

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA**

THALITA LADEIRA DE SOUSA

**A INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO NAS
DEFORMAÇÕES DE LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO**

CARATINGA

2018

THALITA LADEIRA DE SOUSA
FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA

**A INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO NAS
DEFORMAÇÕES DE LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil das Faculdades Doctum de Caratinga, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Concreto armado

Orientador: Prof. MSc Sanderson Dutra Rocha Gouvêa.

CARATINGA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

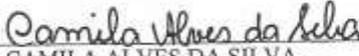
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: A INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO NAS DEFORMAÇÕES DE LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO, elaborado pelo(s) aluno(s) THALITA LADEIRA DE SOUSA foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de ENGENHARIA CIVIL das FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

Caratinga 07/12/2018


SANDERSON DYTIRA ROCHA CORRÊA
Prof. Orientador


SÉRGIO ALVES DOS REIS
Prof. Avaliador 1


CAMILA ALVES DA SILVA
Prof. Examinador 2

Ao Sagrado Coração de Jesus

A meus pais Silvio e Sônia

A meu irmão Thalles

Que são os alicerces da minha vida

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que esteve comigo em todos os momentos, principalmente nas horas mais difíceis. A Sua presença me deu a certeza que a vitória chegaria.

Aos meus pais Silvio e Sônia por todo amor, apoio e confiança, e por não medir esforços para a realização desse sonho.

Ao meu irmão Thalles, por todo amor, carinho e torcida.

A todos os professores, por compartilhar os conhecimentos que foram fundamentais para a minha formação.

Ao orientador Sanderson Dutra, por todo apoio, incentivo e a disponibilidade permanente nas valiosas orientações para o desenvolvimento do trabalho.

Ao coordenador do curso, João Moreira, por sempre atender prontamente e com grande sabedoria em todas as vezes procuradas.

SOUSA, T. L. de. **A influência da resistência à compressão do concreto nas deformações de lajes maciças de concreto armado**. Caratinga, 2018. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Civil – Curso de Engenharia Civil. Faculdades Doctum de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2018.

RESUMO

O concreto é o material mais usado na construção civil, devido as suas características, como disponibilidade de matéria prima, versatilidade, facilidade de execução e durabilidade, além de suportar bem os esforços de compressão. Nos últimos anos o avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de concretos com resistência à compressão maiores que o usual, resultado de longas pesquisas, das exigências estruturais e das tendências de mercado. Entre os elementos estruturais compostos de concreto, as lajes maciças de concreto armado destacam-se por vencerem maiores vãos e suportarem maiores cargas. Por outro lado, as lajes se caracterizam por serem elementos fletidos, sujeitas às deformações. O presente trabalho visa analisar um pavimento de lajes maciças considerando o uso de concreto com resistência característica a compressão de 20 MPa e de 50 MPa, para analisar se o aumento da resistência à compressão do concreto gera uma possível redução de deformações (flechas) sofridas pelas lajes maciças. Para isso, foi feito um levantamento bibliográfico à cerca do tema que serviu de suporte à pesquisa, e pode ser concluído que o concreto C20 apresenta maior viabilidade de ser empregado em lajes maciças de concreto armado.

Palavras-chave: Lajes maciças. Concreto. Deformações.

SOUSA, T. L. de. **The influence of the compressive strength of concrete on the deformations of solid reinforced concrete slabs.** Caratinga, 2018. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Civil – Curso de Engenharia Civil. Faculdades Doctum de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2018.

ABSTRACT

Concrete is the most used material in civil construction, due to its characteristics, such as availability of raw material, versatility, ease of execution and durability, as well as withstand compressive stresses. In recent years technological advances have enabled the development of concrete with higher compressive strength than usual, as a result of long research, structural requirements and market trends. Among the concrete composite structural elements, solid reinforced concrete slabs stand out due to their larger spans and higher loads. On the other hand, slabs are characterized by being bending elements, subject to deformation. The aim of this work is to analyze a solid slab floor considering the use of concrete with a compressive strength of 20 MPa and 50 MPa in order to analyze if the increase in compressive strength of the concrete generates a possible reduction of deformations (arrows) suffered by the massive slabs, seeking to indicate the feasibility of employing a concrete with larger F_{ck} in this structural element.

Key words: Solid slabs. Concrete. Deformations.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parte da tabela de valores dos coeficientes γ_c e γ_s	23
Tabela 2.2: Parte da tabela classe de agressividade ambiental (CAA).....	31
Tabela 2.3: Parte da tabela correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10mm$	31
Tabela 2.4: Parte da tabela peso específico de materiais de construção	34
Tabela 2.5: Parte da tabela valores mínimos das cargas verticais.....	34
Tabela 2.6: Parte da tabela valores do coeficiente γ_{f2}	36
Tabela 2.7: Parte da tabela limites para deslocamentos.....	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Parte do quadro – propriedades mecânicas dos aços.....	27
Quadro 2.2: Parte do quadro – valores de ψ_2	32
Quadro 2.3: Parte do quadro – valores de ψ_3	32
Quadro 2.4: Parte do quadro – coeficientes α para cálculo de flecha elástica	35
Quadro 4.1: Valores de alturas das lajes	41
Quadro 4.2: Valores de carregamentos atuantes nas lajes.....	42
Quadro 4.3: Valores de flechas elásticas para combinação rara considerando o uso do concreto C20	42
Quadro 4.4: Valores de flechas elásticas para combinação rara considerando o uso do concreto C50	43
Quadro 4.5: Valores de flechas elásticas para combinação permanente considerando o uso do concreto C20	43
Quadro 4.6: Valores de flechas elásticas para combinação permanente considerando o uso do concreto C50	44
Quadro 4.7: Valores de flechas elásticas para combinação quase permanente considerando o uso do concreto C20.....	44
Quadro 4.8: Valores de flechas elásticas para combinação quase permanente considerando o uso do concreto C50.....	45
Quadro 4.9: Valores de flechas elásticas para combinação devido a vibrações considerando o uso do concreto C20.....	45
Quadro 4.10: Valores de flechas elásticas para combinação devido a vibrações considerando o uso do concreto C50.....	46

Nenhuma entrada de sumário foi encontrada.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto Armado
cm	Centímetros
c_{\min}	Cobrimento mínimo das armaduras
c_{nom}	Cobrimento nominal das armaduras
d	Altura útil da laje
ELS	Estado-limite de serviço
ELU	Estado-limite último
f	Flecha elástica
g	Carga permanente
h	Altura total da laje
Kg	Quilograma
kN	Quilonewton
l	Menor vão da laje
M	Metro
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
M_r	Momento de fissuração

NBR	Norma Brasileira
p	Carga total
q	Carga acidental
tf	Tonelada força
ρ_c	Massa específica do concreto
λ	relação entre os vãos das lajes
ν	Coefficiente de Poisson do concreto
E_{ci}	Módulo de elasticidade do concreto
E_{cs}	Módulo de deformação secante do concreto
N_{rup}	Carga de ruptura do corpo de prova
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{cj}	Resistência à compressão do corpo de prova do concreto na idade de (j) dias
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{ckj}	Resistência característica à compressão do concreto aos j dias
$f_{ct,f}$	Resistência do concreto à tração na flexão
$f_{ct,m}$	Resistência média à tração do concreto
$f_{ct,sp}$	Resistência do concreto à tração indireta
f_{ct}	Resistência do concreto à tração direta
f_{ctd}	Resistência de cálculo à tração do concreto

f_{ctk}	Resistência característica do concreto à tração
f_{stk}	Limite de resistência do aço
f_{yd}	Resistência de cálculo do aço
f_{yk}	Resistência característica de escoamento do aço à tração
α_E	Parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto
γ_{f2}	Coefficiente de ponderação das ações
γ_s	Coefficiente de ponderação da resistência do aço
ψ_2	Coefficiente que depende das condições de vinculação e dimensões da laje
ψ_3	Coefficiente que depende do tipo de aço
\emptyset	Diâmetro
Δc	Tolerância de execução
α	Coefficiente que depende das condições de vinculação e relação de lados da laje

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização	15
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 Estruturação do trabalho de conclusão de curso	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Concreto	19
2.2 Propriedades mecânicas do concreto	20
2.2.1 Concreto no estado fresco	20
2.2.2 Concreto no estado endurecido	21
2.2.3 Resistência do concreto à compressão.....	22
2.2.4 Resistência do concreto à tração	23
2.2.5 Coeficiente de Poisson.....	24
2.2.6 Módulo de elasticidade.....	24
2.2.7 Módulo de deformação secante	25
2.3 Aço	25
2.4 Concreto armado	28
2.4.1 Vantagens.....	29
2.4.2 Desvantagens	30
2.5 Lajes maciças de concreto armado	30
2.5.1 Classificação quanto à direção	30
2.5.2 Cobrimentos mínimos	31
2.5.3 Altura útil e altura total.....	32
2.5.4 Espessuras mínimas das lajes.....	33

2.5.5 Cargas atuantes.....	33
2.5.6 Uso de quadros.....	34
2.5.7 Tipos de combinações de ações.....	35
2.5.8 Flecha elástica	37
2.5.9 Deslocamentos limites	37
3 METODOLOGIA	38
3.1 Classificação da pesquisa quanto aos fins	38
3.2 Classificação da pesquisa quanto aos meios	38
3.2.1 Descrição da área de estudo	38
3.3 Tratamento dos dados	40
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE	41
4.1 Valores de alturas das lajes	41
4.2 Valores dos carregamentos atuantes nas lajes	41
4.3 Valores das flechas elásticas.....	42
4.3.1 Quadros com valores de flechas elásticas para combinação rara	42
4.3.2 Quadros com valores de flechas elásticas para combinação permanente....	43
4.3.3 Quadros com valores de flechas elásticas para combinação quase permanente.....	44
4.3.4 Quadros com valores de flechas elásticas devido às vibrações na estrutura em virtude da carga acidental	45
5 CONCLUSÃO	47
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
APÊNDICE A	49
APÊNDICE B	51
APÊNDICE C	52
APÊNDICE D	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico possibilitou avanços consideráveis nas mais variadas áreas do conhecimento.

Na área da engenharia civil, o desenvolvimento tecnológico influenciou a tecnologia dos materiais, que vem se desenvolvendo e evoluindo constantemente, para atender as exigências das estruturas e as tendências de mercado.

Entre os avanços obtidos, a tecnologia do concreto foi diretamente impactada pelo desenvolvimento tecnológico. O concreto é uma mistura simples, composta de: cimento, agregados e água. É um material milenar, que apresenta baixo custo, facilidade de fabricação, versatilidade e propriedades que o tornam um material adequado para ser usado nas estruturas.

A ABNT NBR 8953 “Concretos para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência” em sua mais recente versão, 2015, classifica o concreto em dois grupos de acordo com sua resistência à compressão: grupo I de resistência para concretos de classe C20 a C50, e o grupo II de resistência para concretos de classe C55 a C90, sendo o grupo II destinados aos concretos de alta resistência.

O concreto com a adição de barras de aço compõe o concreto armado. Esse material apresenta boa resistência à compressão devido ao concreto, e boa resistência a tração devido ao aço. Por esse e outros motivos, ele é um material largamente utilizado no Brasil e em países do mundo todo.

O concreto armado é utilizado para compor os mais variados elementos estruturais. Entre esses elementos encontram-se as lajes de concreto armado, também conhecidas como lajes maciças. Esse tipo de laje é usado nas construções por apresentarem muitas vantagens, como: a facilidade de vencer vãos, redução de fissuras, além de suportarem mais peso.

Entre os aspectos que são analisados ao se projetar uma estrutura, a análise de deformações é um fator relevante a ser considerado nas construções, pois as deformações devem atender a deslocamentos limites, a fim de garantir a segurança e o correto desempenho do elemento estrutural.

As lajes se caracterizam por serem elementos fletidos, dessa forma, é importante que as deformações das lajes sejam as mínimas possíveis, para garantir a estabilidade e segurança da estrutura.

Essa pesquisa consiste em estudar a possível variação de deformações (flechas) de um pavimento de lajes maciças de concreto armado, usando a mínima e máxima resistência a compressão (f_{ck}) (C20 e C50) do grupo I resistência definido pela ABNT NBR 8953 (2015). Para isso, foram consultados livros, dissertações, artigos e diversos trabalhos acadêmicos que serviram de suporte para a realização da pesquisa.

A importância da pesquisa se pauta em conhecer e divulgar se o aumento da resistência à compressão do concreto em lajes maciças de concreto armado gera variação relevante nas deformações (flechas) sofridas pelas lajes, a fim de proporcionar conhecimentos que possam contribuir para o setor da construção civil.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Comparar a possível variação de deformações (flechas) geradas nas lajes maciças de concreto armado com o uso de concreto de classe C20 e C50.

1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar a flecha elástica das lajes maciças para as seguintes combinações: rara (totalidade de cargas), permanente, quase permanente e devido às vibrações nas lajes em virtude da carga acidental considerando o uso do concreto de classe C20;
- Verificar a flecha elástica das lajes maciças para as seguintes combinações: rara (totalidade de cargas), permanente, quase permanente e devido às vibrações nas lajes em virtude da carga acidental considerando o uso do concreto de classe C50;
- Estudar a viabilidade do aumento da resistência a compressão do concreto em lajes maciças em relação às deformações.

1.3 Estruturação do trabalho de conclusão de curso

Este trabalho de conclusão de curso foi dividido em 6 (seis) capítulos, conforme descrito pelos itens a seguir:

- Capítulo 1: Trata-se do capítulo introdutório onde se apresenta uma breve contextualização do tema em estudo. Contém ainda os objetivos e a estrutura do trabalho de conclusão de curso;
- Capítulo 2: Conceitua-se o concreto e suas propriedades, o aço e o concreto armado. Aprofunda-se no que diz respeito a verificação das flechas elásticas sofridas pelas lajes e os deslocamentos limites prescritos pela norma ABNT NBR 6118:2014;
- Capítulo 3. Discorre-se neste capítulo sobre os critérios, parâmetros e recomendações que possibilitaram o cálculo das flechas elásticas e das flechas limites das lajes do pavimento em estudo.
- Capítulo 4. Discute-se os resultados obtidos.
- Capítulo 5: Contém as conclusões e considerações;
- Capítulo 6: Referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto

De acordo com Bastos (2006), o concreto é um material composto, formado basicamente pelos seguintes componentes: cimento, água, agregados miúdos (areia), agregados graúdos (pedra ou brita) e ar. Pode conter ainda adições e aditivos químicos, a fim de melhorar ou alterar suas propriedades.

Para Almeida (2002), o concreto é um material de construção que resulta da mistura em proporções racionais de aglomerante (cimento), agregados (pedra e areia) e água. Logo após a mistura o concreto deve apresentar plasticidade necessária para as operações de manuseio, transporte e lançamento nas formas, obtendo coesão e resistência ao longo do tempo, em virtude das reações químicas que se processam entre aglomerante e água. Em alguns casos pode ser acrescentado aditivos que modificam suas características físicas e químicas.

Para Helene e Andrade (2010) concreto de cimento Portland é o material estrutural mais importante da construção civil da atualidade. Mesmo sendo o material mais recente dos materiais de construção, pode ser considerado como uma das descobertas mais importantes da história do desenvolvimento humano, impactando diretamente na qualidade de vida das pessoas.

Segundo Kaefer (1998), o concreto é um material plástico, moldado de forma a conseguir o modelo desejado antes que se inicie processo de endurecimento, adquirindo resistência necessária para resistir sozinho aos esforços solicitantes.

Para Helene e Andrade (2010), a descoberta do concreto no fim no século XIX e seu uso expandido no século XX o transformaram no material mais consumido pelo homem depois da água. Essa descoberta foi responsável por revolucionar a arte de projetar e construir estruturas cuja evolução sempre esteve relacionada ao desenvolvimento das civilizações ao longo da história humana.

Conforme Almeida (2002), define-se como pasta a mistura de cimento com água, e argamassa é a mistura da pasta com agregado miúdo. Denomina-se concreto a argamassa à qual foi adicionado agregado graúdo. Existem características que são fundamentais para o concreto, como, a facilidade de manuseio quando no estado fresco, boa resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade quando no estado

endurecido. Alguns fatores como a qualidade dos materiais componentes, o proporcionamento e a manipulação adequada dos materiais juntamente com uma cura cuidadosa interferem diretamente na obtenção dessas características, por isso é imprescindível conhecê-los.

Concreto estrutural é o termo que diz respeito ao espectro completo das aplicações do concreto como material estrutural (ABNT NBR 6118:2014, p.3).

Os elementos de concreto simples estrutural são elaborados com concretos que não possuem qualquer tipo de armadura ou que a possuem em quantidade inferior ao mínimo exigido para o concreto armado (ABNT NBR 6118:2014, p.3).

A ABNT NBR 6118:2014 se aplica a concretos que tenham massa específica normal, que são aqueles que depois de secos em estufa tem massa específica (ρ_c) entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³.

Quando a massa específica não for conhecida, pode-se adotar para efeito de cálculo o valor de 2400 kg/m³ para o concreto simples e o valor de 2500 kg/m³ para o concreto armado. Quando for conhecida a massa específica do concreto utilizado, pode se considerar para valor de massa específica de concreto armado a massa específica do concreto simples acrescida de 100 kg/m³ a 150 kg/m³ (ABNT NBR 6118:2014, p.3).

2.2 Propriedades mecânicas do concreto

2.2.1 Concreto no estado fresco

A NBR 12655 (ABNT 2015, p.3) define o concreto fresco como “concreto que está completamente misturado e que ainda se encontra em estado plástico capaz de ser adensado por um método escolhido”.

A fase do concreto fresco é um intervalo de tempo muito curto, geralmente de 1 a 5 horas, que é o tempo necessário para que aconteça a mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto (HELENE E ANDRADE, 2010).

As principais propriedades do concreto no estado fresco são a consistência, trabalhabilidade e a homogeneidade (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2015).

De acordo com Helene e Andrade (2010), a consistência é uma das características que mais indicam se o concreto está apto para ser manuseado, é a

maior ou menor capacidade que o concreto tem de sofrer deformações sob a atuação de sua própria massa.

Conforme Almeida (2002), o transporte, lançamento e adensamento do concreto devem influenciar para a confecção de uma massa homogênea e que não apresente vazios.

A trabalhabilidade de um concreto está relacionada à maneira de realizar seu adensamento. A trabalhabilidade depende da granulometria dos materiais sólidos, do uso de aditivos e essencialmente do fator água/cimento (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO,2015).

A homogeneidade é a propriedade relacionada à maneira que agregados graúdos estão distribuídos na massa de concreto. Quanto mais uniformes os agregados graúdos se apresentarem na massa, sem possui desagregação, maior será a qualidade do concreto, principalmente nos aspectos relacionados a permeabilidade e à proteção gerada para a armadura, além do concreto apresentar um melhor acabamento, evitando a necessidade de reparos posteriores (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO,2015).

Um fator que deve ser levando em consideração no que diz respeito a trabalhabilidade do concreto é a segregação. A ausência de segregação é fundamental para ser obtida a adequada compacidade da mistura (ALMEIDA,2002).

2.2.2 Concreto no estado endurecido

A NBR 12655 (ABNT 2015, p.3) define o concreto endurecido como “concreto que se encontra no estado sólido e que desenvolveu resistência mecânica”.

A resistência do concreto endurecido está relacionada a diversos fatores, como o consumo de cimento e água da mistura, o grau de adensamento, os tipos de agregados utilizados e aditivos, entre outros (ARAÚJO, 2014).

Para Almeida (2002), o peso específico do concreto endurecido está relacionado a diversos fatores, como a natureza, granulometria dos agregados e o método de compactação utilizado. No entanto a variação do peso específico é pequena, podendo ser adotado para o concreto simples um valor de $2,3 \text{ tf/m}^3$ e para o concreto armado um valor de $2,5 \text{ tf/m}^3$.

De acordo com Helene e Andrade (2010), o concreto no estado endurecido perde água quando é exposto em umidade relativa com valores inferiores a 100%. Essa perda de água é chamada retração por secagem, também conhecida como retração hidráulica.

No concreto endurecido, as principais características em evidência são as mecânicas, em especial a resistência a tração e compressão (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO,2015).

2.2.3 Resistência do concreto à compressão

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2015), a resistência a compressão do concreto é determinada a partir de ensaios de corpo de prova que são submetidos a compressão centrada. O valor obtido de resistência à compressão através de ensaios de curta duração do corpo de prova é dada pela expressão:

$$f_{cj} = \frac{N_{rup}}{A} \quad (2.1)$$

Em que:

f_{cj} resistência à compressão do corpo de prova de concreto aos “j” dias

N_{rup} carga de ruptura do corpo de prova

A área da seção transversal do corpo de prova

No Brasil, são usados corpos de prova cilíndricos, com diâmetro da base de 10 e 15 cm e altura de 20 e 30 cm, respectivamente (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO,2015).

Segundo a NBR 6118 (ABNT,2014) Os cilindros deverão ser moldados conforme a ABNT NBR 5738 e rompidos de acordo com a ABNT NBR 5739. Quando a idade não for especificada, as resistências referem-se à idade de 28 dias. A resistência à compressão média, f_{cmj} corresponde a uma resistência f_{ckj} especificada, deve ser feita conforme a ABNT NBR 12655.

A ABNT NBR 6118:2014 determina coeficientes de ponderação das resistências no estado limite último (ELU), de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 2.1 – Parte da tabela de valores dos coeficientes γ_c e γ_s

Combinações	Concreto (γ_c)	Aço (γ_s)
Normais	1,4	1,15

Fonte: ABNT NBR 6118,2014

Segundo a NBR 6118 (ABNT,2014) O cálculo para encontrar a resistência à compressão de cálculo quando o concreto apresenta idade superior a 28 dias, é dado pela expressão:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Em que:

$$f_{cd} \text{ resistência à compressão de cálculo} \quad (2.2)$$

γ_c coeficiente de ponderação de resistência no estado limite último (ELU) dado na tabela 2.1

2.2.4 Resistência do concreto à tração

De acordo com a NBR 6118 (ABNT,2014) A resistência a tração indireta $f_{ct,sp}$ deve ser obtida em ensaio realizado conforme a ABNT NBR 7222:2011, a resistência à tração na flexão $f_{ct,f}$, deve ser obtida em ensaio segundo a ABNT NBR 12142:2010. A resistência à tração direta f_{ct} pode ser considerada igual a $0,9f_{ct,sp}$ ou $0,7f_{ct,f}$. Na ausência de ensaios para obtenção de $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$, pode ser calculado seu valor médio ou característico de acordo com as equações:

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} \quad (2.3)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3f_{ct,m} \quad (2.4)$$

Para concretos de classe até C50:

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (2.5)$$

Em que:

$f_{ct,m}$ e f_{ck} são expressos em megapascals (MPa)

Sendo:

$f_{ckj} \geq 7$ MPa, estas equações também podem ser usadas para idades diferentes de 28 dias.

Conforme a NBR 6118 (ABNT,2014) o valor de cálculo da resistência à tração do concreto pode ser calculado por:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (2.6)$$

Em que:

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão

γ_c coeficiente de ponderação de resistência no estado limite último (ELU) dado na tabela 2.1

2.2.5 Coeficiente de Poisson

A NBR 6118:2014 prescreve que : “para tensões de compressão menores que $0,5f_c$ e tensões de tração menores que f_{ct} , o coeficiente de Poisson ν pode ser tomado como igual a 0,2.”

2.2.6 Módulo de elasticidade

A NBR 6118 (ABNT,2014) determina que o módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido através de ensaio de acordo com as prescrições da ABNT NBR 8522, sendo que a norma considera o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade. Na ausência de ensaios, pode se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial de acordo com as expressões a seguir:

Para concretos de 20 a 50 MPa:

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (2.7)$$

Sendo:

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

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

$\alpha_E = 0,9$ para granito calcário

$\alpha_E = 0,9$ para arenito

Onde:

E_{ci} e f_{ck} são dados em Megapascal (MPa)

2.2.7 Módulo de deformação secante

De acordo com a NBR 6118 (ABNT,2014) O módulo de deformação secante pode ser obtido segundo método de ensaio prescrito na ABNT NBR 8522, ou de acordo com a expressão:

$$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci} \quad (2.8)$$

Sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$$

2.3 Aço

Os aços diferenciam entre si pela forma, tamanho uniformidade dos grãos que o compõem, além de sua composição química, que pode ser alterada de acordo com o interesse de sua aplicação final, obtendo-se com o uso de adição de determinados elementos químicos aços com diferentes graus de resistência mecânica, soldabilidade, ductilidade, resistência à corrosão entre outros (FERRAZ,2003).

Geralmente, os aços possuem excelentes propriedades mecânicas: resistem bem à tração, à compressão, à flexão e por ser um material homogêneo permite ser laminado, forjado, estampado, estriado e suas propriedades ainda podem ser alteradas por tratamentos térmicos ou químicos (FERRAZ,2003).

No projeto de estruturas de concreto armado deve ser utilizado aços com diâmetro e seções transversais nominais classificados pela ABNT NBR 7840:2007,

com o valor característico de resistência de escoamento nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60 (ABNT NBR 6118:2014, p.28).

Classificam-se como barras os produtos de diâmetro nominal de 6,3 mm ou superior, obtidos de forma exclusiva por laminação à quente sem processo posterior de deformação mecânica. Classificam-se como fios aqueles que possuem diâmetro nominal menor ou igual a 10 mm, obtidos a partir de fio máquina por trefilação ou laminação a frio (ABNT NBR 7840:2007, p.2).

Para Ferraz (2003) Aços estruturais são vergalhões para reforço de concreto, barras, chapas e perfis para aplicações estruturais. São adequados para o uso em elementos que precisam suportar cargas. Os principais requisitos para os aços destinados à aplicação estrutural são:

- Elevada tensão de escoamento com o objetivo de prevenir a deformação plástica generalizada;
- Elevada tenacidade a fim de prevenir a fratura rápida (frágil) e catastrófica
- Boa soldabilidade para o mínimo de alterações das características do material na junta soldada
- Boa formabilidade para o material ou peça que necessite receber tratamento mecânico
- Custo reduzido

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2015), as tensões essenciais para obtenção de um aço, obtidas através de ensaios de tração são: a resistência característica de escoamento, limite de resistência e alongamento na ruptura.

Ainda de acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2015), a resistência característica do aço na tração (f_{yk}) é a máxima tensão que a barra ou o fio suportam, a partir dessa tensão o aço passa por permanentes deformações. A resistência de escoamento de cálculo do aço pode ser definida pela equação:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (2.9)$$

Em que:

f_{yk} é a resistência característica do aço na tração

γ_s coeficiente de ponderação tirado da tabela 2.1

O limite de resistência (f_{stk}) é a máxima força suportada pelo material e que faz ele se romper, ou seja é o ponto máximo de resistência da barra, seu valor é obtido pela leitura direta na máquina de tração. A tensão máxima é definida pela relação entre a força de ruptura e a área da seção transversal inicial da amostra (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2015).

Conforme Carvalho e Figueiredo Filho (2015), O alongamento na ruptura é o aumento do comprimento do corpo de prova que corresponde à ruptura.

A ABNT NBR 7840:2007 define que todo material em barras, casos dos CA 25 e CA50 deve ser obrigatoriamente fabricado por laminação a quente. Abaixo serão apresentadas algumas propriedades e características do aço CA 50:

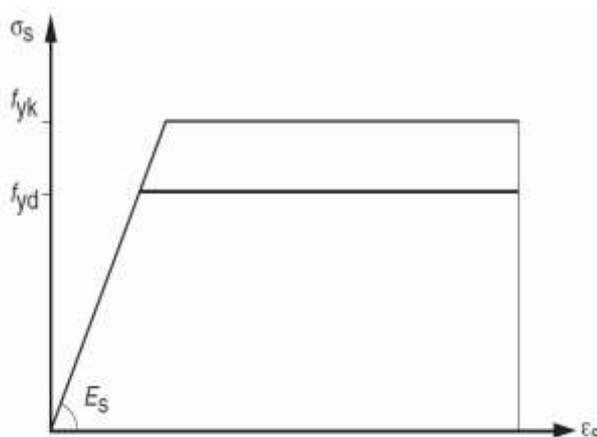
Quadro 2.1 – Parte do quadro – Propriedades mecânicas dos aços

Aço	f_{yk} (MPa)	f_{yd} (MPa)
CA 50	500	435

Fonte: CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO,2015

O diagrama tensão-deformação do aço e os valores característicos da resistência ao escoamento (f_{yk}), da resistência a tração (f_{stk}) e da deformação na ruptura devem ser obtidos por meio de ensaios regulamentos de tração. A figura 2.1 mostra o diagrama tensão-deformação simplificado apresentado pela norma brasileira e que pode ser utilizado no estado-limite último para aços com ou sem patamar de escoamento (ABNT NBR 6118:2014, p.29).

Figura 2.1 – Diagrama de tensão-deformação para o aço



Fonte: ABNT NBR 6118:2014, p. 29

2.4 Concreto armado

A NBR 6118 (ABNT 2014, p.3) define elemento de concreto armado como “aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência”

Para Carvalho e Figueiredo Filho (2015), o concreto armado é obtido a partir da associação do concreto simples e armadura colocada de forma conveniente (armadura passiva), de maneira que ambos sejam capazes de resistir solidariamente aos esforços atuantes.

De acordo com Bastos (2006), a armadura do concreto armado é denominada armadura passiva, o que significa que as tensões e deformações que são aplicadas sobre ela é devido exclusivamente aos carregamentos aplicados onde a peça se encontra.

De acordo com Araújo (2014) concreto armado é o material composto, gerado pela associação do concreto com barras de aço. O concreto possui baixa resistência à tração (cerca de 10% da resistência à compressão) e devido a isso as barras de aço cumprem o papel de absorver os esforços de tração que atuam na estrutura. Além disso, as barras de aço também aumentam a capacidade de carga de peças de que estão sendo solicitadas por compressão.

Bastos (2006) define o concreto armado como a junção do concreto simples com um material resistente à tração que envolve o concreto, de tal forma que ambos atuem em conjunto para resistir aos esforços atuantes. De maneira esquemática, pode-se conceituar o concreto armado como:

Concreto armado = concreto simples + armadura + aderência

Conforme Bastos (2006) o concreto armado pode ter surgido a partir da necessidade de unir as propriedades da pedra (resistência à compressão e durabilidade) com as do aço (resistências mecânicas) e as vantagens da possibilidade do concreto armado assumir qualquer forma, com agilidade e facilidade, além de propiciar a necessária proteção do aço ao fenômeno de corrosão.

Ainda de acordo com Bastos (2006) para que exista o concreto armado como condição obrigatória, o fenômeno da aderência, é fundamental que o concreto e o aço trabalhem de maneira conjunta.

Conforme Araújo (2014) se não houvesse aderência entre o concreto e o aço, não seria possível existir o concreto armado. Graças à aderência, as deformações das barras de aço são praticamente iguais às deformações do concreto que envolve as barras. Devido à baixa resistência à tração, o concreto fatura na zona que está sendo tracionada do elemento estrutural. Dessa forma os esforços de tração são absorvidos pela armadura, e isso impossibilita a ruína brusca da estrutura, que poderia ocorrer por exemplo em uma viga de concreto simples.

2.4.1 Vantagens

De acordo com Bastos (2006), o concreto armado vem sendo amplamente utilizado em países do mundo todo, em todos os tipos de construção, devido a muitas vantagens que esse material oferece, como:

- Custo relativamente baixo: principalmente no Brasil, onde seus materiais componentes possuem grande disponibilidade;
- Conservação: o concreto possui boa durabilidade quando é dosado de maneira correta, sendo fundamental a execução do cobrimento mínimo das armaduras;
- Boa adaptabilidade: é um material moldável, permitindo uma série de possibilidades arquitetônicas;
- Permite agilidade na construção: a execução e recobrimentos são relativamente rápidos;
- Segurança contra o fogo: apresenta um bom comportamento em situações de incêndio, desde que a armadura seja protegida por um cobrimento mínimo adequado de concreto;
- Impermeabilidade: desde que seja dosado e confeccionado de maneira correta;
- Resistência à choques e vibrações: dessa forma os problemas de fadiga são menores.

2.4.2 Desvantagens

- Peso próprio elevado em comparação com sua resistência
- Reformas e adaptações são difíceis de serem executadas
- Ocorrem fissurações que devem ser controladas
- Condutor de calor e som

2.5 Lajes maciças de concreto armado

De acordo com Bastos (2013), laje maciça é aquela que possui toda a espessura composta de concreto, possuindo armaduras longitudinais de flexão e eventualmente transversais, que se apoiam em vigas ou paredes ao longo das bordas.

Placas são elementos de superfície plana, sujeitos principalmente a esforços normais em seu plano. As placas de concreto são usualmente denominadas lajes (ABNT NBR 6118:2014, p.84).

Conforme Carvalho e Figueiredo Filho (2015), lajes maciças de concreto armado são placas de concreto que se apoiam nas vigas em seu contorno. A geometria da laje é dada pelo parâmetro λ , de acordo com a expressão:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \quad (2.10)$$

Em que:

l_y maior vão da laje

l_x menor vão da laje

2.5.1 Classificação quanto a direção

Conforme Bastos (2013) as lajes podem se classificar quanto à direção ou às direções da armadura principal, sendo:

- Laje armada em duas direções: os esforços solicitantes são importantes segundo as duas direções principais da laje. A relação entre lados é inferior a dois, de acordo com a expressão abaixo:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \leq 2 \quad (2.11)$$

Os esforços solicitantes e flechas são calculados com a supondo-se a laje como uma viga com largura de 1 metro, segundo a direção principal da laje.

2.5.2 Cobrimentos mínimos

A NBR 6118 (ABNT,2014) classifica a classe de agressividade ambiental de acordo com a tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Parte da tabela 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
II	Moderada	Urbana	Pequeno

Fonte: ABNT NBR 6118,2014

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 para garantir o cobrimento mínimo (c_{\min}), o projeto e a execução devem levar em consideração o cobrimento nominal (c_{nom}), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc). Dessa forma, as dimensões das armaduras e os espaçadores devem respeitar os cobrimentos nominais indicados na tabela 2.3 considerando a tolerância de execução Δc igual a 10 mm. Nas obras correntes, a tolerância de execução deve ser maior ou igual a 10 mm.

Tabela 2.3 – Parte da tabela correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental
		II
		Cobrimento nominal (mm)
Concreto armado	Laje	25

Fonte: ABNT NBR 6118,2014

2.5.3 Altura útil e altura total

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2015), da mesma maneira que para vigas, na ABNT NBR 6118:2014 não existe recomendação sobre a altura inicial que deve ser adotada, e por isso, mantêm-se apenas como indicação a prescrição da ABNT NBR 6118:1980, no item 4.2.3.1.C, que para vigas de seção retangular ou “T” e lajes maciças retangulares de edifícios, as condições de deformações limites estariam atendidas se o valor de altura útil respeitar a seguinte expressão:

$$d \geq \frac{l}{\psi_2 \times \psi_3} \quad (2.12)$$

Sendo:

ψ_2 coeficiente que depende das condições de vinculação e dimensões da laje, com valores de acordo com o quadro 2.2

ψ_3 coeficiente que depende do tipo de aço, com valores de acordo com o quadro 2.3

l menor dos dois vãos da laje

Quadro 2.2 – Parte do quadro valores de ψ_2

λ	Caso 3	Caso 4
1,25	1,63	1,70
1,40	1,58	1,64
1,70	1,49	1,52

Fonte: Adaptado por CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO,2015
baseado na ABNT NBR 6118:1980

Quadro 2.3 – Parte do quadro valores de ψ_3

Aço	Lajes maciças
CA 50	25

Fonte: Adaptado por CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO,2015
baseado na ABNT NBR 6118:1980

Ainda de acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2015), o valor de altura total h poderá ser definido de acordo com a expressão:

$$h = d + c + \phi + \frac{\phi}{2} \quad (2.13)$$

sendo:

d altura útil

c cobrimento a ser considerado

ϕ diâmetro da armadura a ser empregada

2.5.4 Espessuras mínimas das lajes

A NBR 6118 (ABNT,2014) prescreve a espessura para lajes maciças devem respeitar os seguintes limites mínimos:

- a) 7 cm para cobertura não em balanço;
- b) 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- c) 10 cm para lajes em balanço;
- d) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- e) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- f) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de $\frac{l}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{l}{50}$ para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

2.5.5 Cargas atuantes

Conforme Bastos (2013), nas construções de edifícios correntes, as ações a serem consideradas de forma geral são as ações permanentes (g) e as ações variáveis (q).

As cargas que atuam em uma laje maciça (carga por metro quadrado de laje) são calculadas de forma usual, e geralmente devem ser consideradas as seguintes: peso estrutural, carga accidental de acordo com a finalidade da construção e com as prescrições da ABNT NBR 6120:1980, revestimento inferior se existir, peso de

contrapiso e peso do piso ou revestimento (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO,2015).

A carga permanente é o tipo de carga composta pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos construtivos fixos e as instalações permanentes (ABNT NBR 6120:1980, p.1).

A carga acidental é toda aquela que atua na estrutura em virtude da finalidade da construção como: pessoas, móveis, materiais diversos, veículos, entre outras (ABNT NBR 6120:1980, p.1).

A tabela 2.4 apresenta os pesos específicos dos materiais de construção que serão considerados e a tabela 2.5 apresenta a carga acidental que será utilizada.

Tabela 2.4 – Parte da tabela peso específico de materiais de construção

Materiais	Peso específico aparente (kN/m ³)
Granito	28
Argamassa de cal, cimento e areia	19
Argamassa de cimento e areia	21
Concreto armado	25

Fonte: ABNT NBR 6120:1980

Tabela 2.5 – Parte da tabela valores mínimos das cargas verticais

Local		Carga (kN/m ²)
Escritórios	Salas de uso geral e banheiros	2

Fonte: ABNT NBR 6120:1980

2.5.6 Uso de quadros

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2015), o processo de cálculo de placas por série é adequado para a confecção de quadros que permitem de maneira fácil determinar momentos fletores máximos e deslocamentos máximos (flechas) a partir da geometria e das condições de vinculação da placa. Dessa forma, o pavimento deve ser discretizado, ou seja, cada laje deve ser tratada de maneira individual, de acordo com a vinculação às demais (só são possíveis bordas-contorno-simplesmente

apoiadas ou engastadas). As lajes são classificadas de acordo com as condições de vinculação. Essas condições são classificadas por casos, de acordo com a situação de vinculação que a laje se encontra, sendo:

- Caso 3: a laje possui apenas uma borda engastada;
- Caso 4: a laje possui duas bordas adjacentes engastadas.

Bares (1972, apud Carvalho e Figueiredo Filho,2015) desenvolveu soluções em séries. O quadro apresentado abaixo foi baseado nessas soluções em série e devidamente adaptadas para o coeficiente de Poisson ν igual a 0,20.

O quadro abaixo fornece o coeficiente α usado para cálculo da flecha elástica, de acordo com as condições de vinculação da laje. Para encontrar o coeficiente correto nesse quadro, é necessário calcular o parâmetro λ dado na expressão (2.11) que reflete a geometria da laje.

Quadro 2.4 – Parte do quadro coeficientes α para cálculo de flecha elástica

λ	Caso 3	Caso 4
1,25	4,18	3,55
1,40	4,65	4,08
1,70	5,17	4,88

Fonte: CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO,2015

2.5.7 Tipos de combinações de ações

A NBR 6118 (ABNT,2014) determina que as combinações de serviço realizadas para a verificação da segurança aos estados-limites de serviço devem ser classificadas conforme a seguir:

- Quase permanentes: as combinações podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura. Pode ser necessário sua consideração na verificação do estado-limite de deformações excessivas;
- Frequentes: repetem-se muitas vezes ao longo do período de vida da estrutura. Sua consideração pode ser necessária na verificação dos estados-limites de formação de fissuras, e aberturas de fissuras e vibrações em excesso. Também

podem ser consideradas nas verificações de estados-limites de deformações excessivas devido ao vento ou temperatura que podem comprometer as vedações;

- Raras: acontecem algumas vezes no período de vida da estrutura. Sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de formação de fissuras.

A NBR 6118 (ABNT,2014) determina que em geral, o coeficiente de ponderação das ações para estado-limite de serviço-ELS é dado pela expressão:

$$\gamma_f = \gamma_{f2} \quad (2.17)$$

Onde:

γ_{f2} tem valor variável de acordo com a verificação que se deseja fazer

$\gamma_{f2} = 1$ para combinações raras

$\gamma_{f2} = \Psi_1$ para combinações frequentes

$\gamma_{f2} = \Psi_2$ para combinações quase permanentes

A tabela 2.6 a seguir apresenta o valor do coeficiente γ_{f2} a ser utilizado para a situação de combinação quase permanente:

Tabela 2.6 – Parte da tabela valores do coeficiente γ_{f2}

Ações		γ_{f2}	
		Ψ_1^a	Ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,6	0,4

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

^c edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

2.5.8 Flecha elástica

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2015), flecha é o deslocamento transversal máximo de uma barra reta ou placa. A flecha elástica pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$f = \frac{p \times l_x^4}{E \times h^3} \times \frac{\alpha}{100} \quad (2.18)$$

Em que:

p – carregamento uniformemente distribuído sobre a laje;

α – coeficiente tirado do quadro 2.4

l_x – menor vão da laje;

E – módulo de deformabilidade do concreto

h – altura da laje

2.5.9 Deslocamentos limites

Deslocamentos limites são valores práticos que são utilizados para a verificação em serviço do estado- limite de deformações excessivas na estrutura. Na condição de aceitabilidade sensorial, o limite tem como características vibrações indesejáveis, ou efeito visual desagradável (ABNT NBR 6118:2014, p.76). A tabela 2.7 apresenta os valores de deslocamentos limites a ser considerados na condição de aceitabilidade sensorial.

Tabela 2.7 – Parte da tabela limites para deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Total	L/250
	Outro	Devido a cargas acidentais	L/350

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da pesquisa quanto aos fins

Esta pesquisa se classifica como pesquisa aplicada, pois é baseada no objetivo comparar as deformações (flechas) sofridas pelas lajes verificando os deslocamentos limites prescritos pela ABNT NBR 6118:2014, considerando concreto de 20 e 50 MPa a fim de analisar a viabilidade de usar um concreto que tenha uma maior resistência a compressão para a redução de flechas das lajes. Dessa forma, a pesquisa age como uma possível solução do problema em estudo, buscando analisar a viabilidade à cerca dos resultados obtidos.

3.2 Classificação da pesquisa quanto aos meios

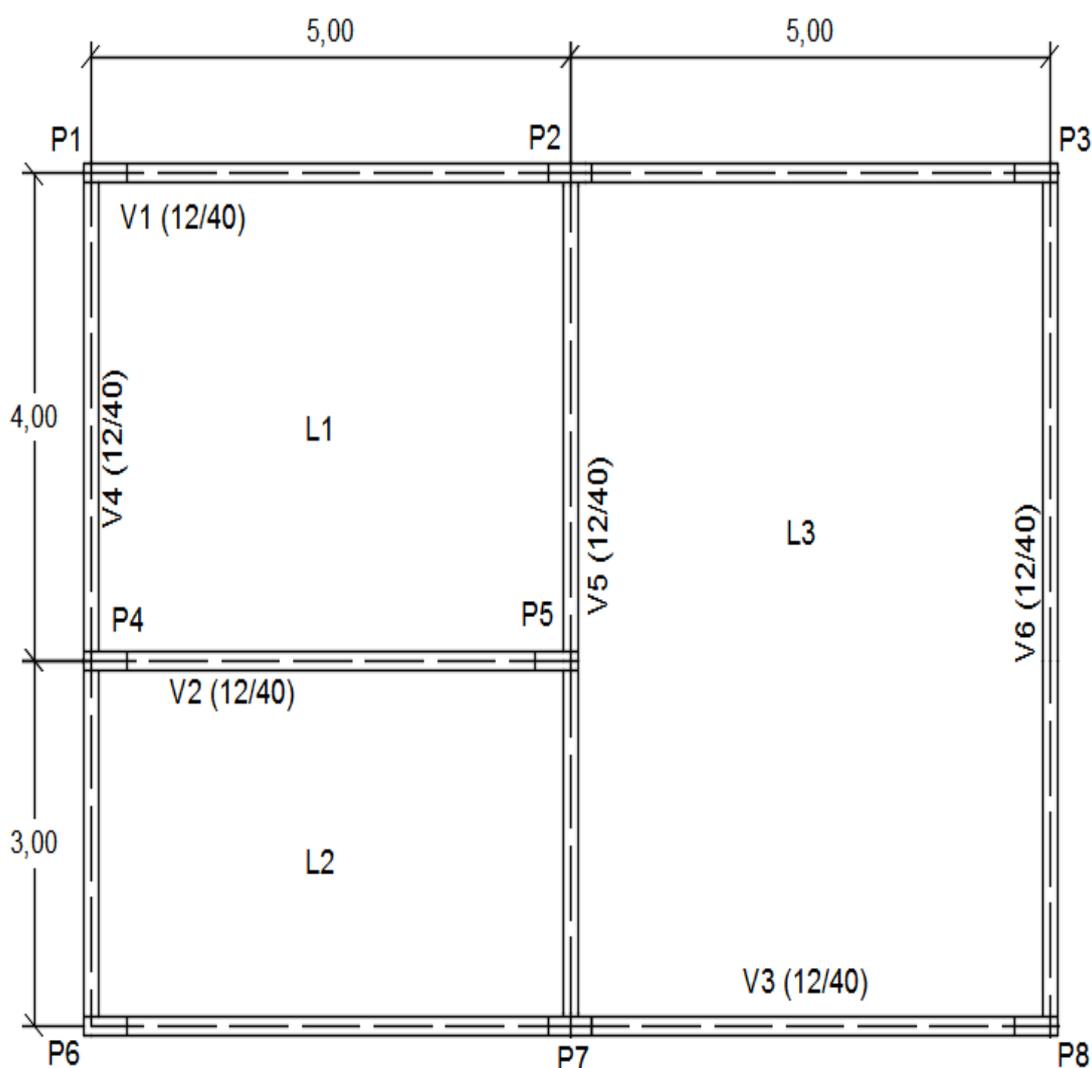
3.2.1 Descrição da área de estudo

Para fazer a verificação das flechas elásticas e deslocamentos limites foi desenvolvida a planta de fôrma do pavimento de lajes em estudo, com o auxílio do software AutoCAD. A planta contém 3 lajes retangulares, com dimensões apresentadas conforme a figura 2.2. Serão considerados para todas as lajes os itens a seguir:

- Classe de agressividade ambiental: será admitida a classe de agressividade ambiental igual a II, conforme a tabela 2.2
- Cobrimento mínimos: para a classe de agressividade ambiental igual a II, o cobrimento mínimo é 25 mm ou 2,5 cm, conforme a tabela 2.3
- Contrapiso com espessura de 3 centímetros executado com argamassa de cimento e areia de acordo com a tabela 2.4;
- Chapisco com espessura de 0,5 centímetros executado com argamassa de cimento e areia de acordo com a tabela 2.4;

- Revestimento inferior do teto da laje (reboco) de 2 centímetros executado com argamassa de cal, cimento e areia, conforme a tabela 2.4;
- Piso de granito com 2 centímetros de espessura, de acordo com a tabela 2.4;
- Carga acidental: a construção terá como finalidade o uso de escritórios, o valor de carga acidental a ser utilizado se encontra na tabela 2.5
- Admite-se que o maior momento atuante em todas as lajes é menor que o momento de fissuração (M_r).

Figura 2.2 – Planta de fôrma do pavimento de lajes maciças



Fonte: elaborado pela autora

3.3 Tratamento dos dados

A partir de uma revisão bibliográfica, obteve-se o suporte necessário para o entendimento e desenvolvimento da pesquisa. A partir da planta de fôrma definida, foram realizados o cálculo de altura para as 3 lajes, adotando a mesma espessura para as 3 lajes. Após esse processo, foi realizado o levantamento das cargas atuantes conforme a ABNT NBR 6120:1980, utilizando os dados da tabela 2.4 que mostra os pesos específicos dos materiais de construção e a tabela 2.5, que mostra a carga accidental utilizada para construções destinadas a escritórios. As flechas elásticas foram calculadas de acordo com a equação 2.18 e com o uso do quadro 2.4, baseado nas soluções em série desenvolvidas por Bares (1972) e adaptadas para o coeficiente de Poisson $\nu = 0,20$.

Os deslocamentos limites para cada laje foram calculados de acordo com a tabela 2.7 baseada nas prescrições da ABNT NBR 6118:2014.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE

Garantir que as deformações das lajes estejam dentro dos limites prescritos pela norma ABNT NBR 6118:2014 é imprescindível em um projeto estrutural. No caso das deformações, é importante que elas sejam as mínimas possíveis, levando sempre em consideração os aspectos de segurança e economia que são imprescindíveis de serem analisados em projeto.

4.1 Valores de altura das lajes

Para efetuar os cálculos das alturas das lajes, foram utilizadas as equações 2.11 a 2.13 de acordo com os valores dos quadros 2.2 e 2.3 e os valores das tabelas 2.2 e 2.3, respeitando as recomendações do item 2.5.4 que se trata das espessuras mínimas prescritas pela ABNT NBR 6118:2014.

Quadro 4.1 – Valores de altura das lajes

Laje	Caso	h_{adotado} (cm)
L1	4	8
L2	4	8
L3	3	8

Fonte: elaborado pela autora

4.2 Valores dos carregamentos atuantes nas lajes

Para realizar os cálculos dos carregamentos atuantes nas lajes, foram observadas as recomendações do item 2.5.5, utilizando os valores contidos na tabela 2.4 e 2.5 baseados na ABNT NBR 6120:1980. Os valores das cargas permanentes foram calculados com os dados da tabela 2.4, e o valor da carga acidental foi retirada da tabela 2.5. Para realizar os cálculos das flechas elásticas, admitiu-se que o maior momento solicitante é menor que o momento de fissuração, portanto, não há fissuração nas lajes.

Quadro 4.2 – Valores de carregamentos atuantes nas lajes

	Peso próprio (kN/m ²)	Chapisco (kN/m ²)	Reboco (kN/m ²)	Contrapiso (kN/m ²)	Piso (kN/m ²)	Sobrecarga (kN/m ²)	Total (kN/m ²)
L1	2	0,105	0,380	0,630	0,560	2	5,675
L2	2	0,105	0,380	0,630	0,560	2	5,675
L3	2	0,105	0,380	0,630	0,560	2	5,675

Fonte: elaborado pela autora

4.3 Valores das flechas elásticas

4.3.1 Quadros com valores de flecha elástica para combinação rara

Os cálculos de flecha elásticas para combinação rara foram realizados considerando concreto de resistência característica à compressão de 20 MPa e 50 MPa. Para efetuar os cálculos, foi considerado o módulo de deformação longitudinal do concreto de acordo com a classe de resistência, conforme as equações 2.7 e 2.8. Para o cálculo da flecha elástica foi utilizada a expressão 2.18 de acordo com os valores contidos nos quadros 2.4 e 2.5 considerando a ação das cargas permanentes (g) e a ação da carga acidental (q).

Quadro 4.3 – Valores de flecha elástica para combinação rara considerando o uso do concreto C20

Laje	Rel.vãos	α	Flecha
	$\lambda(l_y/l_x)$	Centro laje	(cm)
L1	1,25	3,55	0,47
L2	1,67	4,88	0,21
L3	1,40	4,65	1,51

Fonte: elaborado pela autora

Quadro 4.4 – Valores de flecha elástica para combinação rara considerando o uso do concreto C50

Laje	Rel.vãos	α	Flecha
	$\lambda(l_y/l_x)$	Centro laje	(cm)
L1	1,25	3,55	0,27
L2	1,67	4,88	0,12
L3	1,40	4,65	0,87

Fonte: elaborado pela autora

A partir dos resultados obtidos, foi constatado que a laje L1 sofreu uma redução de aproximadamente 42% em sua flecha com o uso do concreto C50. A laje L2 sofreu uma redução de aproximadamente 43% em sua flecha com o uso do concreto C50, e a laje L3 sofreu uma redução de aproximadamente 42% em sua flecha com o uso do concreto C50.

4.3.2 Quadros com valores de flecha elástica para combinação permanente

Os cálculos das flechas para combinação permanente foram realizados considerando concreto de resistência característica à compressão de 20 MPa e 50 MPa. Para efetuar os cálculos, foi considerado o módulo de deformação longitudinal do concreto de acordo com a classe de resistência, conforme as equações 2.7 e 2.8. Para o cálculo da flecha elástica foi utilizada a expressão 2.18 e considerou-se apenas a ação da carga permanente (g).

Quadro 4.5 – Valores de flecha elástica para combinação permanente considerando o uso do concreto C20

Laje	Rel.vãos	α	Flecha
	$\lambda(l_y/l_x)$	Centro laje	(cm)
L1	1,25	3,55	0,31
L2	1,67	4,88	0,13
L3	1,40	4,65	0,98

Fonte: elaborado pela autora

Quadro 4.6 – Valores de flecha elástica para combinação permanente considerando o uso do concreto C50

Laje	Rel.vãos	α	Flecha
	$\lambda(l_y/l_x)$	Centro laje	(cm)
L1	1,25	3,55	0,18
L2	1,67	4,88	0,08
L3	1,40	4,65	0,57

Fonte: elaborado pela autora

A partir dos resultados obtidos, foi constatado que a laje L1 sofreu uma redução de aproximadamente 42% em sua flecha com o uso do concreto C50. A laje L2 sofreu uma redução de aproximadamente 38% em sua flecha com o uso do concreto C50, e a laje L3 sofreu uma redução de aproximadamente 42% em sua flecha com o uso do concreto C50.

4.3.3 Quadros com valores de flecha elástica para combinação quase permanente

Os cálculos das flechas para combinação quase permanente foram realizados considerando concreto de resistência característica à compressão de 20 MPa e 50 MPa. Para efetuar os cálculos, foi considerado o módulo de deformação longitudinal do concreto de acordo com a classe de resistência, conforme as equações 2.7 e 2.8. Para o cálculo da flecha elástica foi utilizada a expressão 2.18 e considerou-se ação da carga permanente (g) acrescida de 0,4 do valor da carga acidental (q), de acordo com a equação 2.17 e o coeficiente apresentado na tabela 2.6. Para o cálculo do deslocamento limite foi utilizado os valores da tabela 2.7.

Quadro 4.7– Valores de flecha elástica para combinação quase permanente considerando o uso do concreto C20

Laje	Rel.vãos	α	Flecha	Flecha limite	Verificação
	$\lambda(l_y/l_x)$	Centro laje	(cm)	(L/250) (cm)	
L1	1,25	3,55	0,37	1,60	Atende
L2	1,67	4,88	0,16	1,20	Atende
L3	1,40	4,65	1,19	2,00	Atende

Fonte: elaborado pela autora

Quadro 4.8 – Valores de flecha elástica para combinação quase permanente considerando o uso do concreto C50

Laje	Rel.vãos	α	Flecha	Flecha limite	Verificação
	$\lambda(l_y/l_x)$	Centro laje	(cm)	(L/250) (cm)	
L1	1,25	3,55	0,22	1,60	Atende
L2	1,67	4,88	0,09	1,20	Atende
L3	1,40	4,65	0,69	2,00	Atende

Fonte: elaborado pela autora

A partir dos resultados obtidos, é possível perceber que as flechas de todas as lajes estão de acordo com os valores de flechas limites prescritos pela ABNT NBR 6118:2014. Foi constatado que a laje L1 sofreu uma redução de aproximadamente 40% em sua flecha com o uso do concreto C50. A laje L2 sofreu uma redução de aproximadamente 44% em sua flecha com o uso do concreto C50, e a laje L3 sofreu uma redução de aproximadamente 42% em sua flecha com o uso do concreto C50.

4.3.4 Quadros com valores de flecha elástica devido às vibrações na estrutura em virtude da carga acidental

Os cálculos das flechas foram realizados considerando concreto de resistência característica à compressão de 20 MPa e 50 MPa. Para efetuar os cálculos, foi considerado o módulo de deformação longitudinal do concreto de acordo com a classe de resistência, conforme as equações 2.7 e 2.8. Para o cálculo da flecha elástica devido às vibrações na estrutura foi utilizada a expressão 2.18 e considerou-se a diferença dos valores obtidos da combinação de totalidade de cargas em relação à combinação quase permanente. Para o cálculo do deslocamento limite foi utilizado os valores da tabela 2.7.

Quadro 4.9 – Valores de flecha elástica para combinação devido a vibrações considerando o uso do concreto C20

Laje	Rel.vãos	α	Flecha	Flecha limite	Verificação
	$\lambda(l_y/l_x)$	Centro laje	(cm)	(L/350) (cm)	
L1	1,25	3,55	0,16	1,14	Atende
L2	1,67	4,88	0,08	0,86	Atende
L3	1,40	4,65	0,53	1,43	Atende

Fonte: elaborado pela autora

Quadro 4.10 – Valores de flecha elástica para combinação devido a vibrações considerando o uso do concreto C50

Laje	Rel.vãos	α	Flecha	Flecha limite	Verificação
	$\lambda(l_y/l_x)$	Centro laje	(cm)	(L/350) (cm)	
L1	1,25	3,55	0,09	1,14	Atende
L2	1,67	4,88	0,04	0,86	Atende
L3	1,40	4,65	0,30	1,43	Atende

Fonte: elaborado pela autora

A partir dos resultados obtidos, é possível perceber que as flechas de todas as lajes estão de acordo com os valores de flechas limites prescritos pela ABNT NBR 6118:2014. Foi constatado que a laje L1 sofreu uma redução de aproximadamente 44% em sua flecha com o uso do concreto C50. A laje L2 sofreu uma redução de 50 % em sua flecha com o uso do concreto C50, e a laje L3 sofreu uma redução de aproximadamente 43% em sua flecha com o uso do concreto C50.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa possibilitou evoluções no conhecimento sobre a influência da resistência à compressão do concreto nas deformações em lajes maciças de concreto armado.

Os resultados obtidos permitiram concluir que houve uma redução considerável nas deformações de todas as lajes maciças de concreto armado com o uso do concreto C50 nas lajes, para as situações de combinação de totalidade de cargas, combinação permanente, combinação quase permanente e a flecha devida às vibrações na estrutura em virtude da carga acidental. Os valores das flechas na situação de combinação quase permanente e devida às vibrações na estrutura em virtude da carga acidental estão em conformidade com os deslocamentos limites prescritos pela ABNT NBR 6118:2014. Considerando o uso do concreto C20, as flechas imediatas sofridas pelas lajes nas situações de combinação quase permanente e devida às vibrações na estrutura em virtude da carga acidental, também estão de acordo com os deslocamentos limites que a norma brasileira prescreve.

Ao se projetar uma estrutura, deve-se levar em consideração a economia, de forma que a economia jamais comprometa a segurança do elemento estrutural. No caso da presente pesquisa, pode-se concluir que o uso do concreto C50 em lajes maciças de concreto armado reduziu consideravelmente as deformações nas lajes. No entanto, esse tipo de concreto possui um custo maior devido a sua maior resistência. Dessa forma, como o uso do concreto C20 não compromete a segurança das lajes, pois as deformações estão dentro dos deslocamentos limites, esse tipo de concreto apresenta maior viabilidade no aspecto estrutural e também econômico, para ser utilizado em lajes maciças de concreto armado.

Para estudos futuros, pode-se fazer a análise da influência da resistência à compressão do concreto nas deformações de outros elementos estruturais, como pilares, vigas e fundações, como forma de aprimorar e ampliar o conhecimento à cerca do tema.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7840. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6120. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações, Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8953. Concretos para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12655. Concreto – preparo, controle e recebimento, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto armado – procedimento, Rio de Janeiro, 2014.

ALMEIDA, L. C. Concreto – Notas de aula. Campinas: FEC – UNICAMP, 2002.

ARAÚJO, José Milton. Curso de concreto Armado. 1 v. Rio Grande: Editora Dunas, 4ª ed., 2014.

BASTOS, P. S. Fundamentos do Concreto Armado – Notas de aula. Bauru: UNESP, 2006.

BASTOS, P. S. Lajes de concreto – Notas de aula. Bauru: UNESP, 2013.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4ª ed. São Carlos: EdUFSCar, 2015.

FERRAZ, Henrique. O aço na construção civil. **Revista Eletrônica de Ciências**. São Carlos n. 22, out/nov/dez. 2003. Disponível em: <<https://www.ft.unicamp.br/~mariaacm/ST114/O%20A%C7O%20NA%20CONSTRU%C7%C3O%20CIVIL.pdf>> Acesso em: 20 out. 2018.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. IN: ISAIA, G. C. (Org) materiais de construção civil e princípios de ciência de engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2010.

KAEFER, L. F. A Evolução do Concreto Armado. São Paulo: USP, 1998.

APÊNDICE A – ALTURA DAS LAJES

Laje L1: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

$$\text{Para } l_y/l_x = 5/4 = 1,25$$

Do quadro 2.2 $\psi_2=1,70$

Do quadro 2.3 $\psi_3= 25$

Utilizando a equação (2.12) têm-se:

$$d \geq \frac{4}{1,70 \times 25}$$

$$d \geq 0,09 \text{ m}$$

Utilizando a equação (2.13) e as tabelas 2.2 e 2.3, têm-se:

$$h = 0,09 + 0,025 + 0,010 + \frac{0,010}{2} = 0,130 \text{ m}$$

$$h = 13 \text{ cm}$$

Laje L2: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

$$\text{Para } l_y/l_x = 5/3 = 1,67 \cong 1,70$$

Do quadro 2.2 $\psi_2 = 1,52$

Do quadro 2.3 $\psi_3 = 25$

Utilizando a equação (2.12) têm-se:

$$d \geq \frac{3}{1,52 \times 25}$$

$$d \geq 0,08 \text{ m}$$

Utilizando a equação (2.13) e as tabelas 2.2 e 2.3, têm-se:

$$h = 0,08 + 0,025 + 0,010 + \frac{0,010}{2} = 0,12 \text{ m}$$

$$h = 12 \text{ cm}$$

Laje L3: Caso 3

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

$$\text{Para } l_y/l_x = 7/5 = 1,40$$

$$\text{Do quadro 2.2 } \psi_2 = 1,58$$

$$\text{Do quadro 2.3 } \psi_3 = 25$$

Utilizando a equação (2.12) têm-se:

$$d \geq \frac{5}{1,58 \times 25}$$

$$d \geq 0,13 \text{ m}$$

Utilizando a equação (2.13) e as tabelas 2.2 e 2.3, têm-se:

$$h = 0,13 + 0,025 + 0,010 + \frac{0,010}{2} = 0,17 \text{ m}$$

$$h = 17 \text{ cm}$$

Adota-se para as 3 lajes o valor de $h = 8 \text{ cm}$, que é o valor mínimo exigido pela ABNT NBR 6118:2014 para lajes de piso.

APÊNDICE B – CARGAS ATUANTES

Cargas atuantes nas lajes

Para todas as lajes foram consideradas as mesmas cargas atuantes a seguir:

Cargas permanentes:

$$\text{Peso próprio da laje} = 0,08 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 2 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Chapisco} = 0,005 \text{ m} \times 21 \text{ kN/m}^3 = 0,105 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Revestimento do teto inferior} = 0,02 \text{ m} \times 19 \text{ kN/m}^3 = 0,380 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Contrapiso} = 0,03 \text{ m} \times 21 \text{ kN/m}^3 = 0,630 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Piso de granito} = 0,02 \text{ m} \times 28 \text{ kN/m}^3 = 0,560 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Total (cargas permanentes)} = 3,675 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Carga acidental} = 2 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Carga total} = 3,675 \text{ kN/m}^2 + 2 \text{ kN/m}^2 = 5,675 \text{ kN/m}^2$$

APÊNDICE C – DEFORMAÇÕES

C.1 Cálculo do módulo de deformação secante do concreto C20

De acordo com a equação (2.7), o módulo de elasticidade do concreto para classe C20, considerando o uso de agregado de granito ou gnaisse, pode ser calculado por:

$$E_{ci} = 1 \times 5600\sqrt{20} = 25043,96 \text{ MPa}$$

De acordo com a equação (2.8), o módulo de deformação secante do concreto para classe C20, pode ser calculado por:

$$E_{cs} = 0,85 \times 5600\sqrt{20} = 21287,37 \text{ MPa}$$

Sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{20}{80} = 0,85$$

C.2 Cálculo das flechas elásticas para combinação rara considerando o uso do concreto C20:

Laje L1: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/4 = 1,25$; do quadro 2.4 $\alpha = 3,55$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação de totalidade de cargas ($p = g + q$) é dada por:

$$f = \frac{5,675 \text{ kN/m}^2 \times 4^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times \frac{3,55}{100} = 0,004732 \text{ m ou } 0,47 \text{ cm}$$

Laje L2: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/3 = 1,67 \cong 1,70$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,88$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação de totalidade de cargas ($p = g + q$) é dada por:

$$f = \frac{5,675 \text{ kN/m}^2 \times 3^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,88 = 0,002058 \text{ m ou } 0,21 \text{ cm}$$

Laje L3: Caso 3

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 7/5 = 1,40$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,65$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação de totalidade de cargas ($p = g + q$) é dada por:

$$f = \frac{5,675 \text{ kN/m}^2 \times 5^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,65 = 0,015132 \text{ m ou } 1,51 \text{ cm}$$

C.3 Cálculo das flechas elásticas para combinação permanente considerando o uso do concreto C20:

Laje L1: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/4 = 1,25$; do quadro 2.4 $\alpha = 3,55$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação permanente

($p = g$) é calculada por:

$$f = \frac{3,675 \text{ kN/m}^2 \times 4^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times \frac{3,55}{100} = 0,003064 \text{ m ou } 0,31 \text{ cm}$$

Laje L2: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/3 = 1,67 \cong 1,70$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,88$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação permanente

($p = g$) é calculada por:

$$f = \frac{3,675 \text{ kN/m}^2 \times 3^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,88 = 0,001333 \text{ m ou } 0,13 \text{ cm}$$

Laje L3: Caso 3

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 7/5 = 1,40$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,65$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação permanente

($p = g$) é calculada por:

$$f = \frac{3,675 \text{ kN/m}^2 \times 5^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,65 = 0,009799 \text{ m ou } 0,98 \text{ cm}$$

C.4 Cálculo das flechas elásticas para combinação quase permanente considerando o uso do concreto C20:

Laje L1: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/4 = 1,25$; do quadro 2.4 $\alpha = 3,55$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação quase permanente ($p = g + 0,4q$) é calculada por:

$$f = \frac{(3,675 + 0,4 \times 2) \text{ kN/m}^2 \times 4^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times \frac{3,55}{100} = 0,003731 \text{ m ou } 0,37 \text{ cm}$$

Laje L2: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/3 = 1,67 \cong 1,70$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,88$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação quase permanente ($p = g + 0,4q$) é calculada por:

$$f = \frac{(3,675 + 0,4 \times 2) \text{ kN/m}^2 \times 3^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,88 = 0,001623 \text{ m ou } 0,16 \text{ cm}$$

Laje L3: Caso 3

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 7/5 = 1,40$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,65$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação quase permanente ($p = g + 0,4q$) é calculada por:

$$f = \frac{(3,675 + 0,4 \times 2) \text{ kN/m}^2 \times 5^4 \text{ m}}{21287370 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,65 = 0,011933 \text{ m ou } 1,19 \text{ cm}$$

C.5 Cálculo das flechas elásticas devido às vibrações em virtude da carga acidental considerando o uso do concreto C20:

Combinação rara- combinação permanente

Laje L1:

$$f = 0,47 \text{ cm} - 0,31 \text{ cm} = 0,16 \text{ cm}$$

Laje L2:

$$f = 0,21 \text{ cm} - 0,13 \text{ cm} = 0,08 \text{ cm}$$

Laje L3:

$$f = 1,51 \text{ cm} - 0,98 \text{ cm} = 0,53 \text{ cm}$$

C.6 Cálculo do módulo de deformação secante do concreto C50

De acordo com a equação (2.7), o módulo de elasticidade do concreto para classe C50, considerando o uso de agregado de granito ou gnaisse, pode ser calculado por:

$$E_{ci} = 1 \times 5600\sqrt{50} = 39597,98 \text{ MPa}$$

De acordo com a equação (2.8), o módulo de deformação secante do concreto para classe C50, pode ser calculado por:

$$E_{cs} = 0,93 \times 5600\sqrt{50} = 36826,12\text{MPa}$$

Sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{50}{80} = 0,93$$

C.7 Cálculo das flechas elásticas para combinação rara considerando o uso do concreto C50:

Laje L1: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/4 = 1,25$; do quadro 2.4 $\alpha = 3,55$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação de totalidade de cargas ($p = g + q$) é dada por:

$$f = \frac{5,675 \text{ kN/m}^2 \times 4^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times \frac{3,55}{100} = 0,002735 \text{ m ou } 0,27 \text{ cm}$$

Laje L2: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 3/4 = 1,67 \cong 1,70$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,88$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação de totalidade de cargas ($p = g + q$) é dada por:

$$f = \frac{5,675 \text{ kN/m}^2 \times 3^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times \frac{4,88}{100} = 0,001190 \text{ m ou } 0,12 \text{ cm}$$

Laje L3: Caso 3

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 7/5 = 1,40$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,65$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação de totalidade de cargas ($p = g + q$) é dada por:

$$f = \frac{5,675 \text{ kN/m}^2 \times 5^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times \frac{4,65}{100} = 0,008747 \text{ m ou } 0,87 \text{ cm}$$

C.8 Cálculo das flechas elásticas para combinação permanente considerando o uso do concreto C50:

Laje L1: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/4 = 1,25$; do quadro 2.4 $\alpha = 3,55$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação permanente

($p = g$) é calculada por:

$$f = \frac{3,675 \text{ kN/m}^2 \times 4^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times \frac{3,55}{100} = 0,001771 \text{ ou } 0,18 \text{ cm}$$

Laje L2: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/3 = 1,67 \cong 1,70$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,88$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação permanente

($p = g$) é calculada por:

$$f = \frac{3,675 \text{ kN/m}^2 \times 3^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,88 = 0,000770 \text{ m ou } 0,08 \text{ cm}$$

Laje L3: Caso 3

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 7/5 = 1,40$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,65$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação permanente ($p = g$) é calculada por:

$$f = \frac{3,675 \text{ kN/m}^2 \times 5^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,65 = 0,005665 \text{ m ou } 0,57 \text{ cm}$$

C.9 Cálculo das flechas elásticas para combinação quase permanente considerando o uso do concreto C50:

Laje L1: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/4 = 1,25$; do quadro 2.4 $\alpha = 3,55$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação quase permanente ($p = g + 0,4q$) é calculada por:

$$f = \frac{(3,675 + 0,4 \times 2) \text{ kN/m}^2 \times 4^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times \frac{3,55}{100} = 0,002157 \text{ ou } 0,22 \text{ cm}$$

Laje L2: Caso 4

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 5/3 = 1,67 \cong 1,70$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,88$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação quase permanente ($p = g + 0,4q$) é calculada por:

$$f = \frac{(3,675 + 0,4 \times 2) \text{ kN/m}^2 \times 3^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,88 = 0,000938 \text{ m ou } 0,09 \text{ cm}$$

Laje L3: Caso 3

Utilizando a equação (2.11) têm-se:

Para $l_y/l_x = 7/5 = 1,40$; do quadro 2.4 $\alpha = 4,65$

De acordo com a equação (2.17) a flecha para a combinação quase permanente ($p = g + 0,4q$) é calculada por:

$$f = \frac{(3,675 + 0,4 \times 2) \text{ kN/m}^2 \times 5^4 \text{ m}}{36826120 \text{ kN/m}^2 \times 0,08^3 \text{ m}} \times 4,65 = 0,006898 \text{ m ou } 0,69 \text{ cm}$$

C.10 Cálculo das flechas elásticas devido às vibrações considerando o uso do concreto C50:

Combinação rara – combinação permanente

Laje L1:

$$f = 0,27 \text{ cm} - 0,18 \text{ cm} = 0,09 \text{ cm}$$

Laje L2:

$$f = 0,12 \text{ cm} - 0,08 \text{ cm} = 0,04 \text{ cm}$$

Laje L3:

$$f = 0,87 \text{ cm} - 0,57 \text{ cm} = 0,30 \text{ cm}$$

C.11 Cálculo das flechas limites para combinação quase permanente

Laje L1

Utilizando a tabela 2.7 têm-se:

$$\frac{400 \text{ cm}}{250} = 1,60 \text{ cm}$$

Laje L2

Utilizando a tabela 2.7 têm-se:

$$\frac{300 \text{ cm}}{250} = 1,20 \text{ cm}$$

Laje L3

Utilizando a tabela 2.7 têm-se:

$$\frac{500 \text{ cm}}{250} = 2 \text{ cm}$$

C.12 Cálculo das flechas limites devido às vibrações na estrutura em virtude da carga acidental

Laje L1

Utilizando a tabela 2.7 têm-se:

$$\frac{400 \text{ cm}}{350} = 1,14 \text{ cm}$$

Laje L2

Utilizando a tabela 2.7 têm-se:

$$\frac{300 \text{ cm}}{350} = 0,86 \text{ cm}$$

Laje L3

Utilizando a tabela 2.7 têm-se:

$$\frac{500 \text{ cm}}{350} = 1,43 \text{ cm}$$

APÊNDICE D – ANÁLISE DA REDUÇÃO DE DEFORMAÇÕES

D.1 Combinação rara

Laje L1

$$\frac{0,27}{0,47} \times 100 = 57,45\%$$

$$100\% - 57,45\% = 42,55\%$$

Laje L2

$$\frac{0,12}{0,21} \times 100 = 57,14\%$$

$$100\% - 57,14\% = 42,86\%$$

Laje L3

$$\frac{0,87}{1,51} \times 100 = 57,62\%$$

$$100\% - 57,62\% = 42,38\%$$

D.2 Combinação permanente

Laje L1

$$\frac{0,18}{0,31} \times 100 = 58,06\%$$

$$100\% - 58,06\% = 41,94\%$$

Laje L2

$$\frac{0,08}{0,13} \times 100 = 61,54\%$$

$$100\% - 61,54\% = 38,46\%$$

Laje L3

$$\frac{0,57}{0,98} \times 100 = 58,16\%$$

$$100\% - 58,16\% = 41,84 \%$$

D.3 Combinação quase permanente

Laje L1

$$\frac{0,22}{0,37} \times 100 = 59,46\%$$

$$100\% - 59,46\% = 40,54\%$$

Laje L2

$$\frac{0,09}{0,16} \times 100 = 56,25\%$$

$$100\% - 56,25\% = 43,75 \%$$

Laje L3

$$\frac{0,69}{1,19} \times 100 = 57,98\%$$

$$100\% - 57,98\% = 42,02 \%$$

D.4 Flecha devido às vibrações na estrutura em virtude da carga acidental

Laje L1

$$\frac{0,09}{0,16} \times 100 = 56,25\%$$

$$100\% - 56,25\% = 43,75\%$$

Laje L2

$$\frac{0,04}{0,08} \times 100 = 50\%$$

$$100\% - 50\% = 50 \%$$

Laje L3

$$\frac{0,30}{0,53} \times 100 = 56,60\%$$

$$100\% - 56,60\% = 43,40 \%$$