

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

CAROLAINI DE ASSIS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES NERVURADAS: VARIAÇÃO DE FCK,
ESPESSURA DA MESA E DIMENSÕES DE EPS

Joinville

2023

CAROLAINI DE ASSIS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES NERVURADAS: VARIAÇÃO DE FCK,
ESPESSURA DA MESA E DIMENSÕES DE EPS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Valéria Bennack

Joinville

2023

CAROLAINI DE ASSIS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES NERVURADAS: VARIAÇÃO DE FCK,
ESPESSURA DA MESA E DIMENSÕES DE EPS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 22 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dra. Valéria Bennack
Orientadora/Presidente

Dra. Anelize Borges Monteiro
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Bianca Farias
Membra
Porto Itapoá

Dedico este trabalho aos meus pais, amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Neste momento de conclusão, gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos os envolvidos no meu processo acadêmico. Sei que este trabalho de conclusão de curso não teria alcançado seu brilho sem a valiosa contribuição que cada um de vocês ofereceu ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Airton e Neuci, agradeço por sempre acreditarem em mim, por me encorajarem a perseguir meus sonhos e por serem o meu porto seguro nas adversidades. Vocês são exemplos de força, dedicação e amor incondicional, e sou imensamente abençoado por tê-los como meus pais.

Aos meus professores, agradeço por seu conhecimento, orientação e dedicação em me ajudar a crescer intelectualmente. Suas aulas instigantes, suas palavras de sabedoria e seu apoio incansável foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico. Vocês me inspiraram a superar desafios, expandir meus horizontes e buscar excelência em tudo o que faço. Em especial, Andréa Holz Pfutzenreuter, Anelize Borges Monteiro, Helena Paula Nierwinski, Marcelo Heidemann e Valéria Bennack

Aos meus amigos, agradeço por estarem sempre ao meu lado, compartilhando risos, lágrimas, desafios e momentos inesquecíveis ao longo dessa jornada acadêmica. Suas conversas estimulantes, apoio mútuo e encorajamento constante foram essenciais para manter minha motivação e entusiasmo.

Ao meu noivo, gostaria de expressar minha imensa gratidão por ter você ao meu lado. Seu amor, apoio e compreensão foram pilares essenciais durante toda a minha jornada acadêmica.

A cada um de vocês, dedico este trabalho como uma pequena demonstração de reconhecimento por tudo que fizeram por mim. Vocês foram fundamentais na minha formação como pessoa e profissional, e sou grata por cada ensinamento, conselho e palavra de incentivo que me ofereceram.

Scientists discover the world that exists; Engineers create the world that never was.

(Theodore von Karman).

RESUMO

As lajes nervuradas são estruturas de concreto armado, planas e amplamente utilizadas na construção civil. As nervuras são incorporadas na estrutura da laje, distribuindo uniformemente os carregamentos, aumentando assim a rigidez e a resistência, possibilitando também maiores vãos livres quando comparada às lajes maciças. O presente trabalho aborda o estudo comparativo do dimensionamento estrutural entre lajes nervuradas com o objetivo de identificar o consumo do aço de acordo com a variabilidade da resistência característica do concreto, espessura da mesa e também dimensões do bloco de enchimento. Foi conduzida uma pesquisa bibliográfica em livros e artigos, juntamente com a análise das especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas, a fim de desenvolver o procedimento passo a passo para o pré-dimensionamento. Verificou-se que modificando as dimensões do bloco de enchimento obteve-se o menor consumo de aço quando comparado com as modificações na resistência à compressão do concreto e espessura da mesa. Isso ocorre devido à redução no peso próprio da laje e momentos atuantes, consequentemente reduzindo também o consumo de aço da estrutura. Apesar da modificação da espessura da mesa também apresentar redução do peso próprio e momentos atuantes sobre a laje, essa alteração também influencia na altura útil da laje impossibilitando a redução no consumo de aço.

Palavras-chave: Concreto armado. Lajes nervuradas. Dimensionamento estrutural.

ABSTRACT

Ribbed slabs are reinforced concrete structures that are flat and widely used in civil construction. Ribs are incorporated into the slab structure, evenly distributing the loads and thereby increasing strength and rigidity. They also allow for larger clear spans compared to solid slabs. This study focuses on the comparative structural design of ribbed slabs in order to identify steel consumption based on the variability of characteristic concrete strength, slab thickness, and filler block dimensions. A literature review of books and articles was conducted, along with an analysis of the specifications provided by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT), to develop a step-by-step procedure for preliminary design. It was found that modifying the filler block dimensions resulted in the lowest steel consumption compared to changes in concrete compression strength and slab thickness. This is due to the reduction in the self-weight of the slab and the resulting reduced bending moments, thereby reducing the steel consumption in the structure. Although changing the slab thickness also reduces self-weight and bending moments on the slab, it also affects the effective height of the slab, preventing a reduction in steel consumption.

Keywords: Reinforced concrete. Ribbed slabs. Structural design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de bordos	29
Figura 2 - Representação de uma laje nervurada direta.....	31
Figura 3 - Vãos Livres	37
Figura 4 - Planta baixa do projeto de referência do estudo	41
Figura 5 - Laje L1 ($\lambda = 1,16$).....	42
Figura 6 - Laje L2 ($\lambda = 1,86$).....	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Peso específico aparente dos materiais de construção.....	34
Quadro 2 - Valores característicos nominais de cargas variáveis	34
Quadro 3 - Dados e carregamentos de entrada	43
Quadro 4 - Análise de variações para o dimensionamento da Laje.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência do concreto classe I	21
Tabela 2 - Resistência do concreto classe II	21
Tabela 3 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo).	23
Tabela 4 - Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto.	24
Tabela 5 - Classe de Agressividade Ambiental (CAA).....	25
Tabela 6 - Exigências de qualidade do concreto em função da agressividade do ambiente.	25
Tabela 7 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm	26
Tabela 8 - Valor do coeficiente de aderência η_1	27
Tabela 9 – Taxas mínimas de armadura de flexão para lajes e vigas	39
Tabela 10 - Cargas atuantes na laje	45
Tabela 11 - Momentos atuantes na laje	46
Tabela 12 - Armaduras	46
Tabela 13 – Carregamentos: Análise 1	47
Tabela 14 – Momentos: Análise 1	48
Tabela 15 - Área de Aço: Análise 1	49
Tabela 16 - Carregamentos: Análise 2	49
Tabela 17 - Momentos: Análise 2	50
Tabela 18 - Área de Aço: Análise 2	50
Tabela 19 - Carregamentos: Análise 3	51
Tabela 20 - Momentos: Análise 3	51
Tabela 21 - Área de Aço: Análise 3	52
Tabela 22 - Área de Aço: Análise 4	52
Tabela 23 - Unificação dos Resultados	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA-25 – Aço 250 MPa

CA-50 – Aço 500 MPa

CA-60 – Aço 600 MPa

CAA – Classe de Agressividade Ambiental

EPS – Poliestireno Expandido

KM – Valores de cálculo de armaduras longitudinal

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma Técnica Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{ck} – Resistência característica do concreto à compressão

f_{vk} – Resistência característica de escoamento do aço

f_{yd} – Resistência característica de cálculo do aço

f_{cd} – Resistência característica do Concreto

σ – Tensão

ε – Deformação

γ – Peso específico

λ – Parâmetro que reflete a geometria da laje

Φ – Diâmetro máximo

kN – Quilonewton

cm – Centímetro

m – Metro

cm² – Centímetro quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS.....	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. HISTÓRIA DO CONCRETO ARMADO.....	17
2.2. O CONCRETO ARMADO.....	17
2.2.1. Vantagens do Concreto Armado	18
2.2.2. Desvantagens do Concreto Armado	18
2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO.....	19
2.3.1. Consistência	19
2.3.2. Trabalhabilidade	19
2.3.3. Homogeneidade	19
2.3.4. Resistência à compressão	20
2.3.5. Resistência à tração	21
2.3.6. Módulo de elasticidade	22
2.3.7. Qualidade	23
2.3.8. Durabilidade e vida útil	24
2.3.9. Classe de agressividade	24
2.3.10. Cobrimento	26
2.4. CARACTERÍSTICAS DO AÇO.....	27
2.5. OS ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO.....	28
2.5.1. Lajes	28
<u>2.5.1.1. Lajes Maciças</u>	<u>29</u>
<u>2.5.1.2. Lajes nervuradas e moldadas no local</u>	<u>30</u>
2.6. PARÂMETROS DO DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	32
2.6.1. Ações	32
<u>2.6.1.1. Ações permanentes</u>	<u>32</u>
<u>2.6.1.2. Ações variáveis diretas e indiretas</u>	<u>33</u>
<u>2.6.1.3. Ações excepcionais</u>	<u>33</u>
2.6.2. Cargas atuantes nas lajes	33

2.6.3. Combinação de Ações	35
2.6.4. Vãos Efetivos	36
2.6.5. Altura útil	37
2.6.6. Momentos Atuantes	38
2.6.7. Cálculo da armadura e espaçamentos	38
3. METODOLOGIA	41
3.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	41
3.2. ROTINA DE CÁLCULO.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1. COMPARAÇÃO DE VALORES ENTRE ANÁLISES	47
4.1.1. Análise 1	47
4.1.2. Análise 2	49
4.1.3. Análise 3	51
4.1.4. Análise 4	52
5. CONCLUSÃO	55
5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57
APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULO	59
ANEXO A – TABELAS DE MARCUS PARA O CÁLCULO DE MOMENTOS PARA LAJES ARMADAS EM CRUZ	78
ANEXO B – RELAÇÃO KM E KA	79

1. INTRODUÇÃO

De acordo com França & Fusco (1997), as lajes nervuradas são uma evolução natural das lajes maciças, resultando na eliminação da maior parte do concreto localizado abaixo da linha neutra. Essa abordagem possibilita uma redução na espessura total das lajes, graças à criação de vazios em um arranjo rítmico padronizado. Isso resulta em uma diminuição do peso próprio da estrutura em um melhor aproveitamento tanto do aço quanto do concreto.

A utilização de lajes nervuradas tem se mostrado uma solução eficiente para vencer grandes vãos. Isso se deve ao fato que, nesses casos, a espessura das lajes maciças pode atingir valores elevados, sendo que grande parte de sua capacidade resistente seria utilizada para combater as solicitações devidas ao peso próprio, tornando a estrutura antieconômica (STRAMANDINOLI, 2003).

Segundo Bellei *et al* (2008), o consumo de aço é um dos principais componentes do custo de uma estrutura, sendo fundamental encontrar alternativas que possibilitem a redução desse consumo sem comprometer a segurança e a qualidade do projeto. Portanto, entender como a resistência do concreto, a espessura da mesa e as dimensões do material de enchimento influenciam e se relacionam durante o dimensionamento estrutural é essencial para o desenvolvimento de projetos mais eficientes.

A Norma Técnica Brasileira NBR 6118:2014, atualmente em vigor, juntamente com estudos, publicações e livros, oferece o embasamento teórico necessário para compreender os conceitos de estruturas de concreto armado e do dimensionamento de lajes nervuradas.

Neste trabalho serão selecionados modelos representativos de lajes nervuradas, nos quais serão aplicadas as variações na resistência do concreto, na espessura da mesa e nas dimensões do material de enchimento. Posteriormente, realizados dimensionamentos estruturais sucessivos, utilizando planilhas computacionais, para analisar e determinar o consumo de aço em cada configuração. Os resultados serão avaliados e comparados, levando em consideração critérios técnicos e econômicos, para identificar as melhores soluções.

A contribuição deste estudo está na identificação de combinações mais eficientes de parâmetros de projeto que resultem em um consumo de aço reduzido,

mantendo-se os níveis de segurança e desempenho estruturais adequados. Essas informações complementaram o acervo técnico já existente desse tema, tendo utilidade para engenheiros e profissionais da construção civil, permitindo uma tomada de decisão embasada e fundamentada em critérios técnicos e econômicos.

Em suma, o estudo demonstrará que as alterações das dimensões do bloco de enchimento resultam em um menor consumo de aço no dimensionamento dos projetos de lajes nervuradas, e ao mesmo tempo, mantém a segurança e qualidade da estrutura.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa da resistência do concreto, espessura da mesa e dimensões do material de enchimento no dimensionamento estrutural de lajes nervuradas, identificando sua influência no consumo de aço. Para isso, elencam-se os seguintes objetivos específicos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar os principais parâmetros para o dimensionamento estrutural de lajes nervuradas de acordo com a NBR6118:2014;
- Definir diferentes espessuras de mesa, blocos de EPS e f_{ck} para o dimensionamento;
- Identificar e comparar a área de aço de acordo com as variações nos parâmetros do dimensionamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de alcançar os objetivos deste trabalho, é fundamental realizar uma revisão dos conceitos relacionados ao concreto armado e lajes nervuradas a partir das literaturas e normativas vigentes. Com esse propósito, neste capítulo serão apresentados de forma concisa esses conceitos, a fim de proporcionar ao leitor um melhor entendimento da metodologia, bem como das análises e resultados que serão abordados posteriormente.

2.1. HISTÓRIA DO CONCRETO ARMADO

O concreto armado é um material muito utilizado na construção civil, composto por uma mistura de cimento, areia, água e pedra britada, reforçado com barras de aço (CARVALHO, 2014).

Segundo Bastos (2019), o uso de concreto armado tem suas raízes na França, onde o engenheiro francês Joseph Monier patenteou um processo para produzir vasos de cimento reforçado com arame de aço em 1850. Monier percebeu que o arame de aço poderia ser usado para reforçar o concreto, aumentando sua resistência e tornando-o um material ideal para a construção de estruturas.

No Brasil, o concreto armado começou a ser amplamente conhecido e difundido a partir da década de 1920, com a chegada das empresas cimentícias sendo que partir de 1940 seu uso já havia sido normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (SANTOS, 2008).

Ao longo dos anos, a técnica do concreto armado foi aprimorada e adaptada às condições locais, e se tornou uma das principais opções para a construção de grandes estruturas no Brasil, como pontes e viadutos (BASTOS, 2019).

2.2. O CONCRETO ARMADO

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) os elementos de concreto armado são estruturas cujo comportamento depende da aderência entre o concreto e a armadura, e não requerem a aplicação de alongamentos iniciais nas armaduras antes da obtenção dessa aderência.

De acordo com Carvalho (2014), o concreto apresenta desempenho estrutural limitado quando utilizado de forma isolada. Embora demonstre boa resistência à compressão, sua resistência à tração é consideravelmente mais baixa, correspondendo a aproximadamente 10% de sua resistência à compressão.

Nesse sentido, é necessário que os dois materiais, concreto e aço, trabalhem em conjunto, aproveitando as forças de aderência existentes entre suas superfícies. As barras de aço tracionadas só desempenham sua função quando são alongadas devido à deformação do concreto que as envolve, formando assim as armaduras passivas. É essa aderência entre os materiais que confere ao concreto armado o seu comportamento como um material estrutural (CARVALHO, 2014).

Ainda segundo o mesmo autor, o concreto armado pode apresentar tanto vantagens quanto desvantagens na sua utilização/aplicação, as quais serão apresentadas na sequência.

2.2.1. Vantagens do Concreto Armado

- Boa trabalhabilidade;
- Boa resistência à maioria das solicitações;
- Material durável com relação a sua vida útil;
- Resistente ao calor/fogo, choques, vibrações, desgastes mecânicos;
- Altamente competitivo quando comparado às estruturas de aço em seu valor econômico;
- Possibilita a fabricação “pré-moldada”, podendo reduzir o tempo de execução da obra.

2.2.2. Desvantagens do Concreto Armado

- Peso específico elevado, quando comparado com estruturas de aço;
- As reformas e adaptações frequentemente representam desafios significativos durante a execução;
- O material tem uma alta condutividade térmica e acústica, o que pode requerer a combinação com outros materiais para solucionar esses problemas em casos específicos;

- Necessidade de utilização de formas e escoras em obra até que o concreto atinja sua resistência esperada.

2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

Há inúmeros aspectos nos quais o concreto fresco e endurecido deve apresentar para que possa ser empregado, muitos desses dependem do planejamento e execução (CARVALHO, 2014), tais como os elencados nos itens a seguir:

2.3.1. Consistência

A consistência é a capacidade do concreto, ainda fresco, de se deformar. Essa propriedade influencia diretamente no processo de transporte, lançamento e adensamento do material, e pode ser determinada pelo abatimento do tronco de cone, regulamentado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

2.3.2. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade está relacionada à facilidade de adensamento do concreto, o qual muitas vezes é realizado por vibradores para facilitar a aderência entre o concreto e o aço.

2.3.3. Homogeneidade

A qualidade e durabilidade do concreto é diretamente relacionada à homogeneidade. Além disso, a homogeneidade também afeta a aparência e a textura do concreto.

A homogeneidade do concreto é influenciada pelo tamanho e forma dos agregados bem como pelo processo de execução. Quanto mais uniforme forem seus agregados, melhor será a qualidade do produto final, e se em conjunto for executado de acordo com a NBR 14931:2004 apresentará uma homogeneidade satisfatória (CARVALHO, 2014).

2.3.4. Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é uma de suas propriedades mais importantes no estado endurecido, sendo definida como a capacidade do concreto de resistir à deformação quando submetido a esforços compressivos. Essa propriedade é determinada por meio de ensaios de compressão uniaxial, realizados em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos regidos pela NBR 5739 (ABNT, 2007).

A NBR 6118 (ANBT, 2014) estabelece que a resistência à compressão do concreto deve ser determinada por ensaios realizados em corpos de prova com dimensões padronizadas e idade mínima de 28 dias. O valor da resistência à compressão do concreto é expresso em MPa (mega Pascal).

Após a realização do ensaio, é possível encontrar a resistência à compressão média a partir da equação (1).

$$f_{cmj} = \frac{N_{rup}}{A} \quad (1)$$

Onde:

N_{rup} = carga da ruptura (N);

A = área da seção transversal (m^2).

De acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015) os concretos são classificados em classe I e II de acordo com sua resistência à compressão característica (f_{ck}), definida no rompimento do corpo de prova aos 28 dias, conforme as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Resistência do concreto classe I

Classe de resistência Grupo I	Resistencia característica a Compressão MPa
C20	20
C25	25
C30	30
C35	35
C40	40
C45	45
C50	50

Fonte: NBR 8953 ABNT (2015).

Tabela 2 - Resistência do concreto classe II

Classe de resistência Grupo I	Resistencia característica a Compressão MPa
C55	55
C60	60
C70	70
C80	80
C90	90
C100	100

Fonte: NBR 8953 ABNT (2015).

Os concretos da classe II são considerados concretos de alto desempenho devido a sua alta resistência característica à compressão, utilizados em obras especiais.

2.3.5. Resistência à tração

A resistência à tração do concreto é um parâmetro importante para garantir a segurança e durabilidade das estruturas. É importante destacar que a resistência à tração do concreto pode variar de acordo com vários fatores, como idade do concreto, proporção dos materiais, presença de fissuras e condições ambientais (CARVALHO, 2014).

De acordo com Oliveira *et al.* (2017), a resistência à tração do concreto é geralmente considerada baixa em comparação com a resistência à compressão, porém é utilizada a fins de cálculo para a verificação do estado limite de serviço a partir de ensaios, como de tração direta e flexão prismática.

Os concretos de classe I, até 50MPa, têm sua resistência à tração média calculada pela equação (2).

$$f_{ct,m} = 0,3 (f_{ck})^{2/3} \quad (2)$$

onde:

$f_{ct,m}$ = resistência à tração média (MPa);

f_{ck} = resistência característica à compressão (MPa).

A resistência à tração dos concretos de classe II, acima de 50MPa, pode ser calculada pela equação (3).

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln (1 + 0,11 f_{ck}) \quad (3)$$

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), na falta de ensaios de tração, podem ser utilizadas a equação (4) para resistência superior e a (5) para resistência inferior, determinando assim o valor médio/característico.

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ck,m} \quad (4)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ck,m} \quad (5)$$

2.3.6. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que relaciona a deformação elástica do material com a tensão aplicada. Tal grandeza pode ser determinada através de ensaios de compressão uniaxial e até mesmo por ensaio de ultrassom, que utiliza ondas sonoras para medir a velocidade de propagação das ondas no concreto (SOUSA *et al.*, 2015).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) permite estimar, na falta de ensaios, o valor do módulo de elasticidade a partir da equação (6), para concretos entre 20 e 50 MPa e da equação (7) para concretos entre 55 e 90MPa.

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (6)$$

$$E_{ci} = 21,50 \cdot 10^3 \alpha_E \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (7)$$

Onde α_E depende da composição do agregado graúdo:

$\alpha_E = 1,20$ para basalto e diabásio;

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

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) ainda apresenta valores estimados de módulo de elasticidade que podem ser usados no projeto estrutural, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo).

Classe de Resistência	C20	C25	C30	C40	C45	C50	C55	C60	C70	C80	C90
E_{ci} (GPa)	20	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_j	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,0	1,0

Fonte: NBR 6118 ABNT (2014).

em que:

E_{cs} = módulo de deformação secante;

E_{ci} = módulo de elasticidade inicial;

2.3.7. Qualidade do concreto

A qualidade do concreto é fundamental para garantir a durabilidade e a segurança das estruturas de concreto, seja durante a construção, seja durante sua utilização (BASTOS, 2019).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) o concreto deve atender aos requisitos mínimos de qualidade, classificados quanto sua capacidade resistente, desempenho de serviço e durabilidade.

2.3.8. Durabilidade e vida útil

As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil. (NBR6118 ABNT, 2014, p. 15).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) afirma que a vida útil de um projeto é o período de tempo no qual se mantém as mesmas características das estruturas, sem intervenções significativas. A vida útil do concreto pode variar de acordo com o ambiente em que ele está exposto e a sua finalidade.

A Tabela 4 evidencia o tempo de vida útil do projeto de acordo com a NBR6118 (ABNT, 2014).

Tabela 4 - Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto.

Categoria	Vida útil (anos)	Exemplos
1	10	Estruturas provisórias
2	10 a 25	Componentes estruturais que possam ser substituídos
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes
5	60	Estruturas de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas similares

Fonte: NBR 6118 ABNT (2014).

2.3.9. Classe de agressividade

De acordo com a NBR 6118 (ANBT, 2014), a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas e variam de acordo com a natureza e a concentração dos agentes agressivos presentes.

A escolha da classe de agressividade do concreto é fundamental para garantir a durabilidade e a segurança da estrutura em serviço (NBR 15575-4, ABNT 2013). A

Tabela 5 indica as classes de agressividade ambiental de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 5 - Classe de Agressividade Ambiental (CAA).

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

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

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

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

Fonte: NBR 6118 ABNT (2014).

A NBR6118 (ABNT, 2014) também determina a relação água cimento das estruturas de concreto de acordo com a sua respectiva classe de agressividade, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Exigências de qualidade do concreto em função da agressividade do ambiente.

Concreto	Tip o	Classe de agressividade (Tabela 5)			
		I	II	III	IV
Relação água-cimento máxima (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: NBR 6118 ABNT (2014).

2.3.10. Cobrimento

Segundo Bastos (2019) o cobrimento de armadura é a espessura da camada de concreto responsável pela proteção da armadura em um elemento estrutural, iniciado a partir da face mais externa da barra de aço e se estende até a superfície externa do elemento em contato com o meio ambiente.

Para garantir o cobrimento mínimo (C_{min}), o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (C_{nom}), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc). Assim, as dimensões das armaduras e os espaçadores devem respeitar os cobrimentos nominais, estabelecidos na Tabela 7, para $\Delta c = 10$ mm. (NBR 6118 ABNT, 2014, p. 19).

Tabela 7 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo da Estrutura	Componente ou Elemento	Classe de agressividade (Tabela 5)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
Concreto Armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d		30	40	50
Concreto Protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

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

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

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

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

Fonte: NBR 6118 ABNT (2014).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) ainda permite, no caso de o concreto ter resistência superior ao mínimo exigido, os cobrimentos podem ser reduzidos em até 5 mm.

2.4. CARACTERÍSTICAS DO AÇO

O aço para concreto armado é um material de alta resistência utilizado em diversas aplicações estruturais devido as suas características mecânicas, tais como a alta resistência à tração e ductilidade. Segundo Nilson *et al.* (2010), a capacidade do aço para concreto armado de resistir às cargas é garantida pelo fato de que ele é capaz de absorver deformações significativas antes de falhar.

Segundo a NBR 7480 (ABNT, 2022) os aços podem ser classificados como barras ou fios, sendo as barras quando seu diâmetro nominal for de 6,3mm ou superior e obtidas exclusivamente por laminação a quente. Os fios, são classificados quando seu diâmetro nominal for de 10mm ou inferior, e sua obtenção for a partir de fio-máquinas por trefilação ou laminação a frio.

A partir dos ensaios de tração uiaxial, são obtidas as principais características mecânicas de um aço, a resistência característica de escoamento, limite de resistência e alongamento na ruptura (CARVALHO, 2014). Sendo assim, sua classificação é também de acordo com sua resistência característica de escoamento, onde as barras são categorizadas como CA-25 e CA-50 e os fios de aço como CA-60 de acordo com a NBR 7480 (ABNT, 2022).

As barras ou fios de aço que podem ter sua textura lisa, entalhada ou ainda provida de saliências ou mossas influenciam diretamente na capacidade de aderência do aço com o cimento, relacionados ao coeficiente η_1 (NBR 6118, ABNT 2014).

Tabela 8 - Valor do coeficiente de aderência η_1

Tipo da Superfície	η_1
Lisa	1,00
Entalhada	1,40
Nervurada	2,25

Fonte: NBR 6118 ABNT (2014).

2.5. OS ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO

Elementos estruturais são os componentes básicos de uma estrutura, que trabalham em conjunto para suportar cargas e resistir a deformações. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), eles podem ser classificados em três categorias principais: elementos lineares, planares e espaciais. Onde alguns deles podem ser:

- Vigas: elementos estruturais lineares que trabalham predominantemente sob flexão transmitindo suas cargas para os pilares;
- Pilares: elementos estruturais verticais que têm como principal função transmitir as cargas das vigas e lajes para as fundações;
- Lajes: são elementos planos que distribuem as cargas uniformemente entre as vigas;
- Paredes: são elementos estruturais que têm como função principal resistir às cargas horizontais, como vento e sismos;
- Fundações: elementos estruturais que têm como função transmitir as cargas das edificações para o solo.

2.5.1. Lajes

Segundo Bennack (2022), as lajes são elementos com superfície plana e sujeitos principalmente a ações normais ao seu plano, sua principal função é transmitir as cargas para as vigas, paredes estruturais ou pilares que as suportam e são dimensionadas e detalhadas de forma isolada, com apoios livres a rotação e impedidas ao movimento de translação, considerando ainda a continuidade entre as lajes adjacentes.

As lajes podem ser classificadas de acordo com sua forma, natureza, tipo de apoio e amarração, com a seguinte subclassificação de acordo com Bennack (2022):

- Forma: retangulares, quadradas, triangulares, circulares e entre outros;
- Natureza: Lajes maciças, nervuradas e moldadas no local, com nervuras pré-fabricadas, nervuradas com capitéis e vigas-faixa, lajes mistas, lajes em grelha e lajes em painéis;

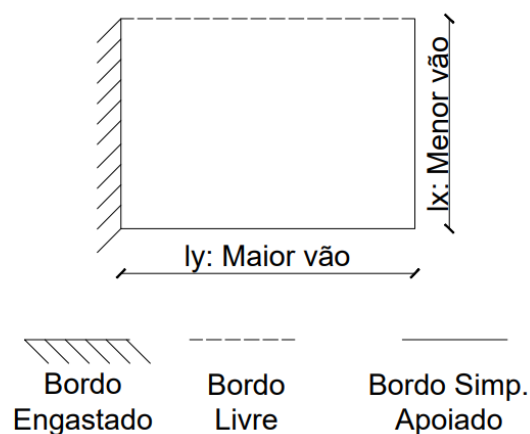
- Tipo de Apoio: contínuo sobre linha, discreto e no solo;
- Comportamento a flexão ou tipo de armação: Armadas em uma só direção, amadas em duas direções.

2.5.1.1. Lajes Maciças

Segundo Carvalho (2019), as lajes maciças distribuem suas reações em todas as vigas de contorno e podem ser dimensionadas pelo método elástico ou pelo método de ruptura.

Ainda de acordo com o mesmo autor, as lajes podem ser perfeitamente engastadas, quando houver continuidade com lajes adjacentes; simplesmente apoiadas, sem lajes adjacentes; ou, lajes com bordo livre, quando não há ligação física com qualquer outro elemento estrutural. A Figura 1 exemplifica cada modelo.

Figura 1 - Tipos de bordos



Fonte: autoria própria (2022).

Se:

$\lambda > 2$, a laje será armada em apenas uma direção;

$\lambda \leq 2$, a laje será armada em duas direções.

De acordo com a NBR 6118 (ANBT, 2014) as lajes maciças precisam respeitar os seguintes limites para espessura da mesa:

- 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 $l/42$ para lajes de piso bi apoiadas e $l/50$ para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

2.5.1.2. Lajes nervuradas e moldadas no local

Segundo Spohr (2008), as lajes nervuradas são compostas por uma malha de vigas e nervuras, com a finalidade de aumentar a rigidez e diminuir a espessura da laje. As lajes moldadas no local são executadas na própria obra, com o uso de formas e escoramentos, o que permite a sua adaptação a diferentes tipos de projetos.

As lajes nervuradas, quando comparada às maciças, podem apresentar grandes vantagens como, menor consumo de materiais, menor peso próprio e maior capacidade de vencer grandes vãos. No entanto, é importante destacar que a sua execução requer maior atenção aos detalhes construtivos e ao controle de qualidade dos materiais utilizados (SILVA, 2005).

Quando se tem vãos relativamente grandes, as lajes maciças podem atingir espessuras tão grandes que a maior parte de sua capacidade resistente seria utilizada no combate às solicitações devidas ao peso próprio, tornando a estrutura antieconômica. Surge então a necessidade de se reduzir o peso próprio, o que pode ser feito suprimindo-se uma parte do concreto que “não trabalha”, na zona tracionada da laje, e agrupando-se as armaduras de tração em faixas, chamadas de nervuras, entre as quais pode ser colocado material inerte como tijolos de argila, blocos de concreto poroso, placa de gesso, EPS, etc. (BENNACK, 2022, p. 34).

O EPS (poliestireno expandido) é um material leve e resistente que apresenta boas propriedades isolantes térmicas e acústicas, Além de possuir facilidade de moldagem e corte. Sua utilização como material de enchimento nas lajes nervuradas in loco resulta em redução significativa do peso próprio da estrutura, diminuição do consumo de concreto e aço, e maior rapidez na execução da obra. De acordo com Andrade e Araújo (2017), as lajes nervuradas com enchimento de EPS podem reduzir em até 48% a carga térmica em relação às lajes convencionais.

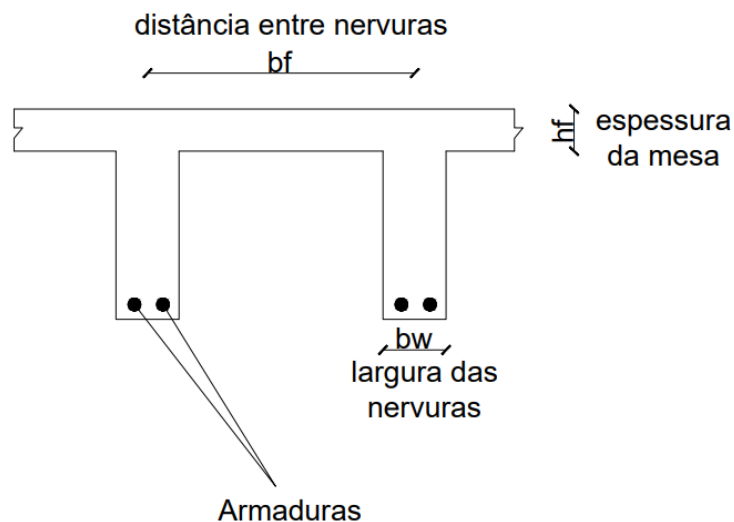
Silva (2005) ainda classifica as lajes nervuradas como:

- Laje nervurada dupla: nervuras ficam situadas entre duas mesas de concreto, uma inferior e outra superior;
- Laje nervurada invertida: nervuras ficam situadas na parte superior, existindo uma mesa inferior de concreto. Sua utilização é restrita para lajes em balanço, onde os momentos fletores são negativos;
- Laje nervurada direta: nervuras ficam situadas na parte inferior com mesa de concreto na parte superior.

As lajes nervuradas diretas serão objeto do presente estudo. Os vazios entre suas nervuras podem ser ocupados por algum material de enchimento sem função estrutural, de acordo com o Quadro 1, ou permanecer vazios com auxílio de formas.

Assim, de forma similar as lajes maciças, as lajes nervuradas podem ser armadas em uma ou duas direções. Quando armadas em uma direção, suas nervuras são dispostas na direção do menor vão teórico (SILVA, 2005).

Figura 2 - Representação de uma laje nervurada direta



Fonte: Autoria própria (2023).

Onde de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), recomenda-se que:

- A largura das nervuras não seja menor que 5 cm;
- Espessura da mesa seja maior ou igual a 4 cm;

- Distância das nervuras não ultrapassem 110 cm;
- Se a distância entre os eixos das nervuras passarem de 65 cm deve ser verificado a resistência a flexão da mesa e sua armadura deverá ser dimensionada como uma laje maciça, simplesmente apoiada;
- Se a distância entre eixos das nervuras for menor que 65 cm, adota-se a armadura mínima para mesa.

2.6. PARÂMETROS DO DIMENSIONAMENTO ESTRUTUAL

O dimensionamento estrutural de lajes nervuradas pode ser realizado de forma similar ao dimensionamento de lajes maciças estando sempre em concordância com os critérios estabelecidos na NBR 6118:2014, os quais serão discorridos ao longo deste tópico.

2.6.1. Ações

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), em um projeto estrutural deve ser considerado toda influência que possa produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura, as ações podem ser classificadas como permanentes, variáveis e excepcionais.

Denomina-se ação qualquer influência, ou conjunto de influências, capaz de produzir estados de tensão ou de deformação em uma estrutura (CARVALHO, 2014, p.53).

2.6.1.1. Ações permanentes

São classificadas ações permanentes aquelas que possuem valores constantes durante a vida útil da estrutura, elas podem ser subclassificadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) como:

- Permanentes Diretas: peso próprio, peso dos elementos construtivos fixos e de instalações permanentes, empuxos permanentes.

- Permanentes Indiretas: retração do concreto, fluência do concreto, deslocamentos de apoio, imperfeições geométricas, imperfeições globais, imperfeições locais, momento mínimo, protensão.

2.6.1.2. Ações variáveis diretas e indiretas

As ações variáveis diretas são definidas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção, ações do vento e da água que de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) são:

- cargas verticais de uso da construção;
- cargas móveis, considerando o impacto vertical;
- impacto lateral;
- força longitudinal de frenagem ou aceleração;
- força centrífuga.

Já as ações indiretas são devidas a variação de temperatura e provenientes de ações dinâmicas.

2.6.1.3. Ações excepcionais

No projeto de estruturas sujeitas a situações excepcionais de carregamento, cujos efeitos não possam ser controlados por outros meios, devem ser consideradas ações excepcionais com os valores definidos, em cada caso particular, por Normas Brasileiras específicas (NBR 6118, 2014, ABNT, p.63).

2.6.2. Cargas atuantes nas lajes

Os carregamentos atuantes nas lajes são classificados em carregamentos permanentes e variáveis, também subclassificados de acordo com Bennack (2022) como:

- Permanentes: peso próprio, peso de revestimento, peso de enchimento, carregamento devido as paredes entre outros;

- Variáveis: cargas de sobrecarga, nas quais podem variar de acordo com a utilização do empreendimento como lojas, bibliotecas, academia e entre outros.

A NBR 6120 (ABNT, 2019) apresenta diversos valores nos quais podem ser utilizados para os carregamentos permanentes e variáveis, como apresentado nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1 - Peso específico aparente dos materiais de construção

Material		Peso específico aparente (kN/m ³)
Argamassas e Concretos	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cal	12 a 18
	Argamassa de cimento e areia	19 a 23
	Argamassa de gesso	12 a 18
	Argamassa autonivelante	24
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25
Nota: Os pesos específicos de argamassas e concretos são válidos para o estado endurecido.		
Enchimentos	Entulho de obra, caliça	15
	Blocos de concreto celular autoclavado	5,5
	Argila expandida	5 a 7
	Concreto leve	17 a 19
	Solo	16 a 20
	Poliestireno expandido (EPS)	0,3

Fonte: Modificado pelo Autor, NBR 6120, ABNT 2019.

Quadro 2 - Valores característicos nominais de cargas variáveis

Local		Carga uniformemente distribuída (kN/m ²)
Edifícios Residenciais	Dormitórios	1,50
	Sala, copa, cozinha	1,50
	Sanitários	1,50
	Despensa, área de serviço e lavanderia	2,0
	Quadras esportivas	5,0
	Salão de festas e salão de jogos	3,0

	Áreas de uso comum	3,0
	Academia	3,0
	Forro acessíveis para manutenção e sem estoque de materiais	1,0
	Sótão	2,0
	Corredores dentro de unidades autônomas	1,50
	Corredores de uso comum	3,0
	Depósitos	3,0
	Áreas técnicas	-
	Jardins com possibilidade de acesso de pessoas	3,0
Escadas e Passarelas	Residenciais	3,0

Fonte: Modificado pelo Autor, NBR 6120, ANBT 2019.

2.6.3. Combinação de Ações

Um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido. A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura (NBR 6118, 2014, ABNT, p.66).

As combinações últimas são consideradas normais, especiais e excepcionais de acordo com as equações 9, 10 e 11:

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \Psi_{\varepsilon q} F_{\varepsilon qk} \quad (9)$$

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \Psi_{\varepsilon q} F_{\varepsilon qk} \quad (10)$$

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + F_{q1exc} + \gamma_q \sum \Psi_{0j} F_{qjk} + \gamma_{\varepsilon q} \Psi_{\varepsilon q} F_{\varepsilon qk} \quad (11)$$

Onde:

F_d = é o valor de cálculo das ações para combinação última;

F_{gk} = representa as ações permanentes diretas;

$F_{\varepsilon k}$ = representa as ações indiretas permanentes como a retração $F_{\varepsilon gk}$ e variáveis como a temperatura $F_{\varepsilon gk}$;

F_{qk} = representa as ações variáveis diretas das quais F_{q1k} é escolhida principal;

A definição das combinações de serviço se dá a partir da probabilidade de ocorrência na estrutura, a NBR 6118 (ABNT, 2014) as define como:

- quase permanentes: atuam grande parte do período de vida da estrutura. Equação 12;

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \Psi_{2j} F_{qj,k} \quad (12)$$

- frequentes: ocorrem muitas vezes durante o período de vida da estrutura. Equação 13;

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \Psi_1 F_{q1k} + \sum \Psi_{2j} F_{qjk} \quad (13)$$

- raras: ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura. Equação 14.

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + F_{q1k} + \sum \Psi_{1j} F_{qjk} \quad (14)$$

Onde:

$F_{d,ser}$ = é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço;

F_{q1k} = é o valor característico das ações variáveis principais diretas;

Ψ_1 = é o fator de redução de combinação frequente para ELS;

Ψ_2 = é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.

2.6.4. Vãos Efetivos

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) das lajes podem ser calculados de acordo com a equação 15, e com o auxílio das equações 16 e 17.

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \quad (15)$$

$$a_1 \leq \begin{cases} t_1/2 \\ 0,3h \end{cases} \quad (16)$$

$$a_2 \leq \begin{cases} t_2/2 \\ 0,3h \end{cases} \quad (17)$$

Onde:

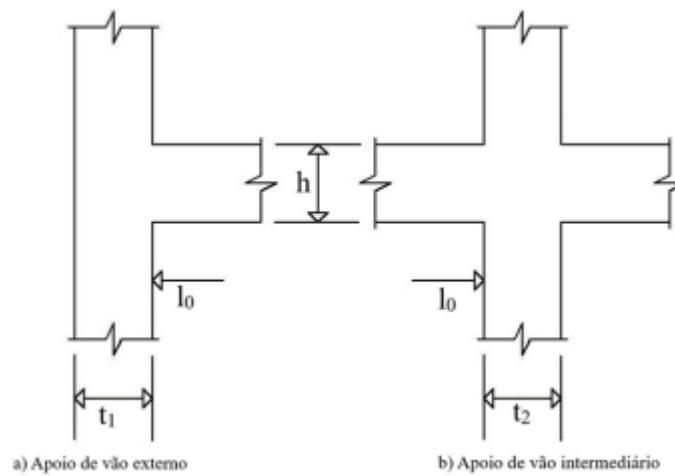
l_0 = distância entre apoios (m);

a_1 e a_2 = metade do apoio (m);

t_1 e t_2 = comprimento do apoio paralelo ao vão da laje (m);

h = espessura da laje (m)

Figura 3 - Vãos Livres



Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.6.5. Altura útil

A altura útil das lajes, d , se dá a partir da equação abaixo:

$$d = h_f - c - \frac{\phi}{2} \quad (18)$$

Onde:

h_f = espessura da mesa;

c = cobrimento, apresentado na tabela 7;

$\frac{\phi}{2}$ = bitola escolhida.

2.6.6. Momentos Atuantes

O cálculo dos momentos atuantes nas lajes depende da sua condição de contorno, item 2.3.4. As lajes nervuradas são consideradas como simplesmente apoiadas e conseqüentemente seus momentos podem ser calculados de acordo com a equação (19) abaixo:

$$M = \frac{ql_x}{m} \quad (19)$$

Onde:

q = somatório das cargas atuantes sobre a laje (como peso próprio, peso revestimento, peso de paredes etc.);

l_x = dimensão do menor vão;

m = momentos positivos, tabelados e correlacionados ao λ , apresentado no anexo A.

2.6.7. Cálculo da armadura e espaçamentos

$$K_m = \frac{b_w d^2}{M_d} \quad (20)$$

Onde:

b_w = Largura de 1 metro;

d = Altura útil da seção (m);

M_d = Momento majorado (kN.m/m).

Com o resultado de k_m , é consultado o apêndice B para encontrar o valor de K_a para sequência de cálculo da armadura, equação (21).

$$A_s = \frac{K_a M_d}{d} \quad (21)$$

Ainda a fim de garantir a segurança da estrutura, é realizada a verificação da taxa de armadura mínima, que de acordo com Silva (2005) pode ser realizada a partir de:

$$\rho_s = \frac{A_s}{b_w h_f} \quad (22)$$

Onde:

ρ_s = taxa de armadura;

b_w = Largura de 1 metro;

h_f = espessura da mesa.

A taxa de armadura pode variar de acordo com:

- armadura negativa: $\rho_s \geq \rho_{min}$
- armadura positiva de lajes armadas nas duas direções: $\rho_s \geq 0,67 \rho_{min}$
- armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção: $\rho_s \geq \rho_{min}$
- armadura positiva (secundária ou construtiva) de lajes armadas em uma

$$\text{direção: } \rho_s \begin{cases} 20\% A_{s_{principal}} \\ 0,50 \rho_s \\ 0,90 \text{ cm}^2/\text{m} \end{cases}$$

Tabela 9 – Taxas mínimas de armadura de flexão para lajes e vigas

Resistência característica do concreto f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50
ρ_{min}	0,15	0,15	0,173	0,201	0,23	0,259	0,288

Fonte: Modificado pela autora. Silva, (2005).

Os espaçamentos entre barras dependem de alguns fatores como o diâmetro das barras e o tamanho da seção transversal da estrutura, portanto, não há um valor único para o espaçamento que seja aplicável a todas as situações. De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2014), o espaçamento entre barras deve obedecer:

- Armadura principal positiva $e \leq \begin{cases} 2h \\ 20 \text{ cm} \end{cases}$
- Armadura secundária positiva $e \leq 33 \text{ cm}$, como critério prático não é adotado espaçamentos maiores que 25 cm
- Armadura negativa $e \leq 25 \text{ cm}$

O espaçamento mínimo entre barras adotado na prática é de 8 cm.

3. METODOLOGIA

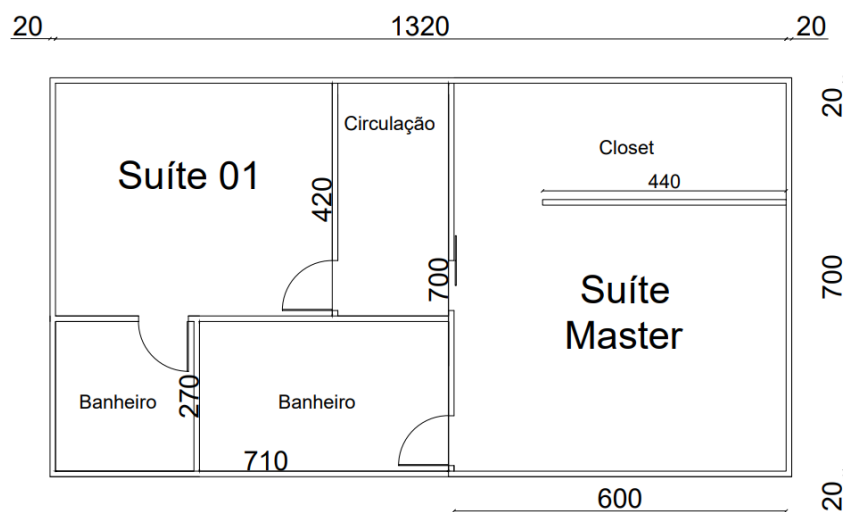
O presente capítulo abordará as considerações preliminares e os procedimentos seguidos para o dimensionamento estrutural das lajes nervuradas.

3.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Neste estudo foram realizadas quatro comparações entre o mesmo sistema estrutural, as lajes nervuradas. Com a definição do sistema estrutural, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para obter o embasamento teórico suficiente para a realização do estudo e escolha das comparações a serem realizadas de forma a expor a variação do consumo de aço em cada uma delas.

Para a realização do presente trabalho, se fez necessária a escolha de uma planta baixa para ser utilizada como base para as considerações estruturais do dimensionamento da laje nervurada, e posteriormente de suas comparações. O projeto desenvolvido pela autora trata-se de uma edificação residencial, de dois pavimentos com pé direito de 3,00 m cada. O objeto de estudo será o pavimento superior, que contempla a área dos dormitórios ilustrado na Figura 4.

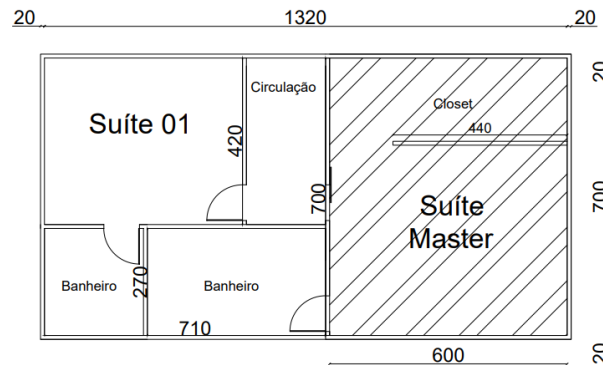
Figura 4 - Planta baixa do projeto de referência do estudo



Fonte: Autoria própria (2023).

As lajes nervuradas são consideradas como bordo simplesmente apoiado, e em um primeiro momento foram realizadas as quatro comparações para o dimensionamento da laje hachurada, na área da suíte master com $\lambda = 1,16$ e nomeado como L1, conforme Figura 5.

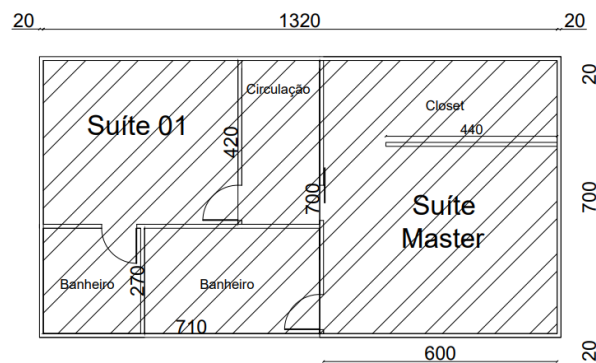
Figura 5 - Laje L1 ($\lambda = 1,16$)



Fonte: Autoria própria (2023).

No segundo momento do estudo, foram consideradas as mesmas quatro comparações para o projeto da planta baixa como um todo, com $\lambda = 1,86$ e nomeado como L2, conforme área hachurada na Figura 6.

Figura 6 - Laje L2 ($\lambda = 1,86$)



Fonte: Autoria própria (2023).

Para o dimensionamento estrutural de ambas as áreas hachuradas, laje L1 e L2, foi considerada a classe de agressividade II (Tabela 5), com cobertura de 2,50 cm de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) e EPS como material de enchimento,

devido seu baixo peso próprio. As lajes dimensionadas estão sujeitas aos mesmos carregamentos iniciais, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Dados e carregamentos de entrada

Dados de Entrada $\lambda = 1,16$ e $\lambda = 1,86$		
Cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
γ_{concreto}	25,00	kN/m ²
γ_{eps}	0,30	kN/m ²
$\gamma_{\text{cerâmica}}$	13,00	kN/m ²
γ_{reboco}	20,00	kN/m ²
pé direito	3,00	m
Cargas		
Prevestimento	1,00	kN/m ²
Psobrecarga	1,50	kN/m ²

Fonte: Autoria própria (2023).

As cargas provenientes ao peso próprio das paredes bem como provenientes ao peso próprio da laje tiveram alteração ao longo das comparações em virtude da variação da espessura da mesa, das dimensões do bloco de EPS e do f_{ck} do concreto. As comparações realizadas foram de acordo com a modificação dos parâmetros apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Análise de variações para o dimensionamento da Laje

Análise 1 - Variação da espessura da mesa			
f_{ck}	25 MPa	25 MPa	25 MPa
espessura da mesa	10 cm	7 cm	5 cm
bloco de EPS	10x30x30 cm	10x30x30 cm	10x30x30 cm
Análise 2 - Variação do bloco de EPS			
f_{ck}	25 MPa	25 MPa	25 MPa
espessura da mesa	7 cm	7 cm	7 cm
bloco de EPS	10x30x30 cm	10x40x40 cm	10x50x50 cm
Análise 3 - Variação de f_{ck}			
f_{ck}	25 MPa	30 MPa	35 Mpa
espessura da mesa	7 cm	7 cm	7 cm
bloco de EPS	10x30x30 cm	10x30x30 cm	10x30x30 cm
Análise 4 - Variação de f_{ck} e espessura da mesa			
f_{ck}	25 MPa	30 MPa	35 MPa
espessura da mesa	10 cm	7 cm	5 cm
bloco de EPS	10x30x30 cm	10x30x30 cm	10x30x30 cm

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme o Quadro 4, as análises 1, 2 e 3 variam apenas uma das três características, resistência do concreto à compressão, espessura da mesa e dimensões do bloco de enchimento. Já a análise 4 possui variação na resistência do concreto à compressão combinando com a variação da espessura da mesa.

As etapas detalhadas do dimensionamento estrutural da laje nervurada com cada análise para cada laje (L1 e L2) está presente no Apêndice A. No próximo item encontra-se a rotina de cálculo realizada da análise 1 para Laje 1 (L1).

3.2. ROTINA DE CÁLCULO

O presente tópico aborda a rotina de cálculo para Laje 1 com uma das variações da análise 1, apresentada no Quadro 4, onde a resistência do concreto é de 25 MPa, espessura da mesa de 10 cm e blocos de EPS com 10x30x30 cm. As demais variações de cada análise estão detalhadas no Apêndice A.

Após a escolha do material de enchimento utilizado nas nervuras, foi calculada a altura útil (d) através da equação (18), obtendo-se o valor de 3 cm adotada para todas as análises para área de aço no eixo x e 4cm para área de aço no eixo y . A obtenção do valor das cargas atuantes na laje, apresentados na Tabela 12, foi calculada a partir da soma dos carregamentos do peso próprio das paredes estruturais

(equação (23)), carregamentos do peso próprio da laje (equação (24)) e demais carregamentos apresentados no Quadro 3.

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20 \quad (23)$$

onde:

V_{parede} = volume da parede;

$\gamma_{cerâmica}$ = peso específico da cerâmica;

V_{reboco} = volume de reboco;

γ_{reboco} = peso específico do reboco;

lx = menor vão;

ly = maior vão.

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right] \quad (24)$$

Onde:

γ_c = peso específico do concreto

tx = dimensão do bloco de EPS no eixo x;

ty = dimensão do bloco de EPS no eixo y;

b' = espessura das nervuras

Tabela 10 - Cargas atuantes na laje

Cargas	
P_{parede}	0,75 KN/m ²
Prevestimento	1,00 KN/m ²
$P_{sobrecarga}$	1,50 KN/m ²
$P_{próprio}$	3,61 KN/m ²
Carga Total	6,86 KN/m²

Fonte: Autoria própria (2023).

Após o cálculo dos carregamentos, foram calculados os momentos fletores atuantes sobre a laje a partir da equação (19), obtendo-se os valores indicados pela Tabela 11.

Tabela 11 - Momentos atuantes na laje

Momentos	
Mx	12.67
Mdx	17.74
My	9.48
Mdy	13.27

Fonte: Aatoria própria (2023).

Onde Md são os momentos majorados por 1,40.

Para obter a área de aço necessária para este dimensionamento estrutural, se fez necessária a utilização das equações (20), (21) e (22). Os resultados estão disponibilizados na Tabela 12.

Tabela 12 - Armaduras

Armadura		
kmx	16.29	
kax	0.023	
kmy	19.29	
kay	0.023	
Asx	2.40	cm ² /m
Asy	1.91	cm ² /m
hequivalente	16.30	cm
Asminx	1.64	cm ² /m
	0.48	cm ² /m
Asminy	1.22	cm ² /m
	0.90	cm ² /m

Fonte: Aatoria própria (2023).

Para a comparação entre cada análise foram feitas tabelas para realização da investigação dos resultados, constatando suas principais diferenças quanto ao peso próprio, momentos atuantes e área de aço para cada cenário. O capítulo 4 a seguir traz os resultados obtidos e as discussões

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este presente capítulo aborda as comparações realizadas em cada análise apresentada no Quadro 4, demonstrando, através dos dados obtidos, a diferença da área de armadura a ser utilizada para cada estudo.

4.1. COMPARAÇÃO DE VALORES ENTRE ANÁLISES

Com o objetivo de melhorar a visualização e análise dos resultados, os quantitativos finais serão apresentados em tabelas a seguir.

4.1.1. Análise 1 – variação da espessura da mesa

A análise 1 possui a resistência à compressão simples com valor constante em 25 MPa e dimensões do bloco de enchimento com 10x30x30cm, variando apenas a espessura da mesa entre 10 cm, 7 cm e 5 cm.

Os carregamentos atuantes, conforme demonstrados na Tabela 13, diferem no que se refere ao peso próprio das paredes e da laje. Na laje L2, de $\lambda=1,86$, há uma maior incidência de paredes e conseqüentemente seus carregamentos são maiores quando comparados a laje L1, de $\lambda=1,16$. Já os carregamentos relacionados ao peso próprio da laje tendem a diminuir conforme há a diminuição da espessura da mesa (h_f), independente do λ da laje. Sendo assim, conforme é diminuída a espessura da mesa, há também a diminuição dos carregamentos totais atuantes sobre as lajes.

Tabela 13 – Carregamentos: Análise1

	Carregamentos L1 (kN/m ²)			Carregamentos L2 (kN/m ²)		
	$h_f = 10 \text{ cm}$	$h_f = 7 \text{ cm}$	$h_f = 5 \text{ cm}$	$h_f = 10 \text{ cm}$	$h_f = 7 \text{ cm}$	$h_f = 5 \text{ cm}$
Pparede	0,75	0,75	0,75	1,66	1,66	1,66
Prevestimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Psobrecarga	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Ppróprio	3,61	2,86	2,36	3,61	2,86	2,36
Carga Total	6,86	6,11	5,61	7,77	7,02	6,52

Fonte: Autoria própria (2023).

Os momentos quando comparados entre L1 e L2 sofrem o aumento de 12% para $h_f=10$ cm, 13% para $h_f=7$ cm e 14% para $h_f=5$ cm isso devido ao aumento do peso próprio da laje.

Os momentos fletores estão correlacionados com os carregamentos atuantes, sendo assim, são maiores quanto mais elevado for o carregamento. Quanto menor a espessura da mesa (h_f), menor são os momentos sobre as lajes, conforme apresentado na Tabela 14.

Como esperado, os momentos fletores de L2 são maiores para os mesmos parâmetros adotados para L1.

Tabela 14 – Momentos: Análise 1

	Momentos L1 (kN/m ²)			Momentos L2 (kN/m ²)		
	$h_f = 10$ cm	$h_f = 7$ cm	$h_f = 5$ cm	$h_f = 10$ cm	$h_f = 7$ cm	$h_f = 5$ cm
Mx	12,67	11,28	10,36	36,28	32,78	30,45
Mdx	17,74	15,80	14,50	50,80	45,89	42,63
My	9,48	8,44	7,75	10,38	9,38	8,71
Mdy	13,27	11,82	10,85	14,53	13,13	12,19

Fonte: Aatoria própria (2023).

Para L1, diminuir h_f de 10 cm para 7 cm corresponde a diminuir Mdx em 12%, e para 5 cm em 18%. Já para L2, diminuir h_f de 10 cm para 7cm corresponde a diminuir Mdx em 10% e para 5 cm em 16%.

Conforme é diminuída a espessura da mesa, tem-se a diminuição da altura total da laje e, conseqüentemente, o aumento da área de aço para que se possa compensar a capacidade de absorver os carregamentos impostos à laje, conforme apresentado pela Tabela 15. Então, apesar de os momentos fletores solicitantes serem maiores para um h_f maior, a diminuição de h_f acarreta uma necessidade de maior área de armadura.

Tabela 15 - Área de Aço: Análise 1

Área de Aço L1 (cm ² /m)				Área de Aço L2 (cm ² /m)			
	hf = 10 cm	hf = 7 cm	hf = 5 cm		hf = 10 cm	hf = 7 cm	hf = 5 cm
Asx	2,40	2,71	2,90	Asx	7,17	8,20	9,24
Asy	1,91	2,18	2,37	Asy	2,09	2,42	2,66
Asminx	1,64	1,39	1,22	Asminx	1,64	1,39	1,22
Asminy	1,22	1,04	0,91	Asminy	1,22	1,04	0,91

Fonte: Autoria própria (2023).

Para L1, diminuir hf de 10 cm para 7 cm corresponde a aumentar Asx em 11%, e para 5 cm em 17%. Já para L2, diminuir hf de 10 cm para 7cm corresponde a aumentar Asx em 13% e para 5 cm em 22%.

4.1.2. Análise 2 – variação do bloco de EPS

A análise 2 possui resistência à compressão simples e valor constante em 25MPa e espessura da mesa em 7 cm, variando apenas as dimensões do bloco de enchimento entre 10x30x30cm, 10x40x40cm e 10x50x50cm.

Aumentando as dimensões do bloco de enchimento, há a redução do consumo de concreto na estrutura e conseqüentemente também a redução do peso próprio da mesma, independente do λ da laje, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Carregamentos: Análise 2

	Carregamentos L1 (kN/m ²)			Carregamentos L2 (kN/m ²)		
	EPS 30x30x10	EPS 40x40x10	EPS 50x50x10	EPS 30x30x10	EPS 40x40x10	EPS 50x50x10
Pparede	0,75	0,75	0,75	1,66	1,66	1,66
Prevestimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Psobrecarga	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Ppróprio	2,86	2,67	2,53	2,86	2,67	2,53
Carga Total	6,11	5,91	5,78	7,02	6,83	6,69

Fonte: Autoria própria (2023).

Para as lajes L1 e L2, o aumento do bloco de EPS acarreta na diminuição de cerca de 5% do peso próprio das mesmas.

Os momentos refletem o mesmo comportamento dos carregamentos, conforme maior o bloco de enchimento, menor são os valores dos momentos sobre as lajes, de acordo com a Tabela 17.

Tabela 17 - Momentos: Análise 2

	Momentos L1 (kN/m ²)			Momentos L2 (kN/m ²)		
	EPS 30x30x10	EPS 40x40x10	EPS 50x50x10	EPS 30x30x10	EPS 40x40x10	EPS 50x50x10
Mx	11,28	10,93	10,68	32,78	31,89	31,26
Mdx	15,80	15,30	14,95	45,89	44,64	43,76
My	8,44	8,18	7,99	9,38	9,12	8,94
Mdy	11,82	11,45	11,19	13,13	12,77	12,52

Fonte: Autoria própria (2023).

De maneira similar aos carregamentos, também há proporção na redução dos momentos fletores tanto para L1 quanto para L2.

Quando há o aumento das dimensões do bloco de enchimento, há também a diminuição do consumo de concreto e conseqüentemente há a redução da área de aço no dimensionamento da laje, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Área de Aço: Análise 2

	Área de Aço L1 (cm ² /m)			Área de Aço L2 (cm ² /m)		
	EPS 30x30x10	EPS 40x40x10	EPS 50x50x10	EPS 30x30x10	EPS 40x40x10	EPS 50x50x10
Asx	2,71	2,62	2,56	8,20	7,97	7,81
Asy	2,18	2,11	1,98	2,42	2,36	2,31
Asminx	1,39	1,31	1,24	1,39	1,31	1,24
Asminy	1,04	0,97	0,93	1,04	1,59	1,56

Fonte: Autoria própria (2023).

Tanto para L1 quanto para L2 é possível reduzir o consumo de aço em 3% a 5% conforme de aumenta as dimensões do bloco de EPS.

4.1.3. Análise 3 – variação do f_{ck} do concreto

Na análise 3, há a variação da resistência à compressão simples com valores de 25 MPa, 30 MPa e 35 MPa. A espessura da mesa fixa em 7 cm e bloco de enchimento com dimensões de 10x30x30 cm.

Quando não há a variação de espessura da mesa ou das dimensões do bloco de enchimento, também não há variações nos carregamentos e momentos atuantes, conforme apresentado na Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 19 - Carregamentos: Análise 3

	Carregamentos L1 (kN/m ²)			Carregamentos L2 (kN/m ²)		
	fck 25 MPa	fck 30 MPa	fck 35 MPa	fck 25 MPa	fck 30 MPa	fck 35 MPa
Pparede	0,75	0,75	0,75	1,66	1,66	1,66
Prevestimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Psobrecarga	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Ppróprio	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86
Carga Total	6,11	6,11	6,11	7,02	7,02	7,02

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 20 - Momentos: Análise 3

	Momentos $\lambda=1,16$ (KN/m ²)			Momentos $\lambda=1,86$ (KN/m ²)		
	fck 25MPa	fck 30MPa	fck 35MPa	fck 25MPa	fck 30MPa	fck 35MPa
Mx	11,28	11,28	11,28	32,78	32,78	32,78
Mdx	15,80	15,80	15,80	45,89	45,89	45,89
My	8,44	8,44	8,44	9,38	9,38	9,38
Mdy	11,82	11,82	11,82	13,13	13,13	13,13

Fonte: Autoria própria (2023).

Apenas com a variação da resistência do concreto à compressão simples não é possível identificar alterações significativas na área de aço, isso devido aos valores de k_{ax} e k_{ay} serem muito parecidos ou até mesmo iguais. As alterações mais visíveis se encontram nas áreas de armaduras mínimas, as quais aumentam de acordo com o aumento do f_{ck} , isso devido a variação da taxa de armadura mínima estar

relacionada a mesma, conforme apresentado na Tabela 9. As variações de área de aço podem ser visualizadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Área de Aço: Análise 3

Área de Aço L1 (cm ² /m)				Área de Aço L2 (cm ² /m)			
	fck 25MPa	fck 30MPa	fck 35MPa		fck 25MPa	fck 30MPa	fck 35MPa
Asx	2.71	2.60	2.60	Asx	8.20	8.20	7.87
Asy	2.18	2.09	2.09	Asy	2.42	2.32	2.32
Asminx	1.39	1.60	1,86	Asminx	1.39	1.60	1,86
Asminy	1.04	1.19	1.39	Asminy	1.04	1.64	1.57

Fonte: Autoria própria (2023).

A variação do fck resulta em uma diminuição de 4% no consumo da armadura.

4.1.4. Análise 4 – variação do f_{ck} do concreto e espessura da mesa

Na análise 4 há uma variação de duas das principais características do dimensionamento, a resistência à compressão do concreto e a espessura da mesa. O fck varia entre 25 MPa a 35 MPa, a espessura entre 5 cm a 10 cm e a dimensão do bloco de enchimento permanece inalterada em 10x30x30cm.

Os carregamentos e momentos atuantes são os mesmos apresentados na Tabela 13 e 14.

Ao realizar duas alterações combinadas, é possível identificar que mesmo aumentando a resistência do concreto à compressão simples não é possível diminuir a espessura da mesa sem acarretar em acréscimos na área de aço.

Tabela 22 - Área de Aço: Análise 4

Área de Aço L1 (cm ² /m)				Área de Aço L2 (cm ² /m)			
	fck 25MPa hf = 10 cm	fck 30MPa hf = 7 cm	fck 35MPa hf = 5 cm		fck 25MPa hf = 10 cm	fck 30MPa hf = 7 cm	fck 35MPa hf = 5 cm
Asx	2.40	2.60	2.90	Asx	7.17	8.20	8.88
Asy	1.91	2.09	2.27	Asy	2.09	2.32	2.66
Asminx	1.64	1.60	1.64	Asminx	1.64	1.64	1.78
Asminy	1.22	1.19	1.22	Asminy	1.22	1.19	1.22

Fonte: Autoria própria (2023).

A redução da espessura da mesa e o aumento da resistência a compressão do concreto resultou em um acréscimo nas armaduras de 7 a 17% respectivamente.

A Tabela 23 unifica os resultados para uma melhor visualização do consumo de aço para cada análise.

Tabela 23 - Unificação dos Resultados

Área de Aço L1 (cm ² /m)				Área de Aço L2 (cm ² /m)			
	hf = 10cm	hf = 7cm	hf = 5cm		hf = 10cm	hf = 7cm	hf = 5cm
Asx	2.40	2.71	2.90	Asx	7.17	8.20	9.24
Asy	1.91	2.18	2.37	Asy	2.09	2.42	2.66
Asminx	1.64	1.39	1.22	Asminx	1.64	1.39	1.22
Asminy	1.22	1.04	0.91	Asminy	1.22	1.04	0.91
	fck 25MPa	fck 30MPa	fck 35MPa		fck 25MPa	fck 30MPa	fck 35MPa
Asx	2.71	2.60	2.60	Asx	8.20	8.20	7.87
Asy	2.18	2.09	2.09	Asy	2.42	2.32	2.32
Asminx	1.39	1.60	1.86	Asminx	1.39	1.60	1.86
Asminy	1.04	1.19	1.39	Asminy	1.04	1.64	1.57
	EPS 30x30x10	EPS 40x40x10	EPS 50x50x10		EPS 30x30x10	EPS 40x40x10	EPS 50x50x10
Asx	2.71	2.62	2.56	Asx	8.20	7.97	7.81
Asy	2.18	2.11	1.98	Asy	2.42	2.36	2.31
Asminx	1.39	1.31	1.24	Asminx	1.39	1.31	1.24
Asminy	1.04	0.97	0.93	Asminy	1.04	1.59	1.56
	fck 25MPa hf = 10cm	fck 30MPa hf = 7cm	fck 35MPa hf = 5cm		fck 25MPa hf = 10cm	fck 30MPa hf = 7cm	fck 35MPa hf = 5cm
Asx	2.40	2.60	2.90	Asx	7.17	8.20	8.88
Asy	1.91	2.09	2.27	Asy	2.09	2.32	2.66
Asminx	1.64	1.60	1.64	Asminx	1.64	1.64	1.78
Asminy	1.22	1.19	1.22	Asminy	1.22	1.19	1.22

Fonte: Autoria própria (2023).

Com base nos resultados apresentados acima, é possível destacar que as lajes armadas em duas direções ou próximas as armadas em uma direção ($\lambda=1,86$) apresentem o mesmo desempenho conforme as variações das análises.

É possível observar que variando apenas a resistência à compressão do concreto, não há alteração nos carregamentos e momentos atuantes sobre a laje e conseqüentemente poucas variações quanto a área de aço a ser consumida. Porém, quando há uma variação combinada entre a resistência à compressão do concreto e a espessura da mesa, há acréscimo na área de aço. O aumento do f_{ck} pode não resultar em benefícios significativos devido ao custo adicional envolvido, o que, por sua vez, também requer uma área de aço maior à medida que a espessura da mesa diminui.

As análises 1 e 2, trazem vantagens quanto à redução do peso próprio da estrutura e conseqüentemente redução nos carregamentos e momentos totais atuantes sobre a laje. Tal aspecto é relevante para o dimensionamento dos elementos estruturais adicionais, como vigas e pilares. Isso ocorre porque as cargas provenientes das lajes são transferidas para as vigas e, conseqüentemente, para os pilares. Em outras palavras, à medida que o peso próprio das lajes aumenta, esses elementos precisarão ter uma seção transversal mais robusta.

A primeira variação ($h_f = 10$ cm; f_{ck} 25 MPa e EPS de 10x30x30 cm) da análise 1 apresentou a menor área de aço devido também apresentar a maior altura útil (d). Mas as demais variações $h_f = 7$ cm e $h_f = 5$ cm, da mesma análise, há o aumento gradual da área de aço isso devido a interferência da espessura da mesa na altura útil da laje. Já na análise 2, conforme há o aumento das dimensões do bloco de enchimento, é possível também realizar a redução da área de aço. Caso mantenham o mesmo desempenho com blocos de enchimentos cada vez maiores, podem apresentar em um geral, ser a melhor combinação analisadas uma vez que também apresentaram os menores valores de momentos fletores.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, o estudo bibliográfico contemplou um sistema estrutural amplamente reconhecido e empregado na indústria da construção civil, as lajes nervuradas, fornecendo informações sobre seus métodos de cálculo para dimensionamento, bem como suas vantagens e desvantagens.

O tema foi abordado de maneira a comparar como a resistência à compressão simples do concreto, a espessura da mesa e as dimensões do bloco de enchimento influenciam a área de aço durante o dimensionamento estrutural de lajes nervuradas. Ao longo do trabalho, foi possível observar a importância de um estudo detalhado para determinar a combinação mais adequada e como a escolha desses parâmetros afeta diretamente os carregamentos decorrentes do peso próprio da estrutura bem como o consumo de aço.

Os cálculos foram executados por meio de planilhas, de modo que fosse possível realizar os comparativos entre as respectivas análises. Os resultados neste estudo indicam que as combinações têm um comportamento similar, independentemente do parâmetro (λ) da laje.

A primeira variação da análise 1 apresentou o menor consumo de aço, por mais que não tenha apresentado o menor valor de carregamento proveniente ao peso próprio bem como o menor valor referente ao momento fletor, isso devido a apresentar o maior valor de altura útil (d) que impacta diretamente no cálculo da área de armadura.

Assim, pode-se afirmar que os objetivos geral e específico foram alcançados, uma vez que foi possível verificar que para a laje em questão, o aumento nas dimensões do bloco de EPS apresentaram valores mais baixos de peso próprio, momentos fletores, e também tendem reduzir constantemente da área de aço. A redução dos carregamentos conseqüentemente apresenta em uma economia no nos demais elementos estruturais, como vigas e pilares.

5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuras pesquisas, recomenda-se:

- Selecionar o diâmetro das armaduras e a respectiva quantidade de barras, além de conduzir uma comparação de custos;
- Verificar duas novas análises: variação da altura da nervura e variação da espessura da nervura;
- Realizar uma combinação entre as melhores soluções encontradas para cada análise, a fim de avaliar a análise com a melhor relação custo-benefício.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. S.; ARAÚJO, L. A. F. Lajes nervuradas com enchimento de poliestireno expandido (EPS): uma análise térmica. **Revista de Engenharia Civil**, v. 31, n. 2, p. 30-39, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: ABNT 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014
- BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto armado**. 2019. Tese (Doutorado Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.
- BELLEI, Lidony H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O. **Edifícios de Múltiplos Andares em aço**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008. ISBN 978-85-7266-184-3.
- BENNACK, V. **Apostila de concreto armado**. 2022. Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- CARVALHO, R. C; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo NBR 6118:2014**. 4. ed., São Carlos: Edufscar, 2014.
- COELHO, R. A. **Concreto armado na prática**. São Luiz: UEMA, 2008.
- FRANÇA, A.B.M.; FUSCO, P.B. **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios**. São Paulo, AFALA & ABRAPEX, 1997.
- NILSON, A. H. et al. **Projeto de estruturas de concreto**. 1.^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- NILSON, A. H.; DARWIN, D.; DOLAN, C. W. **Design of concrete structures**. 14. ed., McGraw Hill Higher Education, 2010.
- OLIVEIRA, C. M. et al. Estudo comparativo de ensaios de tração direta e flexão prismática na determinação da resistência à tração do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 2, p. 425-448, 2017.
- OLIVEIRA, J. T; MACEDO, P. F. **Análise comparativa entre lajes maciças convencionais e lajes nervuradas**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2020.
- SANTOS, R. E. **A armação do concreto armado no Brasil: História da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. 2008. Tese

do programa de pós-graduação em educação – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. Tese (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SOUSA, R. C.; ANDRADE, R. B.; LIMA, R. A. Determinação do módulo de elasticidade do concreto por meio do ensaio de ultrassom. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n.3, p. 392-405, 2015.

SPOHR, Valdi Henrique. **Análise Comparativa: Sistemas Estruturais Convencionais e Estruturas de Lajes Nervuradas**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

STRAMANDINOLI, Juliana Sá Brito. **Contribuições à Análise de Lajes Nervuradas Por Analogia De Grelha**. 2003. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

VASCONCELOS, A. C. O concreto no Brasil: recordes, realizações, história. 2. ed., São Paulo: Pini, 1985.

APÊNDICE A – Roteiro de Cálculo

1. ROTEIRO DE CALCULO – ANÁLISE 1

1.1. ESPESSURA $H_f = 10$ cm

1.1.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	25,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Y_c	25,00	kNm ²
Y_{eps}	0,30	kNm ²
$Y_{cerâmica}$	13,00	kNm ²
Y_{reboco}	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,1	m
h	0,2	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m
quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	30	largura (cm)
	30	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	cm
ly	720	cm
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

1.1.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 * 0,10 * 3,00 * 13,00) + (4,40 * 0,02 * 2,00 * 3,00 * 20,00))}{6,20 * 7,20} * 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right]$$

$$P_{próprio} = 25,00 * 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{30 + 10} * \frac{100}{30 + 10} * 0,30 * 0,30 * (0,20 - 0,10) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 3,61 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{total} = P_{parede} + P_{vestimento} + P_{sobrecarga} + P_{próprio}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 3,61 = 6,86 \text{ kN/m}^2$$

1.1.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,86 * 6,20^2}{20,80} = 12,67 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 12,67 * 1,40 = 17,74 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,86 * 6,20^2}{27,80} = 9,48 \text{ kN}$$

$$M_{dy} = 9,48 * 1,40 = 13,27 \text{ kN}$$

1.1.4. Armadura

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 17^2}{17,74} = 16,29$$

$$K_{ax} = 0,023$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 16^2}{13,27} = 19,29$$

$$K_{ay} = 0,023$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,023 * 17,74}{17} = 2,40 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,023 * 13,27}{16} = 1,91 \text{ cm}^2/\text{m}$$

1.2. ESPESSURA Hf = 7 cm

1.2.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	25,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Yc	25,00	kNm ²
Yeps	0.30	kNm ²
Ycerâmica	13,00	kNm ²
Yreboco	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,07	m
h	0,17	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m
quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	30	largura (cm)
	30	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	m
ly	720	m
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

1.2.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 * 0,10 * 3,00 * 13,00) + (4,40 * 0,02 * 2,00 * 3,00 * 20,00))}{6,20 * 7,20} * 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right]$$

$$P_{próprio} = 25,00 * 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{30 + 10} * \frac{100}{30 + 10} * 0,30 * 0,30 * (0,17 - 0,07) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 2,86 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{total} = P_{parede} + P_{vestimento} + P_{sobrecarga} + P_{próprio}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 2,86 = 6,11 \text{ kN/m}^2$$

1.2.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,11 * 6,20^2}{20,80} = 11,28 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 11,28 * 1,40 = 15,80 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,11 * 6,20^2}{27,80} = 8,44 \text{ kN}$$

$$M_{dy} = 8,44 * 1,40 = 11,82 \text{ kN}$$

1.2.4. Armaduras

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 14^2}{15,80} = 12,41$$

$$K_{ax} = 0,024$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 13^2}{11,82} = 14,30$$

$$K_{ay} = 0,024$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 15,80}{14} = 2,71 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 11,82}{13} = 2,18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

1.3. ESPESSURA Hf = 5 cm

1.3.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	25,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Yc	25,00	kNm ²
Yeps	0,30	kNm ²
Ycerâmica	13,00	kNm ²
Yreboco	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,05	m
h	0,15	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m
quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	30	largura (cm)
	30	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	m
ly	720	m
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

1.3.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 * 0,10 * 3,00 * 13,00) + (4,40 * 0,02 * 2,00 * 3,00 * 20,00))}{6,20 * 7,20} * 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right]$$

$$P_{próprio} = 25,00 * 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{30 + 10} * \frac{100}{30 + 10} * 0,30 * 0,30 * (0,15 - 0,05) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 2,36 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{total} = P_{parede} + P_{vestimento} + P_{sobrecarga} + P_{próprio}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 2,36 = 5,61 \text{ kN/m}^2$$

1.3.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{5,61 * 6,20^2}{20,80} = 10,36 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 10,36 * 1,40 = 14,50 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{qlx^2}{m} = \frac{5,61 * 6,20^2}{27,80} = 7,75 \text{ kN}$$

$$M_{dy} = 7,75 * 1,40 = 10,85 \text{ kN}$$

1.3.4. Armaduras

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 12^2}{14,50} = 9,93$$

$$K_{ax} = 0,024$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 11^2}{10,85} = 11,15$$

$$K_{ay} = 0,024$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 14,50}{12} = 2,90 \text{ cm}^2/m$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 10,85}{11} = 2,37 \text{ cm}^2/m$$

2. ROTEIRO DE CALCULO – ANÁLISE 2

2.1. BLOCO EPS 30x30x10 cm

2.1.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	25,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Yc	25,00	kNm ²
Yeps	0,30	kNm ²
Ycerâmica	13,00	kNm ²
Yreboco	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,07	m
h	0,17	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m
quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	30	largura (cm)
	30	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	m
ly	720	m
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

2.1.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 * 0,10 * 3,00 * 13,00) + (4,40 * 0,02 * 2,00 * 3,00 * 20,00))}{6,20 * 7,20} * 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right]$$

$$P_{próprio} = 25,00 * 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{30 + 10} * \frac{100}{30 + 10} * 0,30 * 0,30 * (0,17 - 0,07) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 2,86 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{total} = P_{parede} + P_{vestimento} + P_{sobrecarga} + P_{próprio}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 2,86 = 6,11 \text{ kN/m}^2$$

2.1.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,11 * 6,20^2}{20,80} = 11,28 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 11,28 * 1,40 = 15,80 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,11 * 6,20^2}{27,80} = 8,44 \text{ kN}$$

$$M_{dy} = 8,44 * 1,40 = 11,82 \text{ kN}$$

2.1.4. Armaduras

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 14^2}{15,80} = 12,41$$

$$K_{ax} = 0,024$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 13^2}{11,82} = 14,30$$

$$K_{ay} = 0,024$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 15,80}{14} = 2,71 \text{ cm}^2/m$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 11,82}{13} = 2,18 \text{ cm}^2/m$$

2.2. BLOCO EPS 40x40x10 cm

2.2.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	25,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Yc	25,00	kNm ²
Yeps	0,30	kNm ²
Ycerâmica	13,00	kNm ²
Yreboco	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,07	m
h	0,17	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m
quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	40	largura (cm)
	40	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	m
ly	720	m
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

2.2.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 * 0,10 * 3,00 * 13,00) + (4,40 * 0,02 * 2,00 * 3,00 * 20,00))}{6,20 * 7,20} * 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right]$$

$$P_{próprio} = 25,00 * 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{40 + 10} * \frac{100}{40 + 10} * 0,40 * 0,40 * (0,17 - 0,07) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 2,67 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{total} = P_{parede} + P_{vestimento} + P_{sobrecarga} + P_{próprio}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 2,67 = 5,91 \text{ kN/m}^2$$

2.2.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{5,91 * 6,20^2}{20,80} = 10,93 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 10,93 * 1,40 = 15,30 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{qlx^2}{m} = \frac{5,91 * 6,20^2}{27,80} = 8,18 \text{ kN}$$

$$M_{dy} = 8,18 * 1,40 = 11,45 \text{ kN}$$

2.2.4. Armaduras

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 14^2}{15,30} = 12,81$$

$$K_{ax} = 0,024$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 13^2}{11,45} = 14,76$$

$$K_{ay} = 0,024$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 15,30}{14} = 2,62 \text{ cm}^2/m$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 11,45}{13} = 2,11 \text{ cm}^2/m$$

2.3. BLOCO EPS 50x50x10 cm

2.3.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	25,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Yc	25,00	kNm ²
Yeps	0,30	kNm ²
Ycerâmica	13,00	kNm ²
Yreboco	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,07	m
h	0,17	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m
quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	50	largura (cm)
	50	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	m
ly	720	m
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

2.3.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 * 0,10 * 3,00 * 13,00) + (4,40 * 0,02 * 2,00 * 3,00 * 20,00))}{6,20 * 7,20} * 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right]$$

$$P_{próprio} = 25,00 * 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{50 + 10} * \frac{100}{50 + 10} * 0,50 * 0,50 * (0,17 - 0,07) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 2,53 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{total} = P_{parede} + P_{vestimento} + P_{sobrecarga} + P_{próprio}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 2,53 = 5,78 \text{ kN/m}^2$$

2.3.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{5,78 * 6,20^2}{20,80} = 10,68 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 10,68 * 1,40 = 14,95 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{qlx^2}{m} = \frac{5,78 * 6,20^2}{27,80} = 7,99 \text{ kN}$$

$$M_{dy} = 7,99 * 1,40 = 11,19 \text{ kN}$$

2.3.4. Armaduras

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 14^2}{14,95} = 13,11$$

$$K_{ax} = 0,024$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 13^2}{11,19} = 15,10$$

$$K_{ay} = 0,023$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 14,95}{14} = 2,56 \text{ cm}^2/m$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,023 * 11,19}{13} = 1,98 \text{ cm}^2/m$$

3. ROTEIRO DE CALCULO – ANÁLISE 3

3.1. FCK 25 MPa

3.1.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	25,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Yc	25,00	kNm ²
Yeps	0,30	kNm ²
Ycerâmica	13,00	kNm ²
Yreboco	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,07	m
h	0,17	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m
quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	30	largura (cm)
	30	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	m
ly	720	m
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

3.1.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 * 0,10 * 3,00 * 13,00) + (4,40 * 0,02 * 2,00 * 3,00 * 20,00))}{6,20 * 7,20} * 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right]$$

$$P_{próprio} = 25,00 * 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{30 + 10} * \frac{100}{30 + 10} * 0,30 * 0,30 * (0,17 - 0,07) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 2,86 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{total} = P_{parede} + P_{vestimento} + P_{sobrecarga} + P_{próprio}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 2,86 = 6,11 \text{ kN/m}^2$$

3.1.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,11 * 6,20^2}{20,80} = 11,28 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 11,28 * 1,40 = 15,80 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,11 * 6,20^2}{27,80} = 8,44 \text{ kN}$$

$$M_{dy} = 8,44 * 1,40 = 11,82 \text{ kN}$$

3.1.4. Armaduras

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 14^2}{15,80} = 12,41$$

$$K_{ax} = 0,024$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 13^2}{11,82} = 14,30$$

$$K_{ay} = 0,024$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 15,80}{14} = 2,71 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 11,82}{13} = 2,18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

3.2. FCK 30MPa

3.2.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	30,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Yc	25,00	kNm ²
Yeps	0.30	kNm ²
Ycerâmica	13,00	kNm ²
Yreboco	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,07	m
h	0,17	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m
quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	30	largura (cm)
	30	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	m
ly	720	m
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

3.2.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 * 0,10 * 3,00 * 13,00) + (4,40 * 0,02 * 2,00 * 3,00 * 20,00))}{6,20 * 7,20} \cdot 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{\text{próprio}} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{\text{concreto}} - \gamma_{\text{EPS}}) \right]$$

$$P_{\text{próprio}} = 25,00 \cdot 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{30 + 10} \cdot \frac{100}{30 + 10} \cdot 0,30 \cdot 0,30 \cdot (0,17 - 0,07) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 2,86 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{\text{total}} = P_{\text{parede}} + P_{\text{ revesti mento}} + P_{\text{ sobrecarga}} + P_{\text{ próprio}}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 2,86 = 6,11 \text{ kN/m}^2$$

3.2.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,11 \cdot 6,20^2}{20,80} = 11,28 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 11,28 \cdot 1,40 = 15,80 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{qlx^2}{m} = \frac{6,11 \cdot 6,20^2}{27,80} = 8,44 \text{ kN}$$

$$M_{dy} = 8,44 \cdot 1,40 = 11,82 \text{ kN}$$

3.2.4. Armaduras

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 \cdot 14^2}{15,80} = 12,41$$

$$K_{ax} = 0,023$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 \cdot 13^2}{11,82} = 14,30$$

$$K_{ay} = 0,023$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,023 \cdot 15,80}{14} = 2,60 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,023 * 11,82}{13} = 2,09 \text{ cm}^2/\text{m}$$

3.3. FCK 35MPa

Os cálculos realizados para o fck 35MPa são os mesmos apresentados no tópico 3.2. FCK 30MPa

4. ROTEIRO DE CALCULO – ANÁLISE 4

4.1. FCK 25MPa E HF = 10 cm

Os cálculos do dimensionamento para fck 25MPa e hf = 10 cm foram apresentados no tópico 1.1.

4.2. FCK 30MPa E HF = 7 cm

Os cálculos do dimensionamento para fck 30MPa e hf = 10 cm foram apresentados no tópico 3.2.

4.3. FCK 35MPa E HF = 5 cm

4.3.1. Dados de Entrada

Dados de Entrada		
fck	35,00	MPa
cobrimento	2,50	cm
Aço	CA50	
Yc	25,00	kNm ²
Yeps	0.30	kNm ²
Ycerâmica	13,00	kNm ²
Yreboco	20,00	kNm ²
bw	10,00	cm
hf	0,05	m
h	0,15	m
perimetro de paredes	4,40	m
espessura de reboco	0,02	m

quantidade de lados com reboco	2,00	und
espessura cerâmica	0,1	m
Bloco EPS	10	altura (cm)
	30	largura (cm)
	30	espessura (cm)
pé direito	3,00	m
lx	620	m
ly	720	m
λ	1,16	-
mx	20,8	
my	27,8	

4.3.2. Cargas Atuantes

$$P_{parede} = \frac{((V_{parede} \cdot \gamma_{cerâmica}) + (V_{reboco} \cdot \gamma_{reboco}))}{lx \cdot ly} \cdot 1,20$$

$$P_{parede} = \frac{((4,40 \cdot 0,10 \cdot 3,00 \cdot 13,00) + (4,40 \cdot 0,02 \cdot 2,00 \cdot 3,00 \cdot 20,00))}{6,20 \cdot 7,20} \cdot 1,20$$

$$= 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{próprio} = \gamma_c \cdot h - \left[\frac{100}{tx + b'} \cdot \frac{100}{ty + b'} \cdot tx \cdot ty \cdot (h - hf) \cdot (\gamma_{concreto} - \gamma_{EPS}) \right]$$

$$P_{próprio} = 25,00 \cdot 0,20$$

$$- \left[\frac{100}{30 + 10} \cdot \frac{100}{30 + 10} \cdot 0,30 \cdot 0,30 \cdot (0,15 - 0,05) \cdot (25,00 - 0,30) \right]$$

$$= 2,36 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{total} = P_{parede} + P_{vestimento} + P_{sobrecarga} + P_{próprio}$$

$$= 0,75 + 1,00 + 1,50 + 2,36 = 5,61 \text{ kN/m}^2$$

4.3.3. Momentos Atuantes

$$M_x = \frac{qlx^2}{m} = \frac{5,61 \cdot 6,20^2}{20,80} = 10,36 \text{ kN}$$

$$Mdx = 10,36 * 1,40 = 14,50 \text{ kN}$$

$$My = \frac{qlx^2}{m} = \frac{5,61 * 6,20^2}{27,80} = 7,75 \text{ kN}$$

$$Mdy = 7,75 * 1,40 = 10,85 \text{ kN}$$

4.3.4. Armaduras

$$K_{mx} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 12^2}{14,50} = 9,93$$

$$K_{ax} = 0,024$$

$$K_{my} = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1 * 11^2}{10,85} = 11,15$$

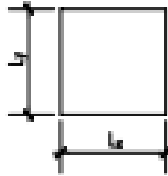
$$K_{ay} = 0,023$$

$$A_{sx} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,024 * 14,50}{12} = 2,90 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{sy} = \frac{K_a M_d}{d} = \frac{0,023 * 10,85}{11} = 2,27 \text{ cm}^2/\text{m}$$

ANEXO A – TABELAS DE MARCUS PARA O CÁLCULO DE MOMENTOS PARA LAJES ARMADAS EM CRUZ

LAJE TIPO 1



$$M_x = \frac{q l_x^2}{m_x} \quad M_y = \frac{q l_y^2}{m_y} \quad q_x = k_x q \quad q_y = q - q_x$$

$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	m_x	m_y	k_x	$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	m_x	m_y	k_x
1,00	27,4	27,4	0,500	1,50	13,9	31,3	0,838
1,01	27,0	27,4	0,509	1,51	13,8	31,4	0,838
1,02	26,5	27,4	0,519	1,52	13,7	31,6	0,842
1,03	26,0	27,4	0,528	1,53	13,6	31,8	0,845
1,04	25,6	27,5	0,538	1,54	13,5	31,9	0,848
1,05	25,1	27,5	0,547	1,55	13,4	32,1	0,851
1,06	24,6	27,5	0,556	1,56	13,3	32,3	0,855
1,07	24,2	27,5	0,566	1,57	13,2	32,4	0,858
1,08	23,7	27,5	0,575	1,58	13,1	32,6	0,861
1,09	23,2	27,6	0,585	1,59	13,0	32,8	0,865
1,10	22,8	27,6	0,594	1,60	12,9	33,0	0,868
1,11	22,4	27,6	0,602	1,61	12,8	33,2	0,870
1,12	22,1	27,7	0,610	1,61	12,7	33,4	0,873
1,13	21,8	27,7	0,618	1,63	12,6	33,6	0,875
1,14	21,4	27,8	0,626	1,64	12,5	33,8	0,878
1,15	21,1	27,8	0,634	1,65	12,4	34,0	0,880
1,16	20,8	27,8	0,643	1,6	12,4	34,2	0,883
1,17	20,4	27,9	0,651	1,67	12,3	34,4	0,885
1,18	20,1	27,9	0,659	1,68	12,2	34,6	0,888
1,19	19,8	27,9	0,667	1,69	12,1	34,8	0,890
1,20	19,4	28,0	0,675	1,70	12,0	35,0	0,893
1,21	19,2	28,1	0,682	1,71	12,0	35,2	0,895
1,22	19,0	28,2	0,688	1,72	11,8	35,5	0,897
1,23	18,7	28,3	0,695	1,73	11,8	35,7	0,899
1,24	18,5	28,4	0,701	1,74	11,7	35,9	0,901
1,25	18,2	28,4	0,708	1,75	11,7	36,2	0,903
1,26	18,0	28,5	0,715	1,76	11,6	36,4	0,905
1,27	17,7	28,6	0,721	1,77	11,5	36,7	0,907
1,28	17,5	28,7	0,728	1,78	11,5	36,9	0,909
1,29	17,2	28,8	0,734	1,79	11,4	37,1	0,911
1,30	17,0	28,8	0,741	1,80	11,4	37,4	0,913
1,31	16,8	28,9	0,748	1,81	11,4	37,6	0,915
1,32	16,7	29,0	0,752	1,82	11,3	37,8	0,918
1,34	16,3	29,2	0,762	1,84	11,2	38,3	0,919
1,35	16,1	29,3	0,767	1,85	11,2	38,5	0,921
1,36	16,0	29,5	0,773	1,86	11,1	38,8	0,923
1,37	15,8	29,78	0,778	1,87	11,1	39,0	0,924
1,38	15,6	29,7	0,783	1,88	11,0	39,2	0,926
1,39	15,4	29,8	0,789	1,89	11,0	39,5	0,927
1,40	15,2	29,9	0,794	1,90	11,0	39,7	0,929
1,41	15,1	30,0	0,798	1,91	10,9	40,0	0,930
1,42	14,9	30,2	0,802	1,92	10,9	40,2	0,932
1,43	14,8	30,3	0,806	1,93	10,8	40,5	0,933
1,4	14,7	30,5	0,810	1,94	10,8	40,8	0,934
1,45	14,5	30,6	0,814	1,95	10,8	40,0	0,935
1,46	14,4	30,7	0,819	1,96	10,7	41,3	0,936

ANEXO B – RELAÇÃO KM E KA

TABELA DE DIMENSIONAMENTO PARA SEÇÃO RETANGULAR (KN, cm)													
Ky	Kx	Kz	Km								Ka		
			fck50	fck45	fck40	fck35	fck30	fck 25	fck 20	fck15	CA25	CA50	CA60
0,010	0,013	0,995	33,107	36,785	41,383	47,295	55,178	66,213	82,767	110,356	0,046	0,023	0,019
0,020	0,025	0,990	16,637	18,486	20,796	23,767	27,728	33,274	41,592	55,457	0,046	0,023	0,019
0,030	0,038	0,985	11,148	12,386	13,935	15,925	18,579	22,295	27,869	37,159	0,047	0,023	0,019
0,040	0,050	0,980	8,403	9,337	10,504	12,005	14,006	16,807	21,008	28,011	0,047	0,023	0,020
0,050	0,063	0,975	6,757	7,508	8,446	9,653	11,262	13,514	16,893	22,524	0,047	0,024	0,020
0,060	0,075	0,970	5,660	6,289	7,075	8,086	9,433	11,320	14,150	18,867	0,047	0,024	0,020
0,070	0,088	0,965	4,877	5,418	6,096	6,967	8,128	9,753	12,191	16,255	0,048	0,024	0,020
0,080	0,100	0,960	4,289	4,766	5,362	6,127	7,149	8,578	10,723	14,297	0,048	0,024	0,020
0,090	0,113	0,955	3,833	4,258	4,791	5,475	6,388	7,665	9,581	12,775	0,048	0,024	0,020
0,100	0,125	0,950	3,467	3,853	4,334	4,954	5,779	6,935	8,669	11,558	0,048	0,024	0,020
0,110	0,138	0,945	3,169	3,521	3,961	4,527	5,282	6,338	7,922	10,563	0,049	0,024	0,020
0,120	0,150	0,940	2,920	3,245	3,650	4,172	4,867	5,841	7,301	9,734	0,049	0,024	0,020
0,130	0,163	0,935	2,710	3,011	3,388	3,872	4,517	5,420	6,775	9,034	0,049	0,025	0,020
0,140	0,175	0,930	2,530	2,811	3,163	3,614	4,217	5,060	6,325	8,433	0,049	0,025	0,021
0,150	0,188	0,925	2,374	2,638	2,968	3,392	3,957	4,748	5,935	7,914	0,050	0,025	0,021
0,160	0,200	0,920	2,238	2,487	2,797	3,197	3,730	4,476	5,595	7,460	0,050	0,025	0,021
0,170	0,213	0,915	2,118	2,353	2,647	3,025	3,530	4,235	5,294	7,059	0,050	0,025	0,021
0,180	0,225	0,910	2,011	2,235	2,514	2,873	3,352	4,022	5,028	6,704	0,051	0,025	0,021
0,190	0,238	0,905	1,916	2,129	2,395	2,737	3,193	3,831	4,789	6,386	0,051	0,025	0,021
0,200	0,250	0,900	1,830	2,033	2,288	2,614	3,050	3,660	4,575	6,100	0,051	0,026	0,021
0,210	0,263	0,895	1,753	1,947	2,191	2,504	2,921	3,505	4,382	5,842	0,051	0,026	0,021
0,220	0,28	0,89	1,682	1,869	2,103	2,403	2,804	3,365	4,206	5,608	0,052	0,026	0,022
0,230	0,29	0,89	1,618	1,798	2,023	2,312	2,697	3,237	4,046	5,394	0,052	0,026	0,022
0,240	0,300	0,880	1,560	1,733	1,950	2,228	2,600	3,119	3,899	5,199	0,052	0,026	0,022
0,250	0,313	0,875	1,506	1,673	1,882	2,151	2,510	3,012	3,765	5,020	0,053	0,026	0,022
0,260	0,325	0,870	1,456	1,618	1,820	2,080	2,427	2,913	3,641	4,854	0,053	0,026	0,022
0,270	0,338	0,865	1,410	1,567	1,763	2,015	2,351	2,821	3,526	4,702	0,053	0,027	0,022
0,280	0,350	0,860	1,368	1,520	1,710	1,954	2,280	2,736	3,420	4,560	0,053	0,027	0,022
0,290	0,363	0,855	1,329	1,476	1,661	1,898	2,214	2,657	3,321	4,428	0,054	0,027	0,022
0,300	0,375	0,850	1,292	1,435	1,615	1,845	2,153	2,584	3,230	4,306	0,054	0,027	0,023
0,310	0,388	0,845	1,258	1,397	1,572	1,796	2,096	2,515	3,144	4,192	0,054	0,027	0,023
0,320	0,400	0,840	1,225	1,362	1,532	1,751	2,042	2,451	3,064	4,085	0,055	0,027	0,023
0,330	0,413	0,835	1,195	1,328	1,494	1,708	1,992	2,391	2,989	3,985	0,055	0,028	0,023
0,340	0,425	0,830	1,167	1,297	1,459	1,668	1,945	2,335	2,918	3,891	0,055	0,028	0,023
0,350	0,438	0,825	1,141	1,268	1,426	1,630	1,901	2,282	2,852	3,803	0,056	0,028	0,023
0,360	0,450	0,820	1,116	1,240	1,395	1,594	1,860	2,232	2,790	3,720	0,056	0,028	0,023
0,370	0,463	0,815	1,092	1,214	1,365	1,561	1,821	2,185	2,731	3,641	0,056	0,028	0,024
0,380	0,475	0,810	1,070	1,189	1,338	1,529	1,784	2,140	2,676	3,567	0,057	0,028	0,024
0,390	0,488	0,805	1,049	1,166	1,312	1,499	1,749	2,098	2,623	3,497	0,057	0,029	0,024
0,400	0,500	0,800	1,029	1,144	1,284	1,471	1,716	2,059	2,574	3,431	0,058	0,029	0,024
0,410	0,513	0,795	1,011	1,123	1,263	1,444	1,684	2,021	2,527	3,369	0,058	0,029	0,024
0,420	0,525	0,790	0,993	1,103	1,241	1,418	1,655	1,986	2,482	3,309	0,058	0,029	0,024
0,430	0,538	0,785	0,976	1,084	1,220	1,394	1,626	1,952	2,440	3,253	0,059	0,029	0,024
0,440	0,550	0,780	0,960	1,066	1,200	1,371	1,600	1,920	2,400	3,199	0,059	0,029	0,025
0,450	0,563	0,775	0,945	1,049	1,181	1,349	1,574	1,889	2,361	3,148	0,059	0,030	0,025
0,460	0,575	0,770	0,930	1,033	1,163	1,329	1,550	1,860	2,325	3,100	0,060	0,030	0,025
0,470	0,588	0,765	0,916	1,018	1,145	1,309	1,527	1,832	2,290	3,054	0,060	0,030	0,025