Resistências de cálculo

No concreto, quanto maior o tempo de carregamento para se alcançar a ruptura, menor é sua resistência. Esse fenômeno é conhecido como efeito Rüsçh, que devido à redução da resistência do concreto sob carga de longa duração, deve-se trabalhar com uma resistência de cálculo σ_{cd} , apresentada abaixo.

$$\sigma_{cd} = \alpha_c f_{cd} \quad (21)$$

$$\alpha_c = 0,85, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (22)$$

$$\alpha_c = 0,85 \left[1 - \frac{(f_{ck} - 50)}{200} \right], \text{ se } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (24)$$

Onde:

α_c - Fator corretivo;

f_{cd} - resistência de cálculo à compressão do concreto;

f_{ck} - resistência característica do concreto.

γ_c - coeficiente de minoração da resistência.

A tensão de escoamento de cálculo dos aços, f_{yd} , é dada por:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (25)$$

Onde:

f_{yk} - Tensão de escoamento característica do aço;

γ_s - coeficiente de minoração.

Os coeficientes de minoração são encontrados no Quadro 10, conforme a ABNT NBR 6118:2014.

Quadro 10 - Coeficiente de minoração γ_c e γ_s .

Combinações	Concreto γ_c	Aço γ_s
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118, 2014.

3.4.5 Dimensionamento de seções retangulares

Antes do dimensionamento das armaduras, deve-se saber se o será feito com armadura simples ou com armadura dupla. Para isso se deve fazer o cálculo do momento solicitante reduzido (Equação 26) e do momento limite reduzido (Equação 27), comparando-os no final a fim de se evitar uma ruptura frágil.

$$\mu = \frac{M_d}{bd^2 \sigma_{cd}} \quad (26)$$

$$\mu_{lim} = \lambda \xi_{lim} (1 - 0,5 \lambda \xi_{lim}) \quad (27)$$

$$\lambda = 0,8, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (28)$$

$$\lambda = 0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400}, \text{ se } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (29)$$

$$\xi_{lim} = 0,8\beta - 0,35, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (30)$$

$$\xi_{lim} = 0,8\beta - 0,45, \text{ se } 50 \text{ MPa} < f_{ck} < 90 \text{ MPa} \quad (31)$$

Onde:

M_d - Momento fletor solicitante;

b - largura da seção;

d - altura útil;

σ_{cd} - resistência de cálculo (Equação 21);

λ - parâmetro de cálculo;

ξ_{lim} - profundidade limite relativa da linha neutra;

$\beta \leq 1$ - coeficiente de redistribuição de esforços, onde $\beta = 1$ é considerado sem redistribuição.

Assim, tem-se que:

- se $\mu \leq \mu_{lim}$, o dimensionamento é feito com armadura simples;

- se $\mu > \mu_{lim}$, o dimensionamento é feito com armadura dupla.

3.4.5.1 Dimensionamento de seções retangulares com armadura simples

Para o dimensionamento com armadura simples, a área de aço é dada pela equação abaixo.

$$A_s = \lambda \xi b d \frac{\sigma_{cd}}{f_{yd}} \quad (32)$$

$$\xi = \frac{1 - \sqrt{1 - 2\mu}}{\lambda} \quad (33)$$

Onde:

A_s - Área de aço;

ξ - profundidade relativa da linha neutra.

2.4.5.2 Dimensionamento de seções retangulares com armadura dupla

A fim de se evitar uma ruptura frágil, dimensiona-se uma armadura extra com finalidade principal de se combater esforços de compressão. As áreas de aço, A_s e A'_s , são calculadas de acordo com as equações (34) e (35), respectivamente.

$$A_s = \left(\lambda \xi_{lim} + \frac{\mu - \mu_{lim}}{1 - \delta} \right) \frac{b d \sigma_{cd}}{f_{yd}} \quad (34)$$

$$A'_s = \frac{(\mu - \mu_{lim}) b d \sigma_{cd}}{(1 - \delta) \sigma'_{sd}} \quad (35)$$

$$\delta = \frac{d'}{d} \quad (36)$$

$$\sigma'_{sd} = E_s \varepsilon'_s \leq f_{yd}; \quad \varepsilon'_s = \varepsilon_u \left(\frac{\xi_{lim} - \delta}{\xi_{lim}} \right) \quad (37)$$

$$\varepsilon_u (\%) = 3,5, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}; \quad (38)$$

$$\varepsilon_u (\%) = 2,6 + 35 \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4, \text{ se } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (39)$$

Onde:

A_s - Área de aço da armadura de tração;

A'_s - área de aço da armadura de compressão;

δ - parâmetro geométrico;

σ'_{sd} - tensão na armadura de compressão;

$E_s = 20.000 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do aço);

ε'_s - deformação na armadura de compressão.

3.4.6 Cálculo das armaduras de flexão

Tendo o conhecimento do valor da armadura calculada, devem-se fazer comparações com os valores da armadura máxima (Equação 40) e mínima (Equação 41). Fatores como diâmetro máximo (Equação 42), espaçamento máximo e espaçamento mínimo (Equação 43) das armaduras de flexão também podem ser encontrados através das equações dispostas abaixo.

$$A_{s,m\acute{a}x} = (A_s + A'_s) \leq 4\% A_L \quad (40)$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} 100h \quad (41)$$

$$\phi_{max} \leq \frac{h}{8} \quad (42)$$

$$S_{max} \leq \begin{cases} 2h \\ ou \\ 20cm \end{cases} ; \quad S_{min} \geq \begin{cases} 2cm; \\ \phi_i; \\ 1,2 d_{max,agr.} \end{cases} \quad (43)$$

Onde:

A_L - Área da laje;

ρ_{min} - taxa mínima da armadura de flexão, dada pelo Quadro 11;

h - altura da laje;

S_{max} - espaçamento máximo, deve-se utilizar o menor valor;

S_{\min} - espaçamento mínimo, deve-se utilizar o maior valor;

ϕ_f - diâmetro da armadura de flexão;

$d_{\max,agr.}$ - diâmetro máximo do agregado.

Quadro 11 - Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas.

Forma da seção	Valores de $\rho_{\min} (A_{s,\min} / A_c) \%$														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,15	0,15	0,15	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118, 2014.

3.4.7 Detalhamento das armaduras de flexão

As armaduras podem ser dispostas na laje em sua face inferior, combatendo os momentos positivos; na face superior, nos engastamentos em que são encontrados os momentos negativos; e nos cantos simplesmente apoiados, que irão receber os momentos torçores. A Figura 10 mostra como as armaduras positivas e negativas são posicionadas.

Figura 10 - Posicionamento das armaduras de flexão em corte.



Fonte: Araújo, 2014.

A partir do conhecimento da área da seção da armadura, o professor José Milton de Araújo desenvolveu quadros que podem ser utilizados para o detalhamento de lajes maciças. Tendo-se o valor da área de seção da armadura por metro de largura, o Quadro 12 fornece valores de bitolas e espaçamentos a serem adotados pelo calculista. No Quadro 13, encontra-se o número de barras e espaçamentos a serem adotados a partir da área de seção calculada.

Quadro 12 - Área da seção de armaduras por metro de largura (cm²/m).

espaçamento s (cm)	Bitola ϕ					
	4,2	5	6,3	8	10	12,5
7,0	1,98	2,80	4,45	7,18	11,22	17,53
7,5	1,85	2,62	4,16	6,70	10,47	16,36
8,0	1,73	2,45	3,90	6,28	9,82	15,34
8,5	1,63	2,31	3,67	5,91	9,24	14,44
9,0	1,54	2,18	3,46	5,59	8,73	13,64
9,5	1,46	2,07	3,28	5,29	8,27	12,92
10	1,39	1,96	3,12	5,03	7,85	12,27
11	1,26	1,78	2,83	4,57	7,14	11,16
12	1,15	1,64	2,60	4,19	6,54	10,23
13	1,07	1,51	2,40	3,87	6,04	9,44
14	0,99	1,40	2,23	3,59	5,61	8,77
15	0,92	1,31	2,08	3,35	5,24	8,18
16	0,87	1,23	1,95	3,14	4,91	7,67
17	0,81	1,15	1,83	2,96	4,62	7,22
18	0,77	1,09	1,73	2,79	4,36	6,82
19	0,73	1,03	1,64	2,65	4,13	6,46
20	0,69	0,98	1,56	2,51	3,93	6,14
21	0,66	0,93	1,48	2,39	3,74	5,84
22	0,63	0,89	1,42	2,28	3,57	5,58
23	0,60	0,85	1,36	2,19	3,41	5,34
24	0,58	0,82	1,30	2,09	3,27	5,11
25	0,55	0,79	1,25	2,01	3,14	4,91
26	0,53	0,76	1,20	1,93	3,02	4,72
27	0,51	0,73	1,15	1,86	2,91	4,55
28	0,49	0,70	1,11	1,80	2,80	4,38
29	0,48	0,68	1,07	1,73	2,71	4,23
30	0,46	0,65	1,04	1,68	2,62	4,09

Fonte: Araújo, 2014.

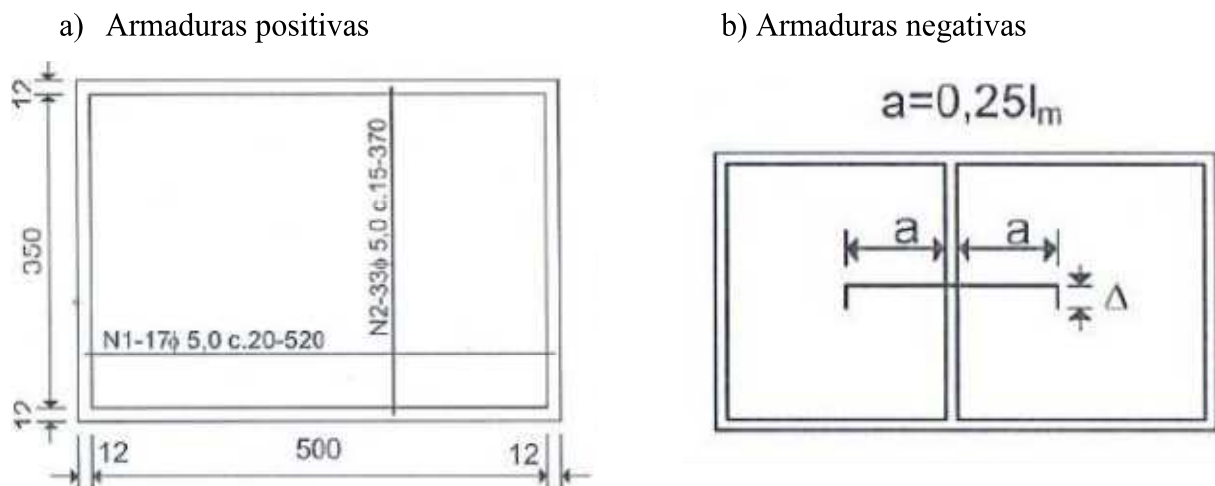
Na Figura 11, são exemplificados os detalhamentos das armaduras positivas e negativas. Na Figura 12 é indicado como é feita a disposição das armaduras de canto.

Quadro 13 - Área da seção de armadura A_s (cm²).

Bitola	Número de barras ou fios						
ϕ	1	2	3	4	5	6	7
3,4	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,64
4,2	0,14	0,28	0,42	0,55	0,69	0,83	0,97
5	0,20	0,39	0,59	0,79	0,98	1,18	1,37
6,3	0,31	0,62	0,94	1,25	1,56	1,87	2,18
8	0,50	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52
10	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50
12,5	1,23	2,45	3,68	4,91	6,14	7,36	8,59
16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07
20	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99
22	3,80	7,60	11,40	15,21	19,01	22,81	26,61
25	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36
32	8,04	16,08	24,13	32,17	40,21	48,25	56,30

Bitola	Número de barras ou fios						
ϕ	8	9	10	11	12	13	14
3,4	0,73	0,82	0,91	1,00	1,09	1,13	1,27
4,2	1,11	1,25	1,39	1,52	1,66	1,80	1,94
5	1,57	1,77	1,96	2,16	2,36	2,55	2,75
6,3	2,49	2,81	3,12	3,43	3,74	4,05	4,36
8	4,02	4,52	5,03	5,53	6,03	6,53	7,04
10	6,28	7,07	7,85	8,64	9,42	10,21	11,00
12,5	9,82	11,04	12,27	13,50	14,73	15,95	17,18
16	16,08	18,10	20,11	22,12	24,13	26,14	28,15
20	25,13	28,27	31,42	34,56	37,70	40,84	43,98
22	30,41	34,21	38,01	41,81	45,62	49,42	53,22
25	39,27	44,18	49,09	54,00	58,90	63,81	68,72
32	64,34	72,38	80,42	88,47	96,51	104,6	112,6

Fonte: Araújo, 2014.

Figura 11 - Detalhamento das armaduras positivas.

Fonte: Araújo, 2014.

$$\Delta = h - (2c + \phi) \quad (44)$$

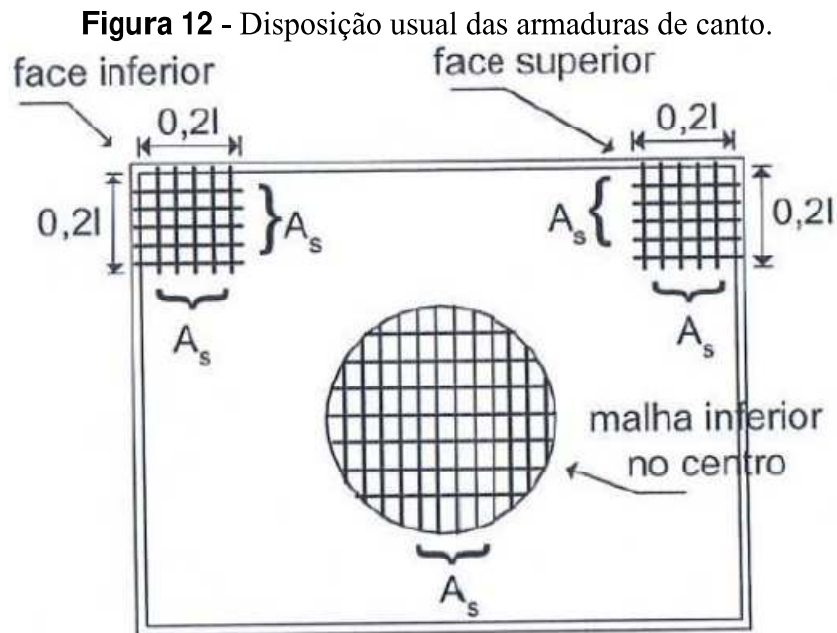
Onde:

l_m - O maior dos vãos menores das lajes contíguas;

c - cobrimento nominal;

h - altura total da seção da laje;

ϕ - diâmetro das barras.



Fonte: Araújo, 2014.

Onde:

l - vão menor;

A_s - maior armadura no centro.

3.5 LAJES MACIÇAS

São lajes de concreto armado executadas totalmente na obra, formadas por placas de espessura uniforme apoiadas nas bordas. Um dos tipos mais comuns de lajes, Bastos define laje maciça como “um termo que se usa para as lajes sem vazios apoiadas em vigas nas bordas” (BASTOS, 2006, p. 23).

3.5.1 Limites mínimos de espessura

A NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 74) diz os limites mínimos para a espessura das lajes maciças que devem ser seguidos, são eles:

- a) 7 cm para 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, com o mínimo de $\frac{l}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{l}{50}$ para lajes de pisos contínuas.
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes cogumelo, fora do capitel.

3.5.2 Vantagens e desvantagens

A laje maciça apresenta uma série de vantagens e desvantagens, no qual serão apresentadas algumas delas logo abaixo.

3.5.2.1 Vantagens

- I. Garante boa rigidez à estrutura devido à existência de muitas vigas;
- II. Facilidade de lançamento e adensamento do concreto;
- III. Fácil acesso a mão de obra qualificada, devido a ser um sistema comumente utilizado.
- IV. Não necessita de área para depósito de material inerte;
- V. Possibilidade de descontinuidade na superfície, podendo ser executado em partes;
- VI. Menos suscetível a fissuras e trincas, formando um bloco que se dilate e contrai de forma uniforme;
- VII. Bom isolamento acústico.

3.5.2.2 Desvantagens

- I. Grande consumo de fôrmas e escoramento;
- II. Tempo de execução de fôrmas demorado;
- III. Tempo para retirada das formas e escoramento demorado, em média de 28 dias, dificultando sua reutilização rápida, segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004);
- IV. Grande consumo de concreto e aço em vãos muito grandes, gerando elevados custos.

- V. Aumento significativo do peso da estrutura, que resultará em maiores esforços nos apoios e para a fundação.
- VI. Maior necessidade de profissionais específicos como: armador, carpinteiro, pedreiro e servente.

A Figura 13 mostra como são dispostas as armaduras em lajes maciças. Na Figura 14 mostra uma execução de concretagem.

Figura 13 - Disposição de armaduras para lajes maciças.



Fonte: Caio, 2014.

Figura 14 - Concretagem de lajes maciças.



Fonte: Cruz, 2015.

3.6 LAJES PRÉ-FABRICADAS DO TIPO TRELIÇA

Diferente da laje maciça em que a execução é feita toda no local onde será construído, nas lajes pré-fabricadas alguns elementos como as vigotas e os elementos de enchimento são fabricados fora do local definitivo da estrutura, sendo somente a capa de concreto feita no local da obra.

Segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2002, p. 2) as vigotas pré-fabricadas são constituídas por concreto estrutural, englobando totalmente ou parcialmente a armadura inferior de tração, integrando parcialmente a seção de concreto da nervura longitudinal. Também podem ser de três tipos diferentes: concreto armado, concreto protendido ou treliçadas; como já dito, o estudo será feito para o tipo treliçadas, devido a ser um tipo muito usual nas edificações.

As lajes pré-fabricadas ainda podem ser classificadas em unidirecionais, “constituída por nervuras principais longitudinais dispostas em uma única direção”(ABNT NBR 14859-1, 2002, p. 2) ou bidirecionais, “constituída por nervuras principais nas duas direções” (ABNT NBR 14859-2, 2002, p. 2). O cálculo de esforços solicitantes das nervuras e o dimensionamento das lajes (vãos, cargas, dimensões, armaduras e materiais complementares) são elaborados de acordo com as normas ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 9062:2001.

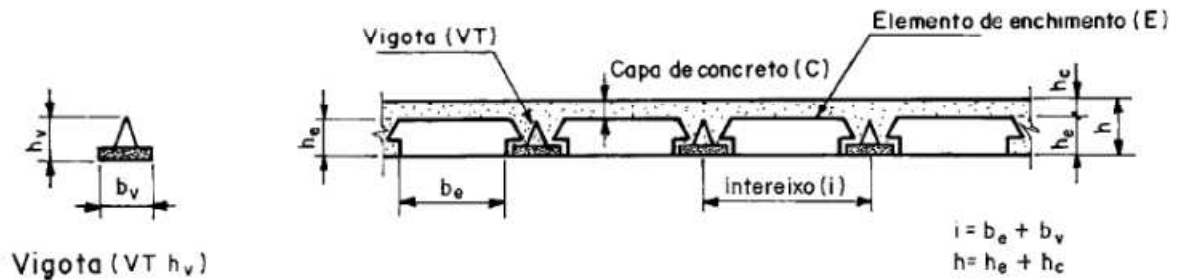
3.6.1 Vigotas pré-fabricadas treliçadas

“Com seção de concreto formando uma placa, com armadura treliçada parcialmente englobada pelo concreto da vigota. Quando necessário, deverá ser complementada com armadura passiva inferior de tração (fat) totalmente englobada pelo concreto da nervura” (ABNT NBR 14859-1, 2002, p. 2).

Segundo Silva (2012, p. 25), as armaduras do banzo inferior da treliça tem função de resistir aos esforços de tração, enquanto que a armadura do banzo superior resiste aos esforços de compressão. Por sua vez, as diagonais da armadura deixam o conjunto mais rígido e facilitam as condições de transporte e manuseio. A Figura 15 apresenta os elementos e como são dispostos para formarem o sistema de lajes pré-fabricadas.

A NBR 14859-1 (ABNT, 2002, p. 9) ainda diz que “as vigotas devem ter uma largura mínima tal que permita, quando montadas em conjunto com os elementos de enchimento, a execução das nervuras de concreto complementar com largura mínima de 4,0 cm.”

Figura 15 - Laje pré-fabricada com vigotas treliçadas.



Fonte: ABNT NBR 14859, 2002.

3.6.2 Elementos de enchimento

São formados por material inerte, como tijolos cerâmicos e EPS, maciços ou vazados, intercalados entre as vigotas, como visto na Figura 15. Tem como função reduzir o volume de concreto, o peso próprio da laje e servir como fôrma para a capa de concreto.

Os elementos de enchimento têm dimensões padronizadas conforme o Quadro 14. Devem ter resistência característica à carga mínima de ruptura de 1,0 kN, para que possam suportar esforços de trabalho durante a montagem e concretagem da laje.

Quadro 14 - Dimensões padronizadas dos elementos de enchimento.

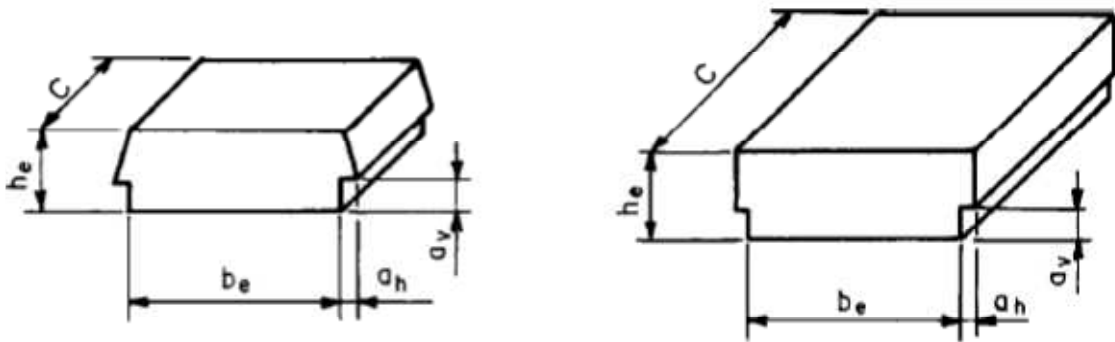
Dimensões em centímetros

Altura (h_e) nominal	7 (mínima); 8; 9,5; 11,5; 15,5; 19,5; 23,5; 28,5	
Largura (b_e) nominal	25 (mínima); 30; 32; 37; 39; 40; 47; 50	
Comprimento (c) nominal	20 (mínimo); 25	
Abas de encaixe	(av)	3
	(ah)	1,5

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14859-1, 2002.

“A face inferior deve ser plana e as laterais devem apresentar abas de encaixe para apoio nas vigotas, bem como estar isenta de partes quebradas e trincas que comprometam seu desempenho ou que comprometam a fuga do concreto complementar (capa e nervuras)” (ABNT NBR 14859-1, 2002, p. 6). A Figura 16 ilustra como devem ser os elementos de enchimento.

Figura 16 - Elementos de enchimento.



Fonte: ABNT NBR 14859-1, 2002.

3.6.3 Armaduras e aço utilizados

3.6.3.1 Armadura longitudinal

São distribuídas uniformemente pelas vigotas, mantendo pelo menos 50% da seção da armadura até os apoios, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). O Quadro 15 dispõe do diâmetro nominal mínimo e máximo para armaduras treliçadas. A NBR 14859-1 (ABNT, 2002) ainda permite que outras dimensões, abaixo da mínima, possam ser usadas, mediante acordo entre fornecedor e comprador.

Quadro 15 - Diâmetro nominal mínimo e máximo para lajes pré-fabricadas.

Produto	Norma	Diâmetro nominal mínimo (mm)	Diâmetro nominal máximo (mm)
Armadura treliçada eletrossoldada	ABNT NBR 14862:2002	Diagonal: 3,4 Banzo superior: 6,0 Banzo inferior: 4,2	Diagonal: 7,0 Banzo superior: 12,5 Banzo inferior: 12,5

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14859-1, 2002.

3.6.3.2 Armadura transversal

São dispostas ao longo das nervuras transversais da laje, formando a armadura inferior de tração com direção perpendicular às vigotas treliçadas.

A NBR 14859-2 (ABNT, 2002, p. 2) fala que para lajes bidirecionais, as armaduras podem ser calculadas como armadas em duas direções, desde que o entreixo das nervuras longitudinais e transversais não superem 105 cm; caso somente o entreixo das nervuras transversais superem 105 cm, a laje é calculada como unidirecional, apoiada em dois lados; quando os dois entreixos superam 105 cm, a estrutura será calculada como grelha ou como um conjunto de vigas isoladas.

3.6.3.3 Armadura de distribuição

São posicionadas na capa nas direções transversal e longitudinal, quando há necessidade delas para distribuição de tensões advindas de cargas concentradas e para controle de fissuração. O Quadro 16 determina os valores de área mínima e quantidade de armaduras de distribuição para cada tipo de aço utilizado.

Quadro 16 - Área mínima e quantidade de armadura de distribuição.

Aço	Área mínima	Número de barras/m	
		Ø 5,0 mm	Ø 6,3 mm
CA 25	0,9 cm ² /m	5	3
CA 50, CA 60 e tela soldada	0,6 cm ² /m	3	3

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14859-1, 2002.

3.6.4 Capa

Constitui a placa superior da laje de espessura medida a partir da face superior do elemento de enchimento. Formada por concreto complementar, deve ser considerada como parte resistente se a sua espessura for no mínimo 3 cm. O Quadro 17 diz a espessura mínima que deve ser adotada para a capa resistente de acordo com altura total da laje.

Quadro 17 - Capa mínima resistente para as alturas totais padronizadas.

Dimensões em centímetros														
Altura total da laje	10	11	12	13	14	16	17	20	21	24	25	29	30	34
Espessura mínima da capa resistente	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14859-1, 2002.

3.6.5 Requisitos gerais

3.6.5.1 Alturas padronizadas e intereixo

A altura total da laje varia de acordo com a altura do elemento de enchimento, conforme o Quadro 18.

Quadro 18 - Altura total da laje pré-moldada.

Dimensões em centímetros	
Altura do elemento de enchimento (h_e)	Altura total da laje (h)
7,0	10,0 ; 11,0 ; 12,0
8,0	11,0 ; 12,0 ; 13,0
10,0	14,0 ; 15,0
12,0	16,0 ; 17,0
16,0	20,0 ; 21,0
20,0	24,0 ; 25,0
24,0	29,0 ; 30,0
29,0	34,0 ; 35,0

Fonte: ABNT NBR 14859-1, 2002.

Para vigotas treliçadas, a NBR 14859-1 (ABNT, 2002) determina que o intereixo mínimo padrão seja de 42 cm, exceto quando a altura total da laje for menor ou igual a 13 cm, podendo ser adotado intereixo mínimo de 40 cm.

3.6.6 Vantagens e desvantagens

3.6.6.1 Vantagens

- I. Facilidade de transporte e manuseio, devido ao formato e a leveza das vigotas;
- II. Menos fissuras devido a boa aderência entre o concreto da base da vigota e o concreto da capa;

- III. Não necessita de formas, já que são substituídas pelas vigotas e os blocos de enchimento, diminuindo o consumo de concreto;
- IV. As instalações elétricas podem ser embutidas entre a capa de concreto e a base da vigota;

3.6.6.2 Desvantagens

- I. Problemas futuros devido à má qualidade das vigotas que não respeitam os padrões estabelecidos por norma, ou armazenamento inadequado das treliças; falta de cuidados no transporte e estocagem;
- II. Falta de profissionais especializados para cálculo e execução de lajes pré-moldadas;
- III. Problemas de quebra ou trinca do elemento de enchimento no momento da concretagem.
- IV. Maior facilidade de aparecer trincas e fissuras no acabamento.

4 METODOLOGIA

Para os sistemas estruturais, manteve-se o mesmo carregamento atuando nas lajes, variando-se as dimensões e assim feitas as verificações de dimensionamento. Para determinados vãos das lajes, os elementos não atendiam os requisitos de norma para os Estados Limites Últimos (ELU), precisando incluir novos elementos e/ou aumentar as dimensões. Foram atendidas as normas para os Estados Limites de Serviço (ELS).

O trabalho delimita-se ao estudo de lajes maciças e treliçadas retangulares e quadráticas, com dimensões de áreas de lajes variadas, ficando limitado a seguinte questão:

- I. Ficou limitado somente ao cálculo da quantidade e do custo do volume de concreto, peso do aço, área de forma, vigotas e lajotas pré-moldadas para lajes, vigas e pilares, dispensando-se as fundações, mão de obra, tempo de execução, transporte, etc.

4.1 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS E MATERIAIS ENVOLVIDOS

A classe de agressividade ambiental escolhida foi a do tipo II, moderada para ambiente urbano, onde o risco de deterioração da estrutura é considerado pequeno segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). Para essa classe de agressividade, o revestimento nominal utilizado nas lajes maciças foi de 2,5 cm, e de 1,5 cm para lajes pré-fabricadas. Para as vigas e pilares se utilizou revestimento nominal de 3 cm.

A classe de resistência característica do concreto à compressão utilizada foi a C35, pois tem menor porosidade, diminuindo o número de vazios, dando uma maior resistência. (concreto com f_{ck} de 35 MPa aos 28 dias de idade).

As cargas e materiais utilizados para o cálculo foram:

- I. Carga acidental: 2 kN/m²;
- II. Carga de revestimento: 1 kN/m²;
- III. Aço CA-50 de diâmetros (mm): 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 22,2; 25,0.
- IV. Aço CA-60 de diâmetros (mm): 4,2; 5,0.
- V. Treliça TR 08644;
- VI. Bloco de enchimento do tipo lajota cerâmica B8/25/20.

4.2 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS, DOS PILARES E LAJES

Para o dimensionamento das lajes, utilizou-se de diferentes áreas para os dois sistemas de lajes, com o intuito de analisar se a partir de uma determinada área seria mais vantajoso um sistema à outro. Para isso, as seguintes áreas de lajes foram calculadas:

- I. Áreas quadráticas (m^2): 2x2; 4x4; 6x6
- II. Áreas retangulares (m^2): 2x4; 2x6; 4x5; 4x8

Os modelos foram feitos inicialmente com todas as lajes simplesmente apoiadas nos bordos, quando foi preciso fazer a divisão das lajes em uma mesma área teve-se que engastar a laje à viga devido ao momento negativo, não se tendo nenhum caso de laje em balanço. As lajes treliçadas foram calculadas de forma unidirecional.

Foi utilizado um software de cálculo estrutural que utiliza a analogia de grelha equivalente, no qual foram dimensionados as lajes, pilares e vigas.

A princípio a espessura utilizada para as lajes maciças foi de 10 cm, e para as lajes treliçadas de 11 cm, alterando-se de acordo com a necessidade requerida pelo programa com o aumento das áreas. Aumentando-se os vãos, para os casos analisados apenas a laje maciça precisou aumentar a espessura, chegando até um valor de 12 cm, altura necessária para que o espaçamento entre as barras não ficasse menor que o permitido; a laje treliçada permaneceu a mesma altura em todos os casos.

Para os pilares, foi mudado o lançamento da estrutura de acordo com o vão, ou seja, aumentou-se a quantidade de pilares e/ou suas dimensões. Começou-se com dimensões de 15x30 cm para os dois sistemas, sendo 4 pilares na estrutura, também sendo redimensionado devido ao espaçamento entre as barras ser menor que o permitido com o aumento da área das lajes. Para o sistema de lajes maciças, chegou-se até um valor de até 30x50 cm, com no máximo 4 pilares; já para o de treliçadas, chegou-se até um valor de 20x45 cm, com no máximo 6 pilares.

Para as vigas, as dimensões iniciais foram de 15x40 cm nos dois sistemas, com 4 vigas. Como nos outros elementos, também foram modificadas, nas quais o problema encontrado foi que a taxa de armadura das barras longitudinais superou o limite que é de 4%, com o aumento da área das lajes. Para as lajes maciças chegaram até um valor de 20x45 cm, com no máximo 4 vigas; já para as treliçadas, também 20x45 cm, sendo que com 5 vigas.

A partir da análise das lajes de área 6x6 m^2 , houve um aumento do número de pilares e vigas para lajes treliçadas, o motivo disso é que a distância do centro de gravidade da

armadura longitudinal até a armadura mais afastada da linha neutra superou 10% da altura da seção da viga, o que não é permitido pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Logo a solução encontrada foi dividir a laje, criando mais uma laje, colocando-se nova viga entre elas, e assim, conseqüentemente, novos pilares. A Figura 17 mostra como ficou a laje após a divisão.

4.3 LEVANTAMENTO DOS CONSUMOS E MATERIAIS

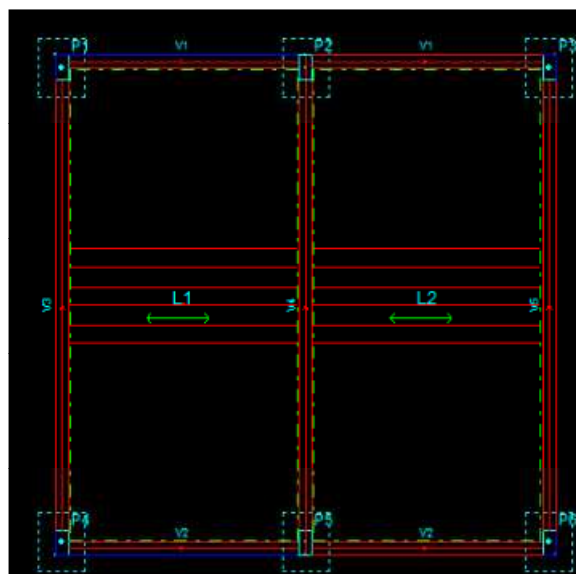
Além de calcular as estruturas, o software utilizado também fornece o resumo de matérias necessário para cada estrutura analisada. A partir do resumo de matérias, pode-se fazer o quantitativo de aço, concreto, formas, treliças e blocos de enchimento.

4.4 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS

Os custos levados em consideração serão somente os dos materiais necessários para a composição dos elementos estruturais vigas, pilares e lajes, de acordo com o levantamento do consumo dos materiais, não sendo calculados os custos com mão de obra, transporte ou custos adicionais.

Os valores dos materiais para a composição de custos foram obtidos através da tabela SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil de Preços de Insumos, disponível no site da Caixa Econômica Federal, no qual é possível obter os preços médios unitários para o estado da Paraíba, referente ao mês de novembro de 2017.

Figura 17 - Laje treliçada de área 6x6 m².



Fonte: AUTO QI - EBERICK

5 RESULTADOS

Dimensionado as estruturas nos dois modelos estruturais de laje com o auxílio de software de cálculo estrutural, serão apresentados os resultados da análise estrutural e de custo dos modelos avaliados na pesquisa.

5.1 CONSUMO DE MATERIAIS

5.1.1 Lajes maciças

As tabelas que serão apresentadas informarão o consumo de aço, concreto e forma dos elementos estruturais analisados para diferentes áreas de laje.

Tabela 1 - Consumo de materiais para laje maciça de área 2x2 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)
Laje maciça 2x2	Vigas	20,1	0,5	7,6
	Pilares	47,2	0,5	10,8
	Lajes	5,9	0,3	2,9
	Total	73,3	1,3	21,3

Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 - Consumo de materiais para laje maciça de área 2x4 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)
Laje maciça 2x4	Vigas	30,4	0,7	11,4
	Pilares	47,2	0,5	10,8
	Lajes	12,6	0,6	6,3
	Total	90,2	1,9	28,5

Fonte: Próprio autor.

Tabela 3 - Consumo de materiais para laje maciça de área 2x6 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)
Laje maciça 2x6	Vigas	41,2	1,0	15,2
	Pilares	64,3	0,5	10,8
	Lajes	18,9	1,0	9,7
	Total	124,5	2,5	35,7

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 - Consumo de materiais para laje maciça de área 4x4 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)
Laje maciça 4x4	Vigas	42,5	1,0	16,1
	Pilares	47,2	0,5	10,8
	Lajes	59,4	1,5	14,8
	Total	149,1	3,0	41,7

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 - Consumo de materiais para laje maciça de área 4x5 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)
Laje maciça 4x5	Vigas	46,9	1,1	17,1
	Pilares	68,4	0,5	10,8
	Lajes	79,8	1,7	17,4
	Total	195,1	3,4	45,3

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 - Consumo de materiais para laje maciça de área 4x8 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)
Laje maciça 4x8	Vigas	101,7	1,4	22,8
	Pilares	189,7	0,6	12,0
	Lajes	175,0	2,9	28,5
	Total	466,5	4,9	63,3

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - Consumo de materiais para laje maciça de área 6x6 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)
Laje maciça 6x6	Vigas	89,1	1,4	22,8
	Pilares	256,0	0,7	13,2
	Lajes	282,2	3,3	32,6
	Total	627,3	5,4	68,6

Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Lajes pré-fabricadas treliçadas

Para as lajes pré-fabricadas, além do consumo de aço, concreto e forma dos elementos estruturais analisados, também foram calculados o peso das treliças e a quantidade de blocos de enchimento para diferentes áreas de laje apresentado nas tabelas abaixo.

Tabela 8 - a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 2x2 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)	Peso treliças (kg)
Laje treliçada 2x2	Vigas	20,1	0,5	7,6	-
	Pilares	47,2	0,5	10,8	-
	Lajes	0,0	0,1	0,0	8,4
	Total	67,4	1,1	18,4	8,4

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 - b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 2x2 m².**Blocos de enchimento**

Descrição	Tipo	Nome	Dimensões (cm)			Quantidade
			hb	Bx	by	
Laje treliçada 2x2	Lajota cerâmica	B8/25/20	8	25	20	40

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 - a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 2x4 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)	Peso treliças (kg)
Laje treliçada 2x4	Vigas	30,4	0,7	11,4	-
	Pilares	47,2	0,5	10,8	-
	Lajes	0,0	0,3	0,0	18,5
	Total	77,6	1,5	22,2	18,5

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 - b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 2x4 m².**Blocos de enchimento**

Descrição	Tipo	Nome	Dimensões (cm)			Quantidade
			hb	Bx	by	
Laje treliçada 2x4	Lajota cerâmica	B8/25/20	8	25	20	80

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 - a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 2x6 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)	Peso treliças (kg)
Laje treliçada 2x6	Vigas	41,1	1,0	15,2	-
	Pilares	64,3	0,5	10,8	-
	Lajes	0,0	0,4	0,0	28,6
	Total	105,4	1,9	26,0	28,6

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 - b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 2x6 m².**Blocos de enchimento**

Descrição	Tipo	Nome	Dimensões (cm)			Quantidade
			hb	Bx	by	
Laje treliçada 2x6	Lajota cerâmica	B8/25/20	8	25	20	128

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 - a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 4x4 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)	Peso treliças (kg)
Laje treliçada 4x4	Vigas	20,1	0,5	7,6	-
	Pilares	47,2	0,5	10,8	-
	Lajes	0,0	0,1	0,0	8,4
	Total	67,4	1,1	18,4	8,4

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 - b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 4x4 m².**Blocos de enchimento**

Descrição	Tipo	Nome	Dimensões (cm)			Quantidade
			hb	bx	by	
Laje treliçada 4x4	Lajota cerâmica	B8/25/20	8	25	20	40

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 - a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 4x5 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)	Peso treliças (kg)
Laje treliçada 4x5	Vigas	49,8	1,1	17,1	-
	Pilares	64,3	0,5	10,8	-
	Lajes	26,1	0,8	0,0	45,4
	Total	140,2	2,4	27,9	45,4

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 - b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 4x5 m².**Blocos de enchimento**

Descrição	Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
			hb	bx	by	
Laje treliçada 4x5	Lajota cerâmica	B8/25/20	8	25	20	252

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 - a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 4x8 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)	Peso treliças (kg)
Laje treliçada 4x8	Vigas	111,8	1,4	22,8	-
	Pilares	189,7	0,6	12,0	-
	Lajes	63,2	1,2	0,0	80,3
	Total	364,7	3,3	34,8	80,3

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 - b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 4x8 m².**Blocos de enchimento**

Descrição	Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
			hb	bx	by	
Laje treliçada 4x8	Lajota cerâmica	B8/25/20	8	25	20	396

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 - a) Consumo de materiais para laje treliçada de área 6x6 m².

Descrição	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)	Peso treliças (kg)
Laje treliçada 6x6	Vigas	99,2	1,8	28,5	-
	Pilares	157,5	0,8	16,2	-
	Lajes	62,8	1,7	0,0	127,6
	Total	319,5	4,3	44,7	127,6

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 - b) Consumo de blocos de enchimento para laje treliçada de área 6x6 m².

Descrição	Tipo	Nome	Blocos de enchimento			Quantidade
			Dimensões(cm) hb	bx	By	
Laje treliçada 6x6	Lajota cerâmica	B8/25/20	8	25	20	312

Fonte: Próprio autor.

5.1.3 Comparativo do consumo de materiais

Com os dados dos materiais encontrados é possível se fazer o comparativo entre os dois sistemas estruturais. Como no sistema de laje maciça não são utilizados vigotas e blocos de enchimento encontrados na laje treliçada, o comparativo só se dará para os demais materiais em comum entre os dois sistemas para diferentes áreas. A Tabela 23 mostra os comparativos entre os dois sistemas analisados.

Tabela 15 - Comparativo do consumo de materiais.

(Continua)

Área da laje (m ²)	Materiais	Laje maciça	Laje treliçada
2x2	Peso do aço +10 % (kg)	73,3	67,4
	Volume de concreto (m ³)	1,3	1,1
	Área de forma (m ²)	21,3	18,4

Tabela 15 - Comparativo do consumo de materiais.

(Continuação)

Área da laje (m²)	Materiais	Laje maciça	Laje treliçada
2x4	Peso do aço +10 % (kg)	90,2	77,6
	Volume de concreto (m ³)	1,9	1,5
	Área de forma (m ²)	28,5	22,2
2x6	Peso do aço +10 % (kg)	124,5	105,4
	Volume de concreto (m ³)	2,5	1,9
	Área de forma (m ²)	35,7	26,0
4x4	Peso do aço +10 % (kg)	149,1	67,4
	Volume de concreto (m ³)	3,0	1,1
	Área de forma (m ²)	41,7	18,4
4x5	Peso do aço +10 % (kg)	195,1	140,2
	Volume de concreto (m ³)	3,4	2,4
	Área de forma (m ²)	45,3	27,9
4x8	Peso do aço +10 % (kg)	466,5	364,7
	Volume de concreto (m ³)	4,9	3,3
	Área de forma (m ²)	63,3	34,8

Tabela 15 - Comparativo do consumo de materiais.

(Conclusão)

Área da laje (m²)	Materiais	Laje maciça	Laje treliçada
	Peso do aço +10 % (kg)	627,3	319,5
6x6	Volume de concreto (m ³)	5,4	4,3
	Área de forma (m ²)	68,6	44,7

Fonte: Próprio autor.

5.2 COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS

Serão apresentadas tabelas com as descrições de insumos com seu preço mediano unitário e o consumo, podendo-se obter o valor total para cada elemento estrutural dos dois sistemas analisados. Por fim, serão feitos comparativos tanto dos elementos estruturais como dos sistemas.

5.2.1 Lajes maciças

5.2.1.1 Composição dos custos das vigas

Tabela 16 - Composição dos custos das vigas para diferentes áreas de lajes maciças.

(Continua)

Área da laje (m²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	14,9	4,94	73,61
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	5,3	4,17	22,10
2x2	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVIÇO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,5	357,05	178,53
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	7,6	36,42	276,79
				Custo total (R\$)	551,02

Tabela 16 - Composição dos custos das vigas para diferentes áreas de lajes maciças.

(Continuação)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
2x4	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	21,8	4,94	107,69
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	8,6	4,17	35,86
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,7	357,05	249,94
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	11,4	36,42	415,19
				Custo total (R\$)	808,68
2x6	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	27,4	4,94	135,36
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	13,8	4,17	57,55
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,0	357,05	357,05
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	15,2	36,42	553,58
				Custo total (R\$)	1.103,54
4x4	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	28,7	4,94	141,78
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	13,8	4,17	57,55
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,0	357,05	357,05
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	16,5	36,42	600,93
				Custo total (R\$)	1157,31

Tabela 16 - Composição dos custos das vigas para diferentes áreas de lajes maciças.

(Continuação)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
4x5	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	30,7	4,94	151,66
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	16,2	4,17	67,55
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,1	357,05	392,76
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	17,1	36,42	622,78
				Custo total (R\$)	1.234,75
4x8	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	12,9	4,94	63,73
	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	67,6	4,20	283,92
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	21,2	4,17	88,40
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,4	357,05	499,87
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	22,8	36,42	830,38
				Custo total (R\$)	1.766,30
6x6	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	34,2	4,94	168,95
	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	33,2	4,20	139,44
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	21,7	4,17	90,49
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,4	357,05	499,87

Tabela 16 - Composição dos custos das vigas para diferentes áreas de lajes maciças.

(Conclusão)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
6x6	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	22,8	36,42	830,38
				Custo total (R\$)	1.729,12

Fonte: adaptado de SINAPI - Caixa Econômica, 2017.

5.2.1.2 Composição dos custos dos pilares

Tabela 17 - Composição dos custos dos pilares para diferentes áreas de lajes maciças.

(Continua)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	34,2	4,2	143,64
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	13,1	4,17	54,63
2x2 2x4 4x4	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,5	357,05	178,53
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	10,8	36,42	393,34
				Custo total (R\$)	770,13
	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	51,3	4,2	215,46
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	13,1	4,17	54,63
2x6 (4x5tr)	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,5	357,05	178,53
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	10,8	36,42	393,34
				Custo total (R\$)	841,95

Tabela 17 - Composição dos custos dos pilares para diferentes áreas de lajes maciças.

(Conclusão)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
4x5	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	51,3	4,2	215,46
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	17,1	4,17	71,31
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,5	357,05	178,53
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	10,8	36,42	393,34
				Custo total (R\$)	858,63
4x8	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	170,9	4,2	717,78
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	18,8	4,17	78,40
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,6	357,05	214,23
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	12,0	36,42	437,04
				Custo total (R\$)	1.447,45
6x6	ACO CA-50, 12,5 MM, VERGALHAO	kg	239,6	4,0	958,4
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	16,4	4,17	68,39
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,7	357,05	249,94
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	13,2	36,42	480,74
				Custo total (R\$)	1.757,47

Fonte: adaptado de SINAPI - Caixa Econômica, 2017.

5.2.1.3 Composição dos custos das lajes

Tabela 18 - Composição dos custos das lajes maciças para diferentes áreas.

(Continua)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
2x2	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	5,9	4,17	24,60
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,3	357,05	107,12
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	2,9	36,42	105,62
				Custo total (R\$)	237,34
2x4	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	12,6	4,17	52,54
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,6	357,05	214,23
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	6,3	36,42	229,45
				Custo total (R\$)	496,22
2x6	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	18,9	4,17	78,81
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,0	357,05	357,05
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	9,7	36,42	353,27
				Custo total (R\$)	789,14
4x4	ACO CA-50, 6,3 MM, VERGALHAO	kg	59,4	4,4	261,36
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,5	357,05	535,58

Tabela 18 - Composição dos custos das lajes maciças para diferentes áreas.

(Continuação)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)	
4x4	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	14,83	36,42	540,11	
					Custo total (R\$)	1337,05
4x5	ACO CA-50, 6,3 MM, VERGALHAO	kg	31,9	4,4	140,36	
	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	47,9	4,94	236,63	
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,7	357,05	606,99	
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	17,4	36,42	633,71	
					Custo total (R\$)	1.617,68
4x8	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	65,5	4,94	323,57	
	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	109,6	4,2	460,32	
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	2,9	357,05	1.035,45	
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	28,5	36,42	1.037,97	
					Custo total (R\$)	2.857,31
6x6	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	123,8	4,94	611,57	
	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	153,1	4,2	643,02	
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	5,4	4,17	22,52	

Tabela 18 - Composição dos custos das lajes maciças para diferentes áreas.

(Conclusão)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
6x6	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVIÇO DE BOMBEAMENTO	m ³	3,3	357,05	1.178,27
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	32,6	36,42	1.187,29
Custo total (R\$)					3.642,67

Fonte: adaptado de SINAPI - Caixa Econômica, 2017.

5.2.2 Lajes treliçadas

5.2.2.1 Composição dos custos das vigas

A composição dos custos das vigas para o sistema estrutural de lajes treliçadas deram resultados iguais aos das lajes maciças para as áreas 2x2, 2x4, 2x6 e 4x4. Para as demais áreas deram resultados diferentes que serão apresentados logo abaixo pela Tabela 27.

Tabela 19 - Composição dos custos das vigas para diferentes áreas de lajes treliçadas.

(Continua)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
4x5	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	22,0	4,94	108,68
	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	13,4	4,2	56,28
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	14,4	4,17	60,05
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVIÇO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,1	357,05	392,76
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	17,1	36,42	622,78
Custo total (R\$)					1.240,55

Tabela 19 - Composição dos custos das vigas para diferentes áreas de lajes treliçadas.

(Conclusão)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
4x8	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	47,8	4,94	236,13
	ACO CA-50, 12,5 MM, VERGALHAO	kg	42,2	4,0	168,8
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	21,7	4,17	90,49
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,4	357,05	499,87
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	22,8	36,42	830,38
				Custo total (R\$)	1.825,67
6x6	ACO CA-50, 6,3 MM, VERGALHAO	kg	0,7	4,4	3,08
	ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	kg	43,2	4,94	213,41
	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	30,3	4,2	127,26
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	25,0	4,17	104,25
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	1,8	357,05	642,69
CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	28,5	36,42	1.037,97	
				Custo total (R\$)	2.128,66

Fonte: adaptado de SINAPI - Caixa Econômica, 2017.

5.2.2.2 Composição dos custos dos pilares

A composição dos custos dos pilares para o sistema estrutural de lajes treliçadas deram resultados iguais aos das lajes maciças para as áreas 2x2, 2x4, 2x6, 4x4, 4x5 e 4x8, sendo a área de 4x5 treliçada igual a 2x6 maciça expressa na Tabela 25 como (4x5tr). Para as demais áreas deram resultados diferentes que serão apresentados logo abaixo pela Tabela 28.

Tabela 20 - Composição dos custos dos pilares para área 6x6 m² de lajes treliçadas.

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
6x6	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	68,4	4,2	287,28
	ACO CA-50, 16,0 MM, VERGALHAO	kg	65,2	4,0	260,8
	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	24,0	4,17	100,08
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,8	357,05	285,64
	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA DE 2,20 x 1,10 M, E = 18 MM	m ²	16,2	36,42	590,00
Custo total (R\$)					1.523,80

Fonte: adaptado de SINAPI - Caixa Econômica, 2017.

5.2.2.3 Composição dos custos das lajes

Tabela 21 - Composição dos custos das lajes treliçadas para diferentes áreas.

(Continua)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
2x2	LAJE PRE-MOLDADA TRELICADA TR8644 (LAJOTAS + VIGOTAS)	m ²	4,0	22,0	88
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,1	357,05	35,71
Custo total (R\$)					123,71

Tabela 21 - Composição dos custos das lajes treliçadas para diferentes áreas.

(Continuação)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
2x4	LAJE PRE-MOLDADA TRELICADA TR8644 (LAJOTAS + VIGOTAS)	m ²	8,0	22,0	176
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,3	357,05	107,12
				Custo total (R\$)	283,12
2x6	LAJE PRE-MOLDADA TRELICADA TR8644 (LAJOTAS + VIGOTAS)	m ²	12,0	22,0	264
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,4	357,05	142,82
				Custo total (R\$)	406,82
4x4	LAJE PRE-MOLDADA TRELICADA TR8644 (LAJOTAS + VIGOTAS)	m ²	16,0	22,0	352
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ³	0,1	357,05	35,71
				Custo total (R\$)	387,71
4x5	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	kg	26,1	4,17	108,84
	LAJE PRE-MOLDADA TRELICADA TR8644 (LAJOTAS + VIGOTAS)	m ²	20,0	22,0	440
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO	m ²	0,8	357,05	285,64
				Custo total (R\$)	834,48
4x8	ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	kg	63,2	4,2	265,44

Tabela 21 - Composição dos custos das lajes treliçadas para diferentes áreas.

(Conclusão)

Área da laje (m ²)	Descrição do insumo	Unidade	Consumo	Preço mediano unitário (R\$)	Preço total (R\$)
4x8	LAJE PRE-MOLDADA TRELICADA TR8644 (LAJOTAS + VIGOTAS)	m ²	32,0	22,0	704
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVIÇO DE BOMBEAMENTO	m ²	1,2	357,05	428,46
				Custo total (R\$)	1.397,90
6x6	ACO CA-60, 4,2 MM, VERGALHAO	kg	62,8	4,17	261,88
	LAJE PRE-MOLDADA TRELICADA TR8644 (LAJOTAS + VIGOTAS)	m ²	36,0	22,0	792
	CONCRETO USINADO, C35, INCLUI SERVIÇO DE BOMBEAMENTO	m ²	1,7	357,05	606,99
				Custo total (R\$)	1.660,86

Fonte: adaptado de SINAPI - Caixa Econômica, 2017.

5.2.3 Comparativo da composição dos custos

5.2.3.1 Comparativo da composição dos custos dos elementos estruturais

Tabela 22 - Comparativo da composição dos custos dos elementos estruturais.

(Continua)

Área da laje (m ²)	Tipo	Vigas	Pilares	Lajes
2x2	Laje maciça	R\$ 551,02	R\$ 770,13	R\$ 237,34
	Laje treliçada	R\$ 551,02	R\$ 770,13	R\$ 123,71
2x4	Laje maciça	R\$ 808,68	R\$ 770,13	R\$ 496,22
	Laje treliçada	R\$ 808,68	R\$ 770,13	R\$ 283,12
2x6	Laje maciça	R\$ 1.103,54	R\$ 841,95	R\$ 789,14
	Laje treliçada	R\$ 1.103,54	R\$ 841,95	R\$ 406,82
4x4	Laje maciça	R\$ 551,02	R\$ 770,13	R\$ 1337,05
	Laje treliçada	R\$ 551,02	R\$ 770,13	R\$ 387,71

Tabela 22 - Comparativo da composição dos custos dos elementos estruturais.

(Conclusão)

Área da laje (m ²)	Tipo	Vigas	Pilares	Lajes
4x5	Laje maciça	R\$ 1.234,75	R\$ 858,63	R\$ 1.617,68
	Laje treliçada	R\$ 1.240,55	R\$ 841,95	R\$ 834,48
4x8	Laje maciça	R\$ 1.766,30	R\$ 1.447,45	R\$ 2.857,31
	Laje treliçada	R\$ 1.825,67	R\$ 1.447,45	R\$ 1.397,90
6x6	Laje maciça	R\$ 1.729,12	R\$ 1.757,47	R\$ 3.642,67
	Laje treliçada	R\$ 2.128,66	R\$ 1.523,80	R\$ 1.660,86

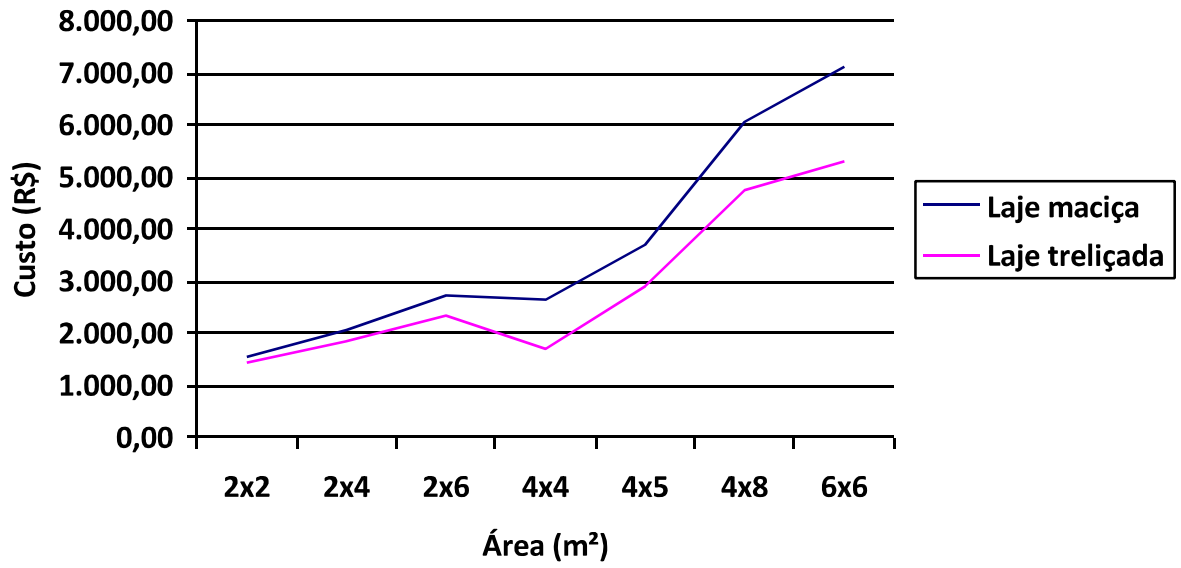
Fonte: Próprio autor.

5.2.3.2 Comparativo da composição dos custos entre os sistemas estruturais

Tabela 23 - Comparativo da composição dos custos entre os sistemas estruturais.

Área da laje (m ²)	Laje maciça	Laje treliçada	Diferença percentual
2x2	R\$ 1.558,49	R\$ 1.444,86	7,3 %
2x4	R\$ 2.075,03	R\$ 1.861,93	10,3 %
2x6	R\$ 2.734,63	R\$ 2.352,31	14 %
4x4	R\$ 2.658,20	R\$ 1.708,86	35,7 %
4x5	R\$ 3.711,06	R\$ 2.916,98	21,4 %
4x8	R\$ 6.071,06	R\$ 4.761,02	21,6 %
6x6	R\$ 7.129,26	R\$ 5.313,32	25,5 %

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 2 - Comparativo da composição dos custos entre os sistemas estruturais

Fonte: Próprio autor.

6 CONCLUSÕES

A partir das comparações realizadas entre os dois sistemas de estruturas com laje maciça e laje pré-fabricada treliçada, pode-se ter algumas noções do melhor modelo a ser escolhido na hora de construir. Deve-se salientar que não se pode levar em consideração somente o consumo e custos dos materiais; aspectos como tempo de execução, mão de obra qualificada, tempo de execução e como todo o sistema estrutural irá se comportar, também devem ser levados em consideração.

Nos resultados, o consumo de materiais até uma área de $4 \times 8 \text{ m}^2$, quando comparados os dois sistemas de lajes, só é vista uma discrepância maior de aço, concreto e formas entre as lajes. A partir de uma área de $6 \times 6 \text{ m}^2$, além dessa discrepância nas lajes, é visto também um maior peso de aço nos pilares do sistema de lajes maciças. Sabe-se que quanto maior o peso de uma estrutura, maior é a solicitação à fundação, o que pode gerar maiores custos a construção.

Feito os custos de cada elemento estrutural, pode-se saber a influência da escolha do tipo de laje nos custos dos outros elementos do sistema estrutural. Percebe-se que até uma área de $4 \times 4 \text{ m}^2$ não há diferença de custos entre os sistemas analisados para os elementos vigas e pilares. A partir da área de $4 \times 5 \text{ m}^2$, a laje treliçada passa a ter custos maiores com vigas, cerca de 0,5%, com um aumento para 19%, para uma área de $6 \times 6 \text{ m}^2$. Para os pilares ocorreu um fato interessante a partir da área de $6 \times 6 \text{ m}^2$, os custos foram menores no sistema de lajes treliçadas para áreas quadráticas. Por fim, feita a comparação dos custos do elemento lajes, percebeu-se que a grande diferença entre os custos dos dois sistemas se dá devido a este elemento, no qual a laje maciça apresenta até 55% de custo a mais que a laje treliçada para uma área de $6 \times 6 \text{ m}^2$.

O comparativo da composição dos custos dos sistemas estruturais mostra que em nenhum sistema de lajes maciças é mais vantajoso que o sistema de lajes treliçadas conforme mostra o Gráfico 2. Os fatores responsáveis por tornar o sistema estrutural de lajes treliçadas mais vantajoso em relação ao custo são: o menor volume de concreto utilizado e a não utilização de formas para as lajes, pois tanto um como outro são de grande custo no mercado, além de serem fundamentais e muito utilizados no sistema de lajes maciças. Um fator que não foi considerado foi o fato que as formas podem ser reutilizadas fazendo com que seu custo diminua com a maior quantidade de pavimentos.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.T. **Análise de alternativas para edifícios em concreto armado**. 1999. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

ARAÚJO, J.M. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. v.1, 2. Rio Grande: Dunas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859/2002 - Laje pré-fabricada - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118/2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120/1980 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062/2001 - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2001.

BASTOS, P.S.S. **Fundamentos do concreto armado**. Notas de aula, Disciplina Estruturas de Concreto I. Bauru/SP, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia - Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2006, 88p. Disponível em: <www.feb.unesp.br/pbastos>. Acesso em: 05 out. 2017.

CAIO, F. **Análise Comparativa Entre Sistemas Estruturais de Lajes Maciças e Nervuradas Treliçadas**. Trabalho de conclusão de curso, Lajeado: Armaduras colocadas nas lajes e nas vigas, 2014. 76p. , il. color.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **SINAPI: Relatório de Insumos e Composições - OUT/17 - Com Desoneração**. João Pessoa, PB, 2017. Arquivo XLS. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_652>. Acesso em: 05 nov. 2017.

CARVALHO, R. C; FIGUEIREDO FILHO, J.R; SILVA, M. A. F. **A Utilização da Analogia de Grelha para Análise de Pavimentos de Edifícios em Concreto Armado**. 16 f. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003.

CARVALHO, R.C; FIGUEIREDO FILHO, J.R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: segundo a NBR 6118/2014. 4. ed. São Carlos: EDUFSCAR, 2014, 409p.

CRUZ, M.V. A. **Estudo Comparativo Estrutural e Econômico Entre Lajes Nervuradas e Laje Maciça Para Um Edifício Residencial**. Trabalho de conclusão de curso, Araruna: Concretagem da laje maciça, 2015. 68p. , il. color.

KASSIMALI, A. **Análise Estrutural**: Tradução da 5ª Edição Norte-Americana. 1. ed. Tradução Noveritis do Brasil. Revisão técnica Luiz Antônio Vieira Carneiro. São Paulo: CENGAGE LEARNING, 2015, 719p.

SILVA, R.B. **Contribuições à análise estrutural de lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 150f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.