

N. CLASS.	MG 4.18.342
CUTTER	S586d
ANO/EDIÇÃO	2014

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS - UNIS - MG

ENGENHARIA CIVIL

LETÍCIA MAC-INTYUS BRAGA SILVA

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO PARA DIFERENTES
CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL, CONSIDERANDO OS ESTADOS
LIMITES ULTIMOS E OS DE SERVIÇO.**

**Varginha - MG
2014**

FEPESMIG

LETÍCIA MAC-INTYUS BRAGA SILVA

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO PARA DIFERENTES
CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL, CONSIDERANDO OS ESTADOS
LIMITES ULTIMOS E OS DE SERVIÇO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Civil, sob a orientação do Prof. M.S Antônio de Faria.

**Varginha - MG
2014**

LETÍCIA MAC-INTYUS BRAGA SILVA

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO PARA DIFERENTES
CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL, CONSIDERANDO OS ESTADOS
LIMITES ULTIMOS E OS DE SERVIÇO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenharia Civil pela banca Examinadora.

Aprovado em / /

Prof^o. Me. Antônio de Faria

Prof^o Me. Armando Belato

Prof^o. Me. Luciana Bracarense

OBS.:

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por ter me dado sabedoria e competência para fazê-lo. Depois, dedico este trabalho à minha família, pela compreensão e ajuda durante todo o período deste curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores, que se empenharam ao máximo para transmitir todo o conhecimento possível para a minha formação. E agradeço aos amigos de trabalho pela contribuição em ideias, opiniões e conselhos oferecidos durante a elaboração deste trabalho.

“Quando você puder medir aquilo que está falando e expressá-lo em números, você sabe alguma coisa sobre o que está falando. Quando você não puder expressá-lo em números, o seu conhecimento é parco e insatisfatório. Pode ser o começo de um conhecimento, mas mal se pode dizer que o seu pensamento atingiu o estado da ciência”.

Lord Kelvin

Grupo Educacional UNIS

RESUMO

Neste trabalho serão discutidos os aspectos de dimensionamento e verificação de lajes de concreto armado. Serão apresentados os estados limites últimos e estados limites de serviço, bem como as verificações necessárias para garantia das condições de segurança e durabilidade das lajes. Serão descritos os principais critérios a serem observados durante o dimensionamento, bem como as disposições a serem observadas para o correto detalhamento das lajes. Tais critérios e disposições são baseados na NBR 6118:2014.

Será proposto o dimensionamento de lajes de concreto armado, baseado nos critérios e disposições apresentadas neste trabalho. As lajes serão dimensionadas para diferentes classes de agressividade ambiental respeitando-se as disposições da NBR 6118:2014 na consideração dos estados limites de acordo com a classe de agressividade ambiental em questão.

Palavras-chave: Lajes, Durabilidade, Estados Limites, Dimensionamento, Classe de Agressividade Ambiental.

ABSTRACT

In this work aspects of design and verification of reinforced concrete slabs will be discussed. The ultimate limit states and serviceability limit states, as well as the necessary conditions to guarantee the safety and durability of the slabs checks will be presented. Will be describe the main criteria to be observed during the design, as well as provisions to be observed for proper detailing of slabs. Such criteria and provisions are based on the NBR 6118:2014.

Will be proposed the design of reinforced concrete slabs, based on criteria and provisions presented in this work. The slabs will be scaled for different classes of environmental aggression respecting the provisions of ISO 6118:2014 in consideration of limit states according to the class of environmental aggressiveness in question

Keywords: *Slabs, Durability, Limit States, Design, Class Environmental Aggression.*

LISTA DE FIGURAS

01 - Ações definidas para parapeitos.....	21
02 - Momentos fletores em laje em balanço armada em uma direção	27
03 - Compatibilização de momentos	29
04 - Disposição da armadura negativa de borda.....	32
05 - Influência dos estádios no comportamento à flexão e na variação da curvatura	36
06 - Planta de arquitetura de um escritório comercial.....	44
07 - Planta de forma simplificada do pavimento- Concepção estrutural I	45
08 - Planta de forma simplificada do pavimento- Concepção estrutural II.....	46
09 - Representação dos tipos de apoio	47
10 - Esquema estático – Concepção estrutural I.....	47
11 - Esquema estático – Concepção estrutural II	48
12 - Esquema estático da laje L2	49
13 - Esquema estático da laje L6	49
14 - Caso específico de vinculação.....	49
15 - Esquema estático da laje L1	52
16 - Ações da laje L7 (engastada).....	105
17 - Esquema estático representativo da laje L7 (3 apoios).....	110
18 - Esquema estático representativo da laje L8 (3 apoios).....	111
19 - Situação hipotética 1 – Laje engastada.....	124
20 - Situação hipotética 2 – Laje sobre 3 apoios.....	125

LISTA DE TABELAS

01 - Classe de Agressividade Ambiental.....	18
02 - Correspondência entre Classe de Agressividade e Qualidade do Concreto.....	19
03 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c=10$ mm.....	19
04 - Coeficientes $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$	22
05 - Coeficiente de ponderação do γ_{f2}	22
06 - Valores do coeficiente γ_n	23
07 - Taxas mínimas de armadura de flexão.....	30
08 - Valores mínimos para armaduras passivas aderentes.....	31
09 - Coeficiente ξ em função do tempo.....	42
10 - Deslocamentos Limites (aceitabilidade sensorial).....	43
11 - Critérios para bordas com uma parte engastada e outra apoiada.....	50
12 - Carregamento das lajes internas.....	103
13 - Carregamento da laje engastada L7- Concepção estrutural I.....	104
14 - Carregamento das lajes sobre 3 apoios- Concepção estrutural II.....	106
15 - Momentos fletores de cálculo – Laje L1.....	107
16 - Momentos fletores de cálculo – Laje L2.....	107
17 - Momentos fletores de cálculo – Laje L3.....	107
18 - Momentos fletores de cálculo – Laje L4.....	107
19 - Momentos fletores de cálculo – Laje L5.....	108
20 - Momentos fletores de cálculo – Laje L6.....	108
21 - Momentos fletores de cálculo – Laje L7 (engastada).....	108
22 - Momentos fletores de cálculo – Laje L7 (3 apoios).....	109
23 - Coeficientes μ – Laje L7 (3 apoios).....	109
24 - Momentos fletores de cálculo – Laje L8 (3 apoios).....	110
25 - Coeficientes μ – Laje L8 (3 apoios).....	111
26 - Áreas de aço – Laje L1- CAA I.....	112
27 - Áreas de aço – Laje L2- CAA I.....	112
28 - Áreas de aço – Laje L3- CAA I.....	113
29 - Áreas de aço – Laje L4- CAA I.....	113
30 - Áreas de aço – Laje L5- CAA I.....	114
31 - Áreas de aço – Laje L6- CAA I.....	114
32 - Áreas de aço – Laje L7 (engastada)- CAA I.....	115
33 - Áreas de aço – Laje L7 (3 apoios)- CAA I.....	115
34 - Áreas de aço – Laje L8 (3 apoios)- CAA I.....	116
35 - Verificação da flecha elástica Laje L1.....	116
36 - Verificação da flecha elástica Laje L2.....	117
37 - Verificação da flecha elástica Laje L3.....	117
38 - Verificação da flecha elástica Laje L4.....	117
39 - Verificação da flecha elástica Laje L5.....	117
40 - Verificação da flecha elástica Laje L6.....	117
41 - Verificação da flecha elástica Laje L7(engastada).....	118
42 - Verificação da flecha elástica Laje L7 (3 apoios).....	118
43 - Verificação da flecha elástica Laje L8 (3 apoios).....	119
44 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L1.....	119
45 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L2.....	119

46 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L3.....	120
47 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L4.....	120
48 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L5.....	120
49 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L6.....	120
50 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L7 (engastada).....	121
51 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L7 (3 apoios).....	121
52 - Verificação da flecha total no tempo ∞ - Laje L8 (3 apoios).....	121
53 - Consumo e indicadores de consumo- Concepção estrutural I – CAA I.....	122
54 - Consumo e indicadores de consumo- Concepção estrutural II – CAA I.....	122
55 - Consumo e indicadores de consumo- Concepção estrutural I – CAA II.....	122
56 - Consumo e indicadores de consumo- Concepção estrutural II – CAA II.....	122
57 - Consumo e indicadores de consumo- Concepção estrutural I – CAA III.....	123
58 - Consumo e indicadores de consumo- Concepção estrutural II – CAA III.....	123
59 - Consumo e indicadores de consumo- Concepção estrutural I – CAA IV.....	123
60 - Consumo e indicadores de consumo- Concepção estrutural II – CAA IV.....	123
61 - Histórico de verificações ELU/ELS para as lajes em balanço.....	125
62 - Influência dos ponderadores adicionais na majoração dos esforços da laje L7(engastada).....	126
63 - Influência dos ponderadores adicionais na majoração dos esforços da laje L7(3 apoios).....	127
64 - Influência dos ponderadores adicionais na majoração dos esforços da laje L8(3 apoios).....	128
65 - Influência dos ponderadores adicionais no histórico de verificações ELU/ELS para as lajes em balanço.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAA – Classe de agressividade ambiental

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Serviço

NBR – Norma Brasileira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo geral	17
2.2 Objetivo específico	17
3. METODOLOGIA.....	17
4. REFERENCIAL TEÓRICO	18
4.1 Classes de agressividade ambiental.....	18
4.2 Cobrimentos mínimos e espessuras em lajes de concreto armado.....	19
4.2.1 Cobrimentos mínimos	19
4.2.2 Espessuras mínimas.....	19
4.3 Esforços	20
4.3.1 Ações	20
4.3.1.1 Coeficientes de ponderação das ações para os estados limites últimos.....	21
4.3.1.2 Coeficientes de ponderação das ações para os estados limites de serviço	23
4.3.1.3 Combinação de ações	23
4.3.1.3.1 Combinações últimas.....	24
4.3.1.3.2 Combinações de serviço	24
4.3.2 Momentos	26
4.3.2.1 Lajes armadas em uma direção.....	26
4.3.2.2 Lajes armadas em duas direções.....	27
4.3.2.3 Momentos fletores de cálculo.....	28
4.3.2.4 Compatibilização de momentos fletores.....	28
4.4 Dimensionamento das armaduras.....	29
4.4.1 Cálculo das armaduras.....	29
4.4.2 Cálculo das armaduras mínimas	30
4.4.3 Cálculo das armaduras passivas aderentes	31
4.4.4 Detalhamento das armaduras.....	32
4.4.4.1 Diâmetro máximo	32
4.4.4.2 Espaçamento máximo e mínimo.....	32
4.4.4.3 Armadura de distribuição e secundária de flexão.....	33
4.4.4.4 Comprimento das armaduras positivas.....	33
4.4.4.5 Comprimento das armaduras negativas nos apoios com continuidade	33
4.4.4.6 Comprimento das armaduras de distribuição e secundárias de flexão	34
4.4.4.7 Comprimento da armadura negativa de borda.....	34
4.5 Verificação das flechas	35
4.5.1 Existência de fissuras.....	35
4.5.1.1 Verificação dos estádios	35
4.5.2 Momento de fissuração.....	36
4.5.3 Momento de inércia	37
4.5.4 Flecha	40
4.5.4.1 Flecha elástica.....	40
4.5.4.2 Flecha imediata.....	41
4.5.4.3 Flecha diferida	41
4.5.4.4 Flecha total no tempo infinito.....	42
4.5.4.5 Flecha limite	43

5.DIMENSIONAMENTO.....	43
5.1 Considerações preliminares.....	44
5.2 Esquema estático das lajes do pavimento.....	46
5.3 Exemplo prático de dimensionamento (Laje L1).....	50
5.3.1 Dimensionamento da Laje L1 para a classe de agressividade ambiental I.....	50
5.3.1.1 Esforços	50
5.3.1.1.1 Ações	50
5.3.1.1.2 Momentos fletores	52
5.3.1.2 Armaduras longitudinais de flexão.....	54
5.3.1.2.1 Armadura calculada.....	54
5.3.1.2.2 Armadura mínima.....	58
5.3.1.2.3 Armadura passiva aderente.....	59
5.3.1.3 Momentos de fissuração	60
5.3.1.4 Momento de inércia de Branson.....	60
5.3.1.5 Flechas	62
5.3.1.5.1 Flechas elásticas	62
5.3.1.5.2 Flechas totais no tempo infinito.....	63
5.3.2 Dimensionamento da Laje L1 para a classe de agressividade ambiental II	64
5.3.2.1 Esforços	65
5.3.2.1.1 Ações	65
5.3.2.1.2 Momentos fletores	65
5.3.2.2 Armaduras longitudinais de flexão.....	67
5.3.2.2.1 Armadura calculada.....	67
5.3.2.2.2 Armadura mínima.....	72
5.3.2.2.3 Armadura passiva aderente.....	73
5.3.2.3 Momentos de fissuração	73
5.3.2.4 Momento de inércia de Branson.....	74
5.3.2.5 Flechas	76
5.3.2.5.1 Flechas elásticas	76
5.3.2.5.2 Flechas totais no tempo infinito.....	77
5.3.3 Dimensionamento da Laje L1 para a classe de agressividade ambiental III	78
5.3.3.1 Esforços	78
5.3.3.1.1 Ações	79
5.3.3.1.2 Momentos fletores	79
5.3.3.2 Armaduras longitudinais de flexão.....	80
5.3.3.2.1 Armadura calculada.....	80
5.3.3.2.2 Armadura mínima.....	85
5.3.3.2.3 Armadura passiva aderente.....	86
5.3.3.3 Momentos de fissuração	86
5.3.3.4 Momento de inércia de Branson.....	87
5.3.3.5 Flechas	88
5.3.3.5.1 Flechas elásticas	89
5.3.3.5.2 Flechas totais no tempo infinito.....	90
5.3.4 Dimensionamento da Laje L1 para a classe de agressividade ambiental IV	90
5.3.4.1 Esforços	91
5.3.4.1.1 Ações	91
5.3.4.1.2 Momentos fletores	91
5.3.4.2 Armaduras longitudinais de flexão.....	92

5.3.4.2.1 Armadura calculada.....	93
5.3.4.2.2 Armadura mínima.....	97
5.3.4.2.3 Armadura passiva aderente.....	97
5.3.4.3 Momentos de fissuração	98
5.3.4.4 Momento de inércia de Branson.....	99
5.3.4.5 Flechas.....	100
5.3.4.5.1 Flechas elásticas	100
5.3.4.5.2 Flechas totais no tempo infinito.....	101
6. RESULTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO	102
6.1 Resultados para os esforços	102
6.1.1 Resultados para as ações.....	103
6.1.2 Resultados para momentos fletores de cálculo.....	107
6.2 Resultados para as armaduras longitudinais de flexão.....	111
6.3 Resultados para a verificação das flechas	116
6.3.1 Resultados para a verificação das flechas elásticas.....	116
6.3.2 Resultados para a verificação das flechas totais no tempo infinito	119
6.4 Resultados para os quantitativos de materiais e indicadores de consumo.....	121
7. ANÁLISE DOS RESULTADOS	123
7.1 Análises dos resultados obtidos para o quantitativo de materiais e indicadores de consumo nas lajes do pavimento	123
7.2 Análises dos resultados para as lajes em balanço.....	124
7.2.1 Análises da concepção estrutural para as lajes em balanço.....	124
7.2.2 Análises dos ponderadores adicionais para as lajes em balanço	126
CONCLUSÕES.....	130
ANEXO A.....	132
ANEXO B.....	135
REFERÊNCIAS	139

1. INTRODUÇÃO

Com a entrada em vigor da nova NBR 6118:2014, o cálculo, o dimensionamento e a construção de estruturas de concreto passam a ser encarados sob um novo ponto de vista.

Dentre as principais alterações que a norma apresentou são destacadas para efeito deste trabalho: os ponderadores adicionais para as lajes em balanço, a consideração do tipo de agregado na formulação do módulo de elasticidade do concreto e o refinamento no dimensionamento de armadura contra o colapso progressivo em lajes.

O enfoque da nova norma demonstra a necessidade de maior critério do projetista de estruturas na especificação dos itens relacionados às questões de durabilidade, como qualidade do concreto de cobrimento e detalhamento das armaduras.

Nesse contexto, são apresentados os critérios que devem ser observados pelo projetista, bem como as verificações pertinentes no ELU e ELS necessárias ao dimensionamento das estruturas de concreto.

Para efeitos deste trabalho são estudadas as lajes de concreto armado, bem como as condições necessárias à garantia das condições de segurança e durabilidade. As lajes são dimensionadas em ambientes distintos, de acordo com as definições da norma, pertinentes a classe de agressividade ambiental. A definição desta classe de agressividade ambiental (CAA) é fundamental na concepção do projeto estrutural, pois influencia nos valores mínimos de resistências características que devem ser respeitados e no valor mínimo do cobrimento de armadura.

Por fim, é realizado um comparativo entre os resultados obtidos no dimensionamento das lajes para cada classe de agressividade ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Dimensionar lajes de concreto armado para diferentes classes de agressividade ambiental, considerando estados limites últimos e estados limites de serviço.

2.2 Objetivo específico

- Abordar aspectos relativos ao dimensionamento e verificação de lajes de concreto armado baseando-se nas disposições da NBR 6118:2014.
- Realizar o dimensionamento de lajes de concreto armado de um pavimento de uma edificação comercial para cada classe de agressividade ambiental.
- Comparar os resultados obtidos nas lajes de concreto armado para as diferentes classes de agressividade ambiental.

3 METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento do presente trabalho é baseada primeiramente em um estudo teórico, fundamentado nas disposições da NBR 6118:2014 onde são discutidos os aspectos de dimensionamento, detalhamento e verificação de lajes de concreto armado. Para a estruturação deste estudo são apresentados os estados limites últimos e estados limites de serviço.

Com base nos critérios e verificações apresentadas no estudo teórico, será realizado na prática o dimensionamento de lajes de concreto armado de um pavimento de uma edificação comercial de 279 m². Para o cálculo das lajes de tal pavimento será utilizado o programa Microsoft Office Excel, versão 2010, como ferramenta computacional.

O dimensionamento será realizado considerando-se diferentes classes de agressividade ambiental. Assim, uma mesma laje será dimensionada para ambientes distintos, de forma a comparar os resultados para o dimensionamento, bem como apresentar as diferenças entre tais elementos. Para cada classe de agressividade ambiental, deverão ser respeitadas disposições da NBR 6118:2014, de forma a garantir a durabilidade da estrutura.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem por objetivo, analisar as contribuições teóricas que serão utilizadas para a estruturação deste estudo. Neste sentido, ele está dividido em seções. Esta primeira seção relaciona o ordenamento do capítulo, encadeando os assuntos selecionados de acordo com o eixo que rege a pesquisa.

4.1 Classes de agressividade ambiental

Segundo a NBR 6118:2014, item 6.4.1 a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas.

Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o apresentado na Tabela 1 e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Tabela 01: Classe de Agressividade Ambiental

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

Fonte: O autor (adaptada de NBR 6118:2014, item 6.4.2, tabela 6.1).

“Ensaio comprobatório de desempenho da durabilidade da estrutura frente ao tipo e nível de agressividade previsto em projeto devem estabelecer os parâmetros mínimos a serem atendidos. Na falta destes e devido à existência de uma forte correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade, permite-se adotar os requisitos mínimos [...]” (NBR 6118:2014, item 7.4.2)

A Tabela 2 seguir apresenta os requisitos mínimos referentes à correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Tabela 02: Correspondência entre Classe de Agressividade e Qualidade do Concreto

Concreto Armado	Classe de Agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água / cimento em massa	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
Classe de concreto	C20	C25	C30	C40

Fonte: O autor (adaptada de NBR 6118:2014, item 7.4.2, tabela 7.1).

4.2 Cobrimentos mínimos e espessuras em lajes de concreto armado

4.2.1 Cobrimentos mínimos

São especificados os valores de cobrimentos mínimos para armaduras das lajes, de acordo com a agressividade do meio em que se encontram.

“Cobrimento mínimo é a menor distância livre entre uma face da peça e a camada de barras mais próxima dessa face [...], devendo ser observado ao longo de todo o elemento considerado”. (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2013, p.161).

“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 (Δ_c)”. (NBR 6118:2014, item 7.4.7.2).

Nas obras correntes o valor de Δ_c deve ser maior ou igual a 10 mm. Esse valor pode ser reduzido para 5 mm quando houver um adequado controle de qualidade e rígidos limites de tolerância da variabilidade das medidas durante a execução das estruturas de concreto.

A tabela a seguir, refere-se à correspondência entre a classe de agressividade e cobrimento nominal, considerando $\Delta_c=10$ mm.

Tabela 03: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta_c=10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
	Laje	20	25	35	45

Fonte: O autor (adaptada de NBR 6118:2014, item 7.4.7.6, tabela 7.2)

4.2.2 Espessuras mínimas em lajes de concreto armado

A prescrição de valores limites mínimos a serem atendidos para as dimensões das lajes tem por objetivo evitar um desempenho inaceitável para as mesmas e propiciar condições de execução adequadas. (NBR 6118:2014, item 13.2.1)

De acordo com a NBR 6118:2014, item 13.2.4.1 nas lajes de concreto armado deve ser respeitado os seguintes limites mínimos para a espessura:

- 7 cm para cobertura não em balanço;
- 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

4.3 Esforços

4.3.1 Ações

“Na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis **estados limites últimos e os de serviço**”. (NBR 6118:2014, item 11.2.1, grifo nosso).

Estado limite último (ELU) é aquele relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura. (NBR 6118:2014, item 3.2.1)

Estados limites de serviço (ELS) são aqueles relacionados à durabilidade, aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional das mesmas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas (NBR 6118:2014, item 10.4). E que segundo a NBR 8681:2003, item 3.3, são “[...] Estados que, por sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção [...]”

Segundo a NBR 8681:2003, item 4.2.1, as ações a considerar classificam-se segundo a sua variabilidade no tempo em ações permanentes, variáveis e excepcionais. Nas construções de edifícios correntes, geralmente as ações principais a serem consideradas são as ações permanentes (g) e as ações variáveis (q).

“Ações permanentes são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida da construção. Também são consideradas como permanentes as ações que crescem no tempo, tendendo a um valor limite constantes”. (NBR 6118:2014, item 11.3.1).

As principais ações permanentes diretas que devem ser verificadas e determinadas nas lajes são aquelas relativas ao peso próprio, revestimento e reações das paredes.

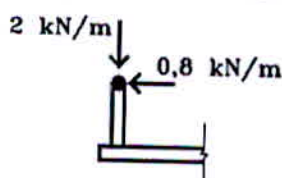
“Consideram-se como ações variáveis as cargas acidentais das construções [...]” (NBR 8681:2003, item 4.2.1.2), bem como, os efeitos que ocorrem com valores que apresentam variações significativas durante a vida útil da estrutura.

A ação variável nas lajes é tratada pela NBR 6120:1980 (item 2.2) como “carga acidental”. Na prática costumam chamar também de “sobrecarga”. A carga acidental é definida pela NBR 6120:1980 como “toda aquela que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso” (pessoas, móveis, materiais diversos, veículos, etc.).

As cargas acidentais dependem do tipo de uso do elemento em questão, incluindo a questão da acessibilidade ao público. Para as lajes em balanço com acesso ao público, a carga acidental a ser considerada, é de 3 kN/m² enquanto que para aquelas sem acesso ao público a carga acidental a ser considerada é de 2,0 kN/m², conforme NBR 6120:1980, Tabela 2.

Outro aspecto a ser considerado para as lajes em balanço, diz respeito às cargas acidentais que devem ser aplicadas ao longo de parapeitos e balcões. Segundo a NBR 6120:1980, item 2.2.1.5 “ao longo dos parapeitos e balcões devem ser consideradas aplicadas uma carga horizontal de 0,8 kN/m na altura do corrimão e uma carga vertical mínima de 2 kN/m”.

Figura 01: Ações definidas para parapeitos



Fonte: Pinheiro, Melges; Giongo (1997, p.7).

4.3.1.1 Coeficientes de ponderação das ações para os estados limites últimos

Segundo a NBR 6118:2014, item 11.7, “as ações devem ser majoradas por um coeficiente γ_f [...]”, que pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3} \text{ (Eq.1.0)}$$

“Quando se consideram estados limites últimos, os coeficientes γ_f de ponderação das ações podem ser considerados como o produto de dois outros, γ_{f1} e γ_{f3} (o coeficiente de combinação ψ_0 faz o papel do terceiro coeficiente, que seria indicado por γ_{f2}). O coeficiente parcial γ_{f1} leva em conta a variabilidade das ações e o coeficiente γ_{f3} considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, seja por problemas construtivos, seja por deficiência do método de cálculo empregado”. (NBR 8681:2003, item 4.2.3.1)

Os valores base para verificação dos estados limites últimos são os apresentados nas Tabelas 04 e 05 para $\gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$ e γ_{f2} , respectivamente.

Tabela 04: Coeficientes $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$

Combinações de ações	Ações			
	Permanentes ($\gamma_g = \gamma_f$)		Variáveis ($\gamma_q = \gamma_f$)	
	Desfavorável	Favorável	Geral	Temporária
Normais	1,4	1,0	1,4	1,2
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0

Fonte: O autor (adaptada de NBR 6118:2014, item 11.7.1, tabela 11.1).

Onde D é o efeito desfavorável, F é o efeito favorável, G representa as cargas variáveis e T é a temperatura.

Como exemplo observa-se na tabela 05 que para as cargas permanentes o coeficiente de ponderação γ_f a ser adotado, considerando combinação normal e efeito desfavorável é de 1,4.

Tabela 05: Coeficiente de ponderação do γ_{f2}

Cargas acidentais de edifícios	γ_{f2}		
	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas.	0,5	0,4	0,3
Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas.	0,7	0,6	0,4
Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens.	0,8	0,7	0,6

Fonte: O autor (adaptada da NBR 6118:2014, item 11.7.1, tabela 11.2).

Onde:

Ψ_0 é o fator de redução de combinação para o estado limite ultimo.

Ψ_1 e Ψ_2 são os fatores de redução de combinação para o estado limite de serviço.

“Para elementos estruturais esbeltos críticos [...] como [...] **lajes em balanço** com espessura inferior a 19 cm, os esforços solicitantes de cálculo devem ser multiplicados pelo coeficiente de ajustamento γ_n ”. (NBR 6118:2014, item 11.7.1, grifo nosso). Este coeficiente pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$\gamma_n = 1,95 - 0,05 h \text{ (Eq.1.1)}$$

Sendo h a espessura da laje.

Entende-se por γ_n o coeficiente de ajuste de γ_f , que considera o aumento de probabilidade de ocorrência de desvios relativos significativos na construção (aplicado em pilares, pilares paredes e **lajes em balanço** com dimensões abaixo de certos valores). A tabela a seguir refere-se aos valores de γ_n que devem ser adotados para esses elementos.

Tabela 06: Valores do coeficiente γ_n

h cm	≥ 19	≥ 18	≥ 17	≥ 16	≥ 15	≥ 14	≥ 13	≥ 12	≥ 11	≥ 10
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45

Fonte: O autor (adaptada da NBR 6118:2014, item 13.2.4.1, tabela 13.2).

Como exemplo, se considerarmos uma espessura de laje em balanço igual a 10 cm (dimensão mínima estabelecida pela NBR 6118:2014, item 13.2.4.1) o valor do coeficiente de ajuste γ_n que deve ser adotado é de 1,45. (ver Tabela 06)

4.3.1.2 Coeficientes de ponderação das ações para os estados limites de serviço

De acordo com a NBR 6118:2014, item 11.7.2, os coeficientes de ponderação das ações para os estados limites de serviço são tomados com valor $\gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3} = 1$, logo $\gamma_f = \gamma_{f2}$, em que γ_{f2} tem valor variável conforme verificação desejada.

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

$\gamma_{f2} = \psi_1$ para combinações frequentes (ver tabela 06 deste trabalho)

$\gamma_{f2} = \psi_2$ para combinações quase permanentes (ver tabela 06 deste trabalho)

4.3.1.3 Combinações das ações

“Um tipo de carregamento é definido pelo conjunto das ações que têm probabilidade não desprezível de atuarem simultaneamente sobre uma estrutura, durante um período preestabelecido”. (NBR 8681:2003, item 4.3.1.1)

“[...] as ações devem ser combinadas de diferentes maneiras, a fim de que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura”. (NBR 8681:2003, item 4.3.1.2)

Em todas as combinações, “as ações permanentes são consideradas em sua totalidade. Das ações variáveis são consideradas apenas parcelas que produzem efeitos desfavoráveis para a segurança [...] [...] As ações incluídas em cada uma destas combinações devem ser consideradas com seus valores representativos, multiplicados pelos respectivos coeficientes de ponderação das ações”. (NBR 8681:2003, item 4.3.3.1)

“A verificação da segurança em relação aos estados limites último é feita em função das combinações últimas de ações. A verificação da segurança em relação aos estados limites de serviço é feita em função das combinações de serviço”. (NBR 8681:2003, item 4.3.1.3)

4.3.1.3.1 Combinações últimas

Será objeto de estudo deste trabalho, as combinações últimas classificadas como normais.

Combinações últimas normais: “O carregamento normal decorre do uso previsto para construção [...] e sempre deve ser considerado na verificação da segurança [...]” (NBR 8681:2003, item 4.3.2.1)

Para este tipo de combinação devem estar incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas como secundárias, com seus valores reduzidos de combinação, conforme (NBR 6118:2014, item 11.8.2.1).

4.3.1.3.2 Combinações de serviço

As combinações de serviço podem ser classificadas de acordo com a sua permanência na estrutura, como: **quase permanentes, frequentes, ou raras.**

- Combinações quase permanentes de serviço: Segundo a NBR 6118:2014, item 11.8.3.1, estas combinações podem atuar durante grande parte da vida da estrutura e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado limite de deformações excessivas.

“Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes”. (NBR 8681:2003, item 5.1.5.1)

O cálculo da ação de serviço para combinação quase permanente de acordo com tabela 11.4 da NBR 6118:2014 é feito segundo a equação:

$$F_{d,ser} = F_{gik} + \psi_2 F_{q1k} \text{ (Eq.1.2)}$$

Onde: F_g = ações permanentes características;

ψ_2 = fator de redução de combinação frequente para ELS (ver tabela 05 deste trabalho)

F_{q1k} = ação variável característica principal;

- Combinações frequentes de serviço: De acordo com a NBR 6118:2014, item 11.8.3.1, as combinações frequentes se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura e sua consideração pode ser necessária na verificação dos estados limites de formação de fissuras, de abertura de fissuras e de vibrações excessivas”.

“Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável principal [...] é tomada com seu valor frequente [...] e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes [...]” (NBR 8681:2003, item 5.1.5.2) .O cálculo da ação de serviço para combinação frequente de acordo com tabela 11.4 da NBR 6118:2014 é feito segundo a equação:

$$F_{d,ser} = F_{gik} + \psi_1 F_{q1k} + \psi_2 F_{qjk} \text{ (Eq.1.3)}$$

Onde: F_g = ações permanentes características;

ψ_1 = fator de redução de combinação frequente para ELS (ver tabela 05 deste trabalho)

ψ_2 = fator de redução de combinação quase permanente para ELS (ver tabela 05 deste trabalho)

F_{q1k} = ação variável característica principal;

F_{qjk} = demais ações variáveis características.

- Combinações raras de serviço: “ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado limite de formação de fissuras”. (NBR 6118:2014, item 11.8.3.1).

“Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal [...] é tomada com seu valor característico F_{q1k} e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes $\psi_1.F_{qk}$ ” (NBR 8681:2003, item 5.1.5.3)

O cálculo da ação de serviço para combinação rara de acordo com tabela 11.4 da NBR 6118:2014 é feito segundo a equação:

$$F_{d,ser} = F_{gik} + F_{q1k} + \psi_{1j} F_{qjk} \text{ (Eq.1.4)}$$

Onde: F_g = ações permanentes características;

ψ_1 = fator de redução de combinação frequente para ELS (ver tabela 05 deste trabalho)

F_{q1k} = ação variável característica principal;

F_{qjk} = demais ações variáveis características.

Nas lajes de construções correntes, de modo geral, existe apenas uma ação variável, a carga acidental, conforme definida pela NBR 6120:1980, de modo que as equações 1.3 e 1.4 ficam reduzidas aos dois primeiros termos.

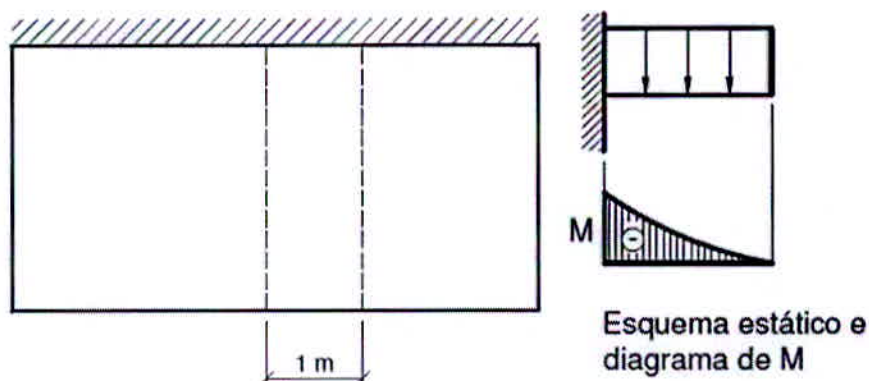
4.3.2 Momentos

Os momentos fletores e as flechas nas lajes de concreto armado são determinados conforme a laje é armada em uma ou em duas direções. As lajes armadas em uma direção são calculadas como vigas segundo a direção principal e as lajes armadas em duas direções podem ser aplicadas diferentes teorias, como a Teoria das Placas.

4.3.2.1 Lajes armadas em uma direção

Em se tratando de lajes armadas em uma direção considera-se simplificada que a flexão na direção do menor vão da laje é preponderante à da outra direção, de modo que a laje será suposta como uma viga com largura constante de um metro (100 cm), segundo a direção principal da laje. Na direção secundária desprezam-se os momentos fletores existentes.

Figura 02: Momentos fletores em laje em balanço armada em uma direção.



Fonte: O autor

4.3.2.2 Lajes armadas em duas direções

Em se tratando de lajes armadas em duas direções, os momentos fletores e as flechas podem ser obtidos por meio de tabelas, com coeficientes para casos específicos de condições de vinculação e relação entre as dimensões da laje.

A solução da equação geral das placas é tarefa muito complexa, o que motivou o surgimento de diversas tabelas, que de um modo em geral abrangem os casos de lajes retangulares, triangulares, circulares, apoiadas em pilares, com bordas livres, etc., sob carregamento uniforme e triangular.

Neste trabalho serão utilizadas as tabelas para os casos de lajes retangulares e com bordas livres, ambas submetidas a um carregamento uniforme. Estas tabelas estão disponibilizadas no anexo A

Para os casos de lajes retangulares as tabelas são baseadas nas soluções em séries desenvolvidas por BARES (1972) e devidamente adaptadas para um coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$.

Para o caso de lajes com bordas livres as tabelas são baseadas em soluções desenvolvidas por BARES (1972) e adaptados por L.M. Pinheiro.

Conforme as tabelas de BARES, os momentos fletores, negativos ou positivos, para lajes sobre quatro apoios são calculados pela expressão:

$$M_a = \frac{\mu \cdot p \cdot l_x^2}{100} \quad (\text{Eq. 1.5})$$

Onde:

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

μ = coeficiente tabelado, de acordo com cada tipo de laje e relação λ

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

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

p = valor da carga uniforme ou triangular atuante na laje (kN/m²);

l_x = menor vão da laje (m).

Em se tratando de lajes retangulares com um borda livre, tratadas neste trabalho como lajes retangulares sobre 3 apoios os momentos fletores são calculados de acordo com a equação 1.5 e de forma análoga as lajes retangulares sobre quatro apoios.

Para o caso de lajes retangulares sobre 3 apoios devem ser calculados ainda, além dos momentos fletores positivos e negativos, os momentos fletores que solicitam a borda livre desse tipo de laje (recebem a notação de M_{yb}).

4.3.2.3 Momentos fletores de cálculo

Para obtenção dos momentos fletores de cálculo, os momentos fletores solicitantes devem ser multiplicados por um coeficiente γ_f ($\gamma_f = 1,4$ para combinações últimas normais).

Em se tratando de lajes em balanço, o coeficiente γ_f deve ser ajustado de um coeficiente adicional γ_n (cujo valor pode ser obtido pela equação 1.1 deste trabalho) para obtenção dos momentos fletores de cálculo.

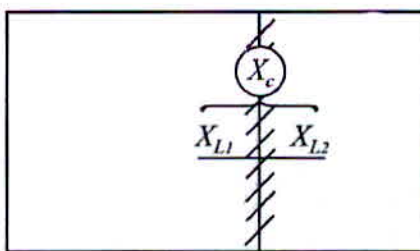
4.3.2.4 Compatibilização de momentos fletores

No trabalho conjunto, as lajes admitidas contínuas apresentam, normalmente, sobre um mesmo apoio, momentos de engastamento diferentes face ao cálculo isolado. Dessa forma, entre lajes contínuas, o momento negativo deve ter valor único, o que requer a compatibilização (uniformização) dos momentos das lajes engastadas.

O item 14.7.6.2 da NBR 6118:2014 permite que seja feita uma compatibilização dos momentos fletores negativos: “Quando houver predominância de cargas permanentes, as lajes vizinhas podem ser consideradas como isoladas, realizando-se compatibilização dos momentos sobre os apoios de forma aproximada. Permite-se, simplificadamente, a adoção do maior valor de momento negativo ao invés de equilibrar os momentos de lajes diferentes sobre uma borda comum”.

A figura a seguir ilustra o procedimento utilizado para compatibilização dos momentos fletores negativos:

Figura 03: Compatibilização de momentos



Fonte: O autor

Assim sendo, convencionou-se simplificadamente para efeitos deste trabalho que o momento compatibilizado X_c seria o **maior** valor entre os obtidos para X_{L1} e X_{L2} .

4.4 Dimensionamento das armaduras

4.4.1 Cálculo das armaduras

Conhecidos os momentos fletores característicos compatibilizados passa-se à determinação das armaduras.

O dimensionamento das armaduras pode ser realizado de acordo com a expressão a seguir:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (\text{Eq. 1.6})$$

Onde:

M_d = momento de cálculo

k_z = coeficiente utilizado no cálculo da armadura;

$$k_z = 1 - 0,4 \cdot k_x \text{ (Eq. 1.7)}$$

d é a altura útil da seção e pode ser obtida pela expressão:

$$d = c + 1,5 \cdot \phi \text{ (Eq. 1.8)}$$

f_{yd} é a resistência de cálculo do aço (menorada pelo coeficiente γ_s);

$$f_{yd} = \frac{f_{cd}}{\gamma_s} \text{ (Eq. 1.9)}$$

Em que:

k_x é a posição da linha neutra no ELU devendo obedecer aos seguintes limites:

$k_x \leq 0,45$ - para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa;

$k_x \leq 0,35$ - para concretos com $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90$ MPa.

As armaduras devem respeitar os valores mínimos recomendados pela NBR 6118:2014 e serem verificadas no ELS.

4.4.2 Cálculo das armaduras mínimas

Segundo a NBR 6118:2014, item 17.3.5.2.1, “a armadura mínima pode ser considerada atendida se forem respeitadas as taxas mínimas ρ_{min} de armadura [...]”.

As taxas mínimas de armaduras estão indicadas na tabela a seguir, sendo:

$$A_{s \min} = \rho_{\min} \cdot A_c \text{ (Eq. 2.0)}$$

Tabela 07: Taxas mínimas de armadura de flexão.

Forma da Seção	Valores de $\rho_{\min}^{(1)}$ ($A_{s,\min}/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,15	0,15	0,15	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

Fonte: O autor (adaptado da NBR 6118:2014, item 17.3.5.2.1, tabela 17.3).

Os valores de ρ_{\min} estabelecidos nesta tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$.

4.4.3 Cálculo das armaduras passivas aderentes

Para a verificação dos estados limites de serviço as taxas de armadura passiva (ρ) definidas na tabela 07 deste trabalho, devem atender as condições da tabela a seguir, sendo:

$$A_s = \rho_s \cdot A_c \text{ (Eq. 2.1)}$$

Onde:

A_s = área de aço

ρ_s = taxa de armadura passiva

A_c = área de concreto

Tabela 08: Valores mínimos para armaduras passivas aderentes

Armadura	Elementos Estruturais sem armaduras ativas
Armaduras Negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$
Armaduras Negativas de Bordas sem Continuidade	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\min}$
Armaduras Positivas de Lajes Armadas em 2 direções	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\min}$
Armaduras Positivas (Principal) de Lajes Armadas em 1 direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$
Armaduras Positivas (Secundária) de Lajes Armadas em 1 direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$

Fonte: O autor (adaptado da NBR 6118:2014, item 19.3.3.2, tabela 19.1).

Pela análise da tabela 08 pode-se constatar que:

- A NBR 6118:2014 permite reduzir a armadura positiva mínima a $0,67\rho_{\min}$ em lajes planas armadas em duas direções. Segundo CARVALHO & FIGUEIREDO (2013, p.321) “[...] lajes armadas em duas direções tem outros mecanismos resistentes, os valores mínimos das armaduras positivas são reduzidos em relação aos elementos lineares”.

- A NBR 6118:2014 permite reduzir a armadura negativa de borda a $0,67\rho_{\min}$.

Segundo a NBR 6118 (2014), item 19.3.3.2, para o dimensionamento e verificação de lajes “nos apoios de lajes que não apresentem continuidade com planos de lajes adjacentes e

que tenham ligação com os elementos de apoio, deve-se dispor de armadura negativa de borda”. “Essa armadura deve se estender até pelo menos 0,15 do vão menor da laje a partir da face do apoio.”

A obrigatoriedade de se dispor de armadura negativa de borda em lajes que não apresentem continuidade com planos de lajes adjacentes e que tenham ligação com elementos de apoio tem por objetivo evitar o aparecimento de fissuras ao longo de bordas das lajes. Esta patologia decorre do fato que os apoios das lajes, constituídos pelas vigas, oferecerem uma resistência ao movimento de rotação das lajes, em função de sua inércia a torção. A figura 04 ilustra o movimento de rotação das lajes e colocação da armadura negativa de borda.



Fonte: O autor

4.4.4 Detalhamento das Armaduras

Para o detalhamento das armaduras nas lajes, devem ser observadas as seguintes prescrições, de acordo com o item 20.1 da NBR 6118:2014:

4.4.4.1 Diâmetro Máximo

Qualquer barra da armadura de flexão deve ter diâmetro no máximo igual a $h/8$.

4.4.4.2 Espaçamento Máximo e Mínimo

As barras da armadura principal de flexão devem apresentar espaçamento no máximo igual a 2 vezes a espessura da laje ou 20 cm, prevalecendo o menor desses dois valores na região dos maiores momentos fletores.

Obs.: “As armaduras devem ser dispostas de forma que se possa garantir o seu posicionamento durante a concretagem.”

Nas lajes armadas em uma direção, o espaçamento entre as barras da armadura secundária de flexão deve ser de no máximo 33 cm (três barras por metro). A emenda dessas barras deve respeitar os mesmos critérios de emenda das barras da armadura principal.

A norma não especifica valores para o espaçamento mínimo. Deve-se considerar também que o espaçamento mínimo deve ser aquele que não dificulte a disposição e amarração das barras da armadura e o correto preenchimento do concreto na peça. De modo geral, para efeitos deste trabalho, serão adotados espaçamentos superiores a 9 cm.

4.4.4.3 Armadura de distribuição e secundária de flexão

De acordo com a tabela 08 deste trabalho a quantidade de armadura positiva de distribuição (secundária) de lajes armadas em uma direção, tendo o ρ_s o mesmo significado anterior, deve atender a:

$$A_s \geq 20\% \text{ da armadura principal e } 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}.$$

$$\rho_s \geq 0.5 \rho_{\text{mín}}.$$

Em lajes armadas em duas direções, a armadura de distribuição deve ser superior a 20% da armadura principal.

4.4.4.4 Comprimento da armadura positiva

“Nas lajes maciças, toda a armadura positiva deve ser levada até os apoios, não se permitindo escalonamento dessa armadura, salvo os casos em que houver avaliação explícita dos acréscimos das armaduras decorrentes da presença dos momentos volventes ou aqueles em que as lajes não foram dispensadas de armadura transversal.

“A armadura deve ser prolongada ainda no mínimo 4 cm além do eixo teórico do apoio.”

4.4.4.5 Comprimento da armadura negativa nos apoios com continuidade de lajes

A NBR 6118: 2014 não especifica o comprimento das barras da armadura negativa. Para efeitos deste trabalho, a armadura negativa, para todas as situações de vinculação será

estendida no interior da laje a uma distância de $0,25 l_x$, sendo l_x o menor vão da laje. (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2003, p.332)

Ao comprimento anterior deverá ser acrescentado o comprimento de ancoragem reto definido no item 9.4.2.4 da NBR 6118:2014:

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \geq 25\phi \text{ (Eq. 2.2)}$$

Em que:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \text{ (Eq. 2.3)}$$

Sendo:

$\eta_1 = 2,25$ para barras de alta aderência (CA-50)

$\eta_2 = 1,00$ para situações de boa aderência, que é o caso de lajes.

$\eta_3 = 1,00$ para $\phi \leq 32$ mm

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk inf}}{\gamma_c} \text{ (Eq. 2.4)}$$

Em que:

$$f_{ctk inf} = 0,7 \cdot f_{ctm} \text{ (Eq. 2.5)}$$

Para efeitos deste trabalho serão adotados ainda, em todas as extremidades da armadura negativa, ganchos retos calculados de forma simplificada, descontando da espessura da laje o cobrimento nominal.

4.4.4.6 Comprimento da armadura de distribuição e secundária de flexão

As armaduras se estendem face a face de laje na direção considerada.

4.4.4.7 Comprimento da armadura negativa de borda

A armadura negativa de borda será estendida no interior da laje a uma distância de $0,25 \cdot L$ (em que L é o vão paralelo à direção da armadura de borda).

Ao comprimento anterior deverá ser acrescentado o comprimento $d-d'$. Para efeitos deste trabalho, todas as vigas têm altura de 40 cm e $d'=4$ cm, de modo que $d-d'$ seja igual a 32 cm para todos os casos.

Devem ser adotados ainda, na extremidade da armadura negativa de borda, um gancho reto de 8ϕ (diâmetro da barra).

4.5 Verificação das flechas

Na verificação da flecha de uma laje, considera-se: a existência de fissuras; o momento de inércia; as flechas imediata, diferida e total; e os valores limites.

4.5.1 Existência de fissuras

Para verificação da existência de fissuras em lajes é necessário à verificação dos estádios de deformação.

4.5.1.1 Verificação dos estádios

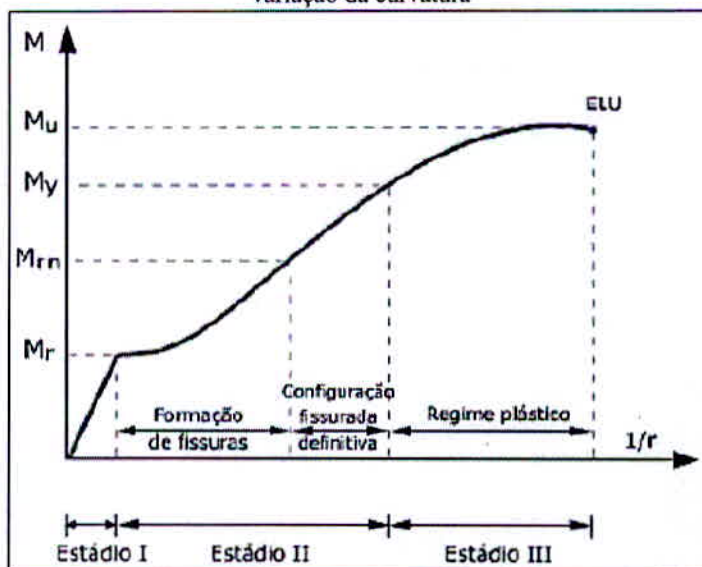
As diversas fases pelas quais passa a seção de concreto, ao longo das fases de aplicação do carregamento, dá-se o nome de estádios. Distinguem-se basicamente três fases distintas: estágio I, estágio II e estágio III.

Estádio I (estádio elástico) representa aquele estágio que está submetido a um momento fletor de pequena intensidade e a resistência à tração característica no concreto não é superada. O estágio II (estádio de fissuração) é aquele em que aumentando o valor do momento fletor, as tensões de tração superam a de resistência característica do concreto à tração, neste caso as fissuras de tração no concreto estão visíveis. Já o estágio III é aquele em que se aumenta o momento fletor até um valor próximo ao de ruína, nesta situação a laje se encontra bastante fissurada, com fissuras se aproximando da linha neutra, fazendo com que sua profundidade diminua e, conseqüentemente a região comprimida de concreto também. Logo, pode-se dizer simplificadamente, que os estádios I e II correspondem às situações de serviço e o estágio III corresponde ao estado limite último (ações majoradas; resistências minoradas), que só ocorre em situações extremas (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2013, p.106).

Quanto ao dimensionamento, normalmente, para cargas de serviço, o nível das tensões de compressão representa apenas uma parcela da resistência do concreto à compressão. Nestas condições, a seção encontra-se, seguramente, no Estádio II de solicitação. Assim, os cálculos que envolvem a verificação dos Estados Limites de Serviço, geralmente, são efetuados nos Estádio II.

A figura a seguir refere-se à influência dos estádios na formação de fissuras nas estruturas de concreto armado, entre elas as lajes.

Figura 05: Influência dos estádios no comportamento à flexão e na variação da curvatura



Fonte: Notas de aula de Estruturas de Concreto Armado I – Prof. Me. Antônio de Faria

4.5.2. Momento de fissuração

“Nos estados limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre esses dois comportamentos é definida pelo **momento de fissuração**”. (NBR 6118:2014, item 17.3.1, grifo nosso). E esse momento pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Sendo $\alpha = 1,5$ para seções retangulares;

Onde α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta; y_t é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada; I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto e f_{ct} é a resistência à tração direta do concreto, com o quantil apropriado a cada verificação particular. Para determinação do momento de fissuração, deve ser usado o $f_{ct,inf}$ no estado limite de formação de fissuras e o $f_{ct,m}$ no estado limite de deformação excessiva.

De acordo com a NBR 6118:2014, item 8.2.5, a resistência à tração direta f_{ct} pode ser avaliada pelo seu valor médio ou característico por meio da equação:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \text{ (Eq. 2.7)}$$

Onde para concretos de classes até C50 temos:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \text{ (Eq. 2.8)}$$

Para concreto de classes de C50 até C90 temos:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11 f_{ck}) \text{ (Eq. 2.9)}$$

Observação: as unidades de medida de $f_{ct,m}$ e f_{ck} são expressas em MPa.

4.5.3. Momento de Inércia

Com os valores obtidos de momento atuante e momento de fissuração, obtidos conforme o item anterior deste trabalho, duas situações pode ocorrer:

$$a) M_{at} \leq M_r$$

A seção estará no estágio I, ou seja, não está fissurada. Assim, as deformações podem ser determinadas no estágio I, com o momento de inércia da seção bruta de concreto I_c (momento de inércia no estágio I).

Para o caso de lajes retangulares o momento de inércia da seção bruta pode ser determinado de acordo com a seguinte equação:

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} \text{ (Eq. 3.0)}$$

$$b) M_{at} > M_r$$

Uma parcela da seção estará no estágio II, ou seja, fissurada, enquanto que outra parcela estará no estágio I, ou seja, não fissurada.

Como as lajes de concreto armado tem seções trabalhando nos limites dos estádios I e II, para calcular a flecha contemplando esta situação é necessário utilizar uma inércia média (modelo de Branson) (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2013, p.179).

“O modelo proposto por Branson (1968) admite uma única inércia para todo elemento de concreto, representando os trechos fissurados e não fissurados. Baseia-se em um método semiprobabilístico [...] utilizando expressões empíricas que fornecem valores médios de inércia. Dessa forma, Branson procura traduzir o efeito da fissuração do concreto, quando submetido às deformações no cálculo das deformações imediatas”. (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2013, p.179)

Esse modelo pode ser utilizado na obtenção do valor de inércia média, que é o valor intermediário ao valor obtido no estágio I e no final do estágio II (estádio II puro).

A equação obtida por Branson é expressa por:

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n\right] \cdot I_{II} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde, I_m é o momento de inércia efetivo para uma seção da laje ou para toda a laje; I_I é o momento de inércia da laje no estágio I; I_{II} é o momento de inércia da laje no estágio II puro; M_r é o momento de fissuração do concreto; M_{at} é o momento atuante e n é o índice de valor igual a 3, quando se faz a análise da peça ao longo de todo seu comprimento, que é a situação em questão (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2013, p.179).

Para elementos mais complexos, como no caso das lajes, bons resultados são obtidos pelo modelo de Branson (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2013, p.181).

“A expressão pode ser usada como técnica de dividir o elemento em trechos, e fazer o carregamento por etapas, avaliando em cada etapa qual o nível de fissuração de cada trecho”. (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2013, p.181).

Para se determinar I_{II} , é necessário conhecer a posição da linha neutra, no estágio II, para a seção retangular com largura $b=100$ cm, altura total h , altura útil d e armadura a_s (em cm^2/m).

Considerando que a linha neutra passa pelo centro de gravidade da seção homogeneizada da laje, X_{II} é obtido por meio da equação:

$$X_{II} = -a_2 \pm \frac{\sqrt{a_2^2 - 4a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

$$a_1 = b_w \text{ (Eq. 3.2)}$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s \text{ (Eq. 3.3)}$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s \text{ (Eq. 3.4)}$$

Sendo:

$$\alpha_e = \frac{E_{cs}}{E_s} \text{ (Eq. 3.5)}$$

E_s é o módulo de elasticidade do aço.

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto obtido de acordo com o item 8.2.8 da NBR 6118:2104 pela seguinte expressão:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \text{ (Eq. 3.6)}$$

Onde:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \text{ (Eq. 3.7)}$$

Para f_{ck} de 20 a 50 MPa:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \text{ (Eq. 3.8)}$$

Para f_{ck} de 50 a 90 MPa:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \text{ (Eq. 3.9)}$$

Sendo α_E igual a 1,2 para basalto e diabásio; α_E igual a 1,0 para granito e gnaisse; α_E igual 0,9 para calcário.

Calculada a posição da linha neutra no estágio II é possível determinar o momento de inércia da seção da laje no estágio II puro, pela seguinte expressão:

$$I_{x,II,0} = \frac{b_w \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (X_{II} - d)^2 \quad (\text{Eq. 4.0})$$

As equações apresentadas para o cálculo da posição da linha neutra X_{II} e momento de inércia no estádio II puro $I_{x,II,0}$ foram obtidas através das equações 4.17; 4.18; 4.19; 4.20; 4.22 de CARVALHO & FIGUEIREDO, 2003,p.178.

Vale lembrar que as equações obtidas para X_{II} e $I_{x,II,0}$ em CARVALHO & FIGUEIREDO, 2003,p.178 são válidas somente para seção T. Como neste trabalho estamos tratando de lajes maciças, e portanto de seções retangulares, as equações 3.1; 3.2; 3.3; 3.4; 4.0 acima estão adaptadas para seções retangulares.

4.5.4. Flecha

4.5.4.1 Flecha elástica

Segundo CARVALHO & FIGUEIREDO (2003, p.302) na determinação da flecha elástica não são considerados os efeitos de fissuração e fluência e a mesma pode ser obtida pela seguinte expressão adaptada:

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

p é o carregamento uniformemente distribuído sobre a laje

α é o coeficiente encontrado na tabela 03. disponibilizada anexo B

l_x é o menor vão da laje

E_{cs} é o modulo de elasticidade secante do concreto

h é a espessura da laje.

Em se tratando das lajes sobre 3 apoios, a determinação da flecha elástica será realizada com o auxílio dos coeficientes α_a e α_b (encontrados na tabela 04 no anexo B) para flechas no centro e na extremidade da laje respectivamente.

Para CARVALHO & FIGUEIREDO (2003, P.303) uma forma simplificada de considerar a fissuração é corrigir a flecha obtida pela equação 4.1, multiplicando-a pela relação entre a inércia bruta I_c e a inércia média de Branson I_m .

O momento atuante (a ser comparado com o momento de fissuração para verificar estágio em que a seção se encontra, e para ser utilizado no cálculo da inércia média) conforme recomendações de Branson (1968) e resultados obtidos por Carvalho (2004) é o máximo momento negativo, caso exista. (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2003, p.304)

4.5.4.2 Flecha Imediata

A flecha imediata é aquela que ocorre quando é aplicado o primeiro carregamento na peça, que não leva em conta os efeitos da fluência. Para determinação da flecha imediata é necessário a verificação do estágio de deformação.

Para estágio I: a laje não está fissurada e a flecha imediata a_i a ser considerada é a flecha elástica.

Para estágio II: a laje se encontra fissurada e a flecha imediata a_i a ser considerada é igual à flecha elástica $a_{elástica}$ multiplicada pela relação I_c/I_m .

4.5.4.3 Flecha Diferida

Flecha diferida no tempo é aquela que leva em conta o fato do carregamento atuar na estrutura ao longo do tempo, causando a sua deformação lenta ou fluência. Para CARVALHO & FIGUEIREDO (2013, p.181) “fluência é o fenômeno em que surgem deformações ao longo do tempo em um corpo solicitado por tensão constante”.

Considera-se que as deformações de fluência sejam oriundas das ações permanentes. Porém, para calculá-las é utilizada a combinação quase permanente, pois parte da carga acidental atua em um longo período de sua vida útil. (CARVALHO & FIGUEIREDO 2013, p.181).

Segundo a NBR 6118:2014, item 17.3.2.1.2, a flecha diferida no tempo, ocasionada pelas cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada através do produto da flecha imediata a_i pelo fator α_f , que é dado pela seguinte expressão”:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50p'} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Sendo:

$$\rho' = \frac{As'}{b \cdot d} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde ξ é o coeficiente função do tempo; ρ' é a taxa geométrica de armadura de compressão; As' é a área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão; b é largura da seção; d é altura útil.

Observações: Se As' for por metro de laje, b é igual a 1m. E ξ pode ser obtido diretamente na Tabela 09 ou ser calculado pela NBR 6118:2014, item 17.3.2.1.2 através das seguintes expressões:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Onde $\xi(t) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32}$ para $t \leq 70$ meses e $\xi(t) = 2$ para $t > 70$ meses.

Sendo t o tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida; t_0 a idade, em meses, relativa à data de aplicação da carga de longa duração. No caso de parcelas da carga de longa duração ser aplicadas em idades diferentes, pode-se tomar para t_0 o valor ponderado a seguir:

$$t_0 = \frac{\sum P_i \cdot t_{0i}}{\sum P_i} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Onde P_i representa as parcelas de carga; t_{0i} é a idade em que se aplicou cada parcela P_i , em meses.

Tabela 09: Coeficiente ξ em função do tempo

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

Fonte: O autor (adaptado da NBR 6118:2014, item 17.3.2.1.2, tabela 17.1).

4.5.4.4 Flecha Total no tempo infinito

A flecha total na laje é dada pela flecha inicial mais a flecha diferida. “O valor da flecha total deve ser obtido multiplicando a flecha imediata a_i por $(1 + \alpha_f)$ ”. (NBR 6118:2014, item 17.3.2.1.2)

4.5.4.5 Flecha Limite

Para a verificação do ELS o valor encontrado para a flecha total não poderá ultrapassar os valores estabelecidos para os limites de deslocamentos, que visam proporcionar um adequado comportamento da laje em serviço.

As flechas máximas ou deslocamentos limites segundo a NBR 6118:2014, item 13.3 “são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado limite de deformações excessivas” da laje.

Para a aceitabilidade sensorial “o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável”. (NBR 6118:2014, item 13.3).

Tabela10: Deslocamentos Limites (aceitabilidade sensorial)

Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell/250$
Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$\ell/350$

Observações: * Todos os valores limites de deslocamentos supõem elementos de vão ℓ suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.

* Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contra-flechas.

Fonte: O autor (adaptado da NBR 6118:2014, item 13.3, tabela 13.3).

No caso de deslocamentos excessivos, que ultrapassem os limites estabelecidos na tabela acima, a NBR 6118:2014 permite que estes deslocamentos sejam parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Nesse caso, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $l_x/350$

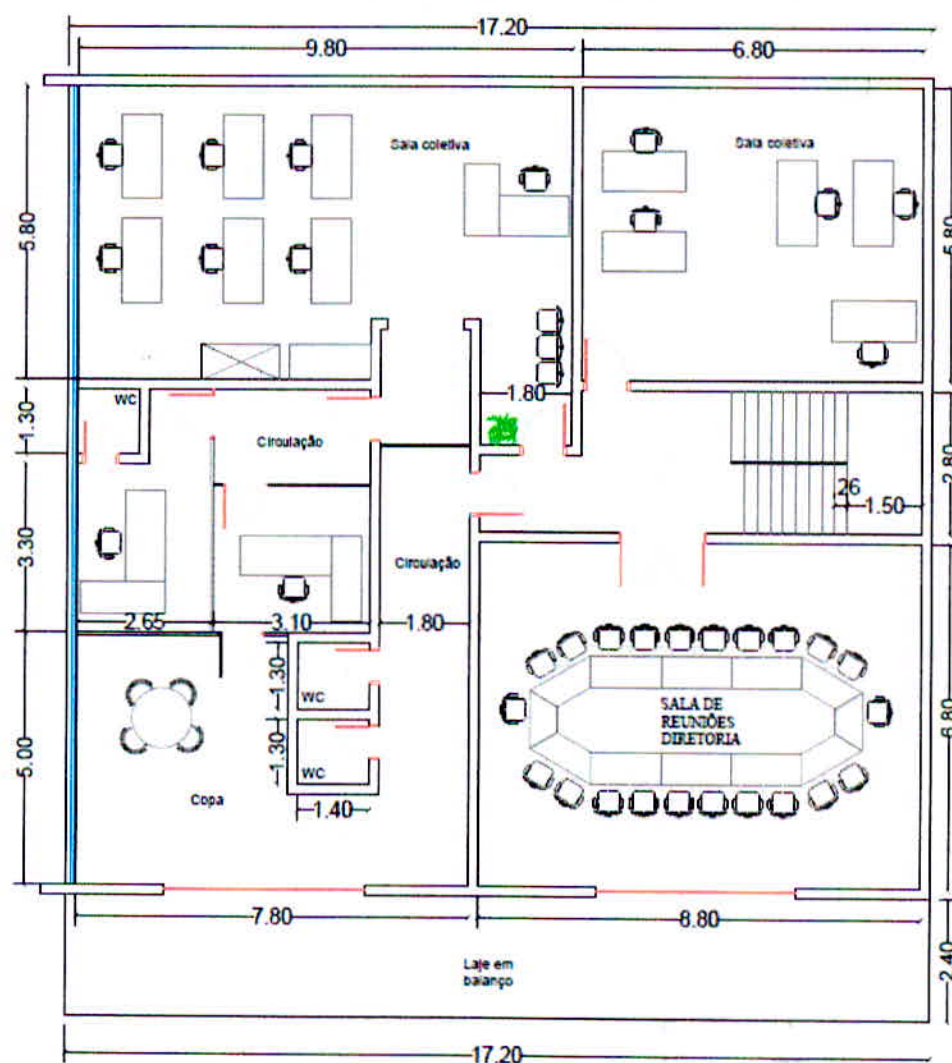
5 DIMENSIONAMENTO

5.1. Considerações preliminares

Com base nas disposições da NBR 6118:2014 apresentadas nos itens anteriores deste trabalho, serão dimensionadas as lajes maciças de um pavimento de um escritório comercial de 279 m².

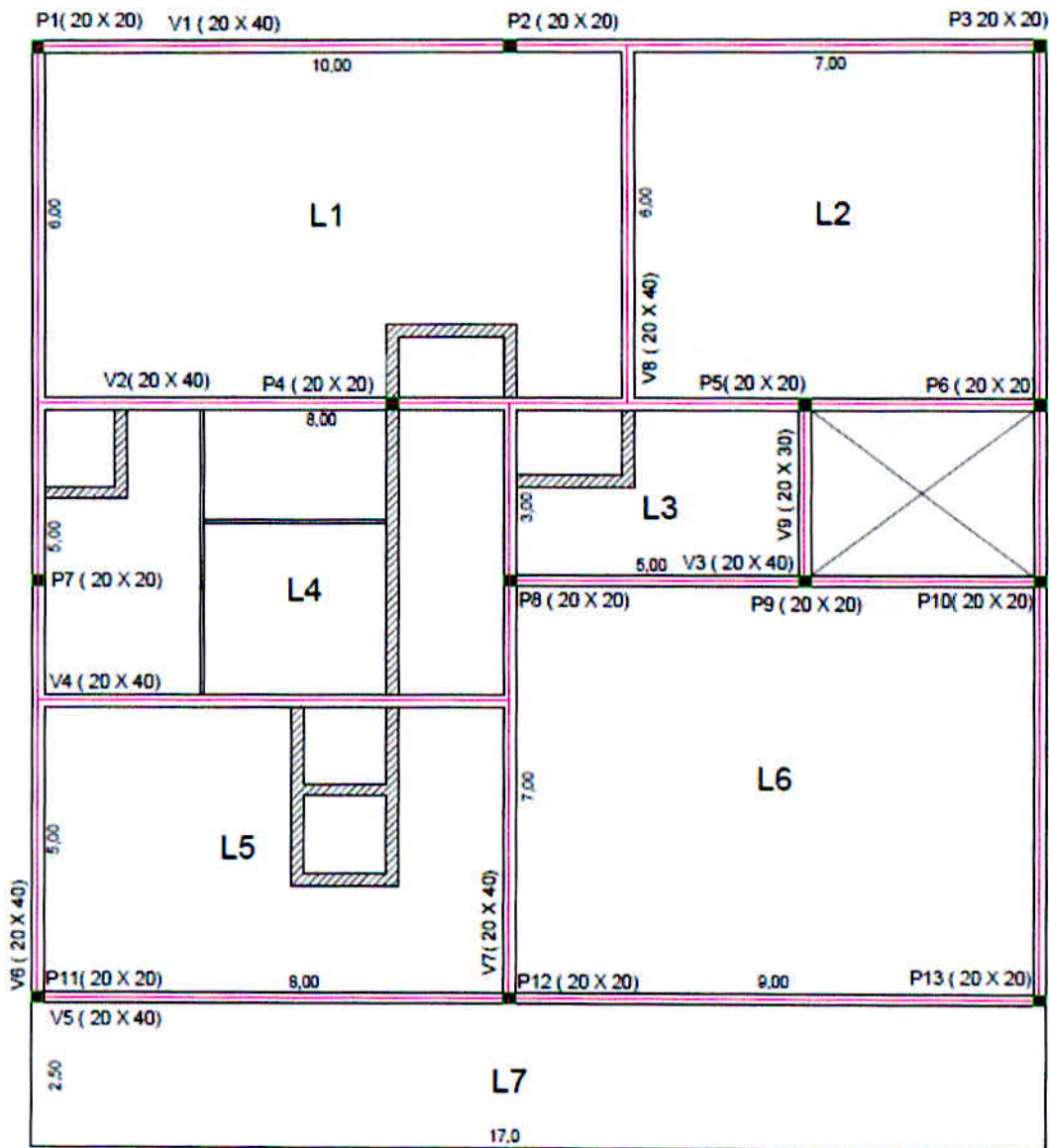
Na figura 06 é mostrada a planta humanizada do pavimento, com a disposição das paredes de alvenaria e divisórias. Na Figura 07 e 08 são mostradas as plantas de fôrma da estrutura do mesmo pavimento. É importante observar que as plantas de fôrmas diferem apenas quanto à concepção estrutural da laje em balanço e serão calculadas considerando ambas as situações.

Figura 06: Planta de arquitetura de um escritório comercial



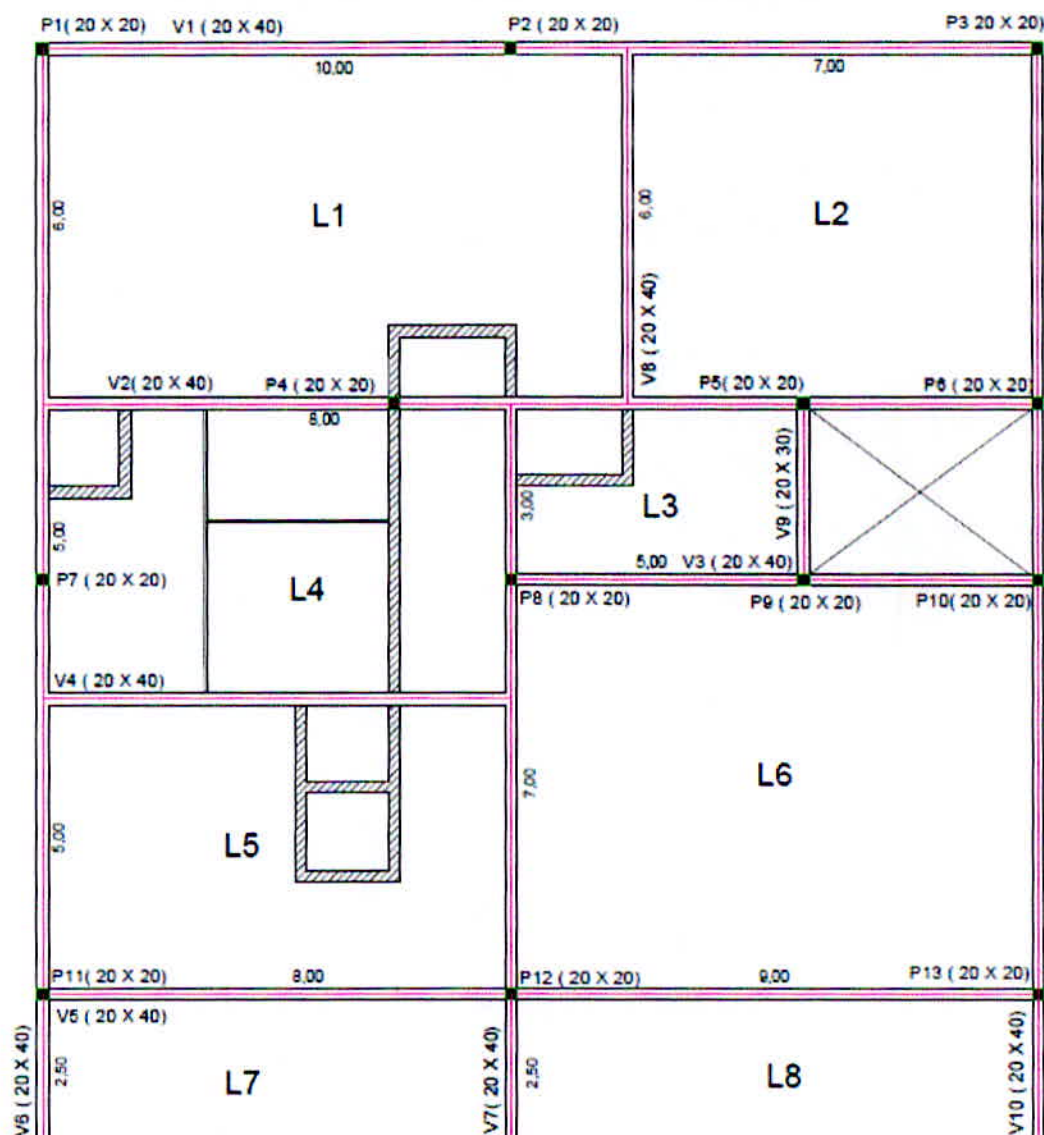
Fonte: O autor

Figura 07: Planta de fôrma simplificada do pavimento – Concepção estrutural I



Fonte: O autor

Figura 08: Planta de fôrma simplificada do pavimento – Concepção estrutural II



Fonte: O autor

5.2 Esquema estático das lajes do pavimento

Este tópico do trabalho consiste em identificar os tipos de vínculos existentes nas bordas das lajes do pavimento. Existem, basicamente, três tipos: borda livre; borda simplesmente apoiada e borda engastada, conforme mostrado na figura a seguir:

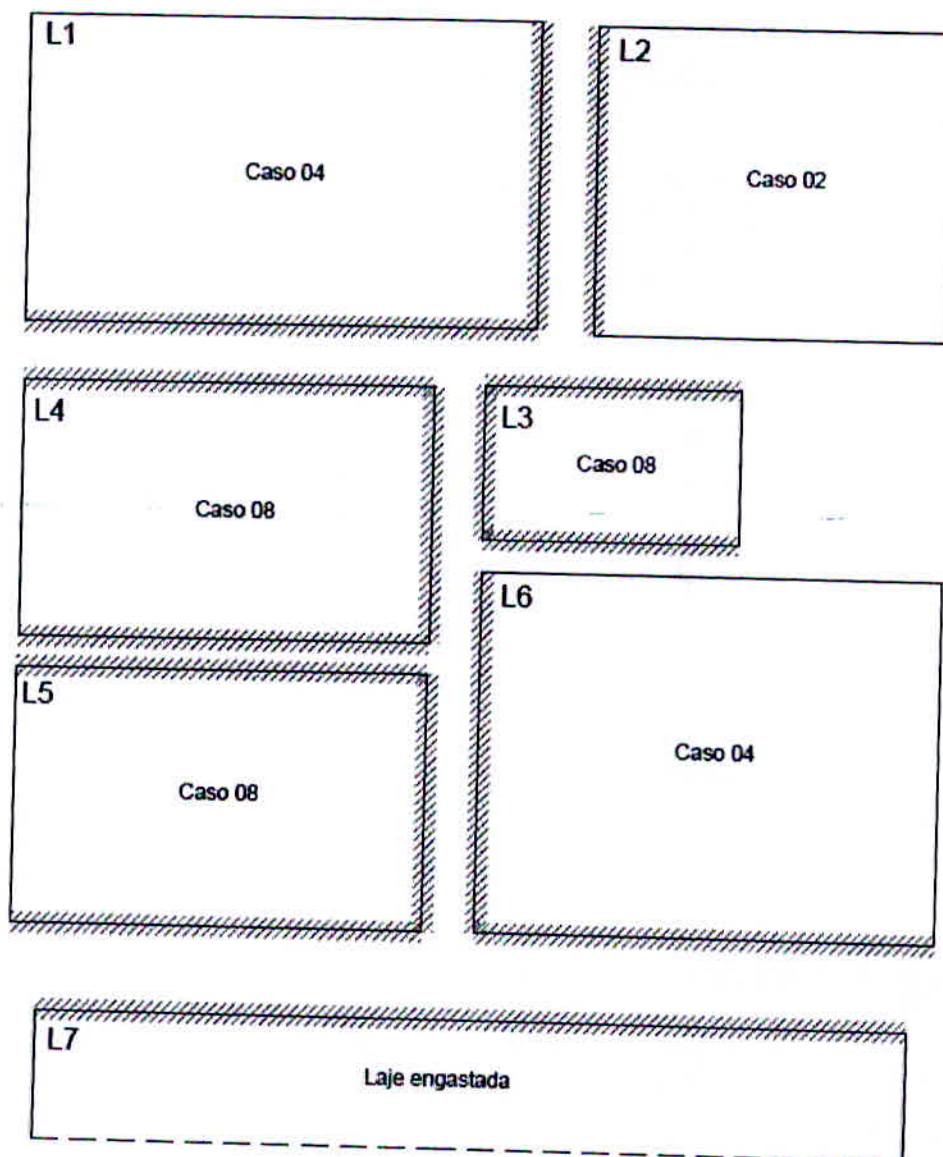
Figura 09: Representação dos tipos de apoio

Borda livre	Borda simplesmente apoiada	Borda engastada
-----	—————	///////

Fonte: O autor

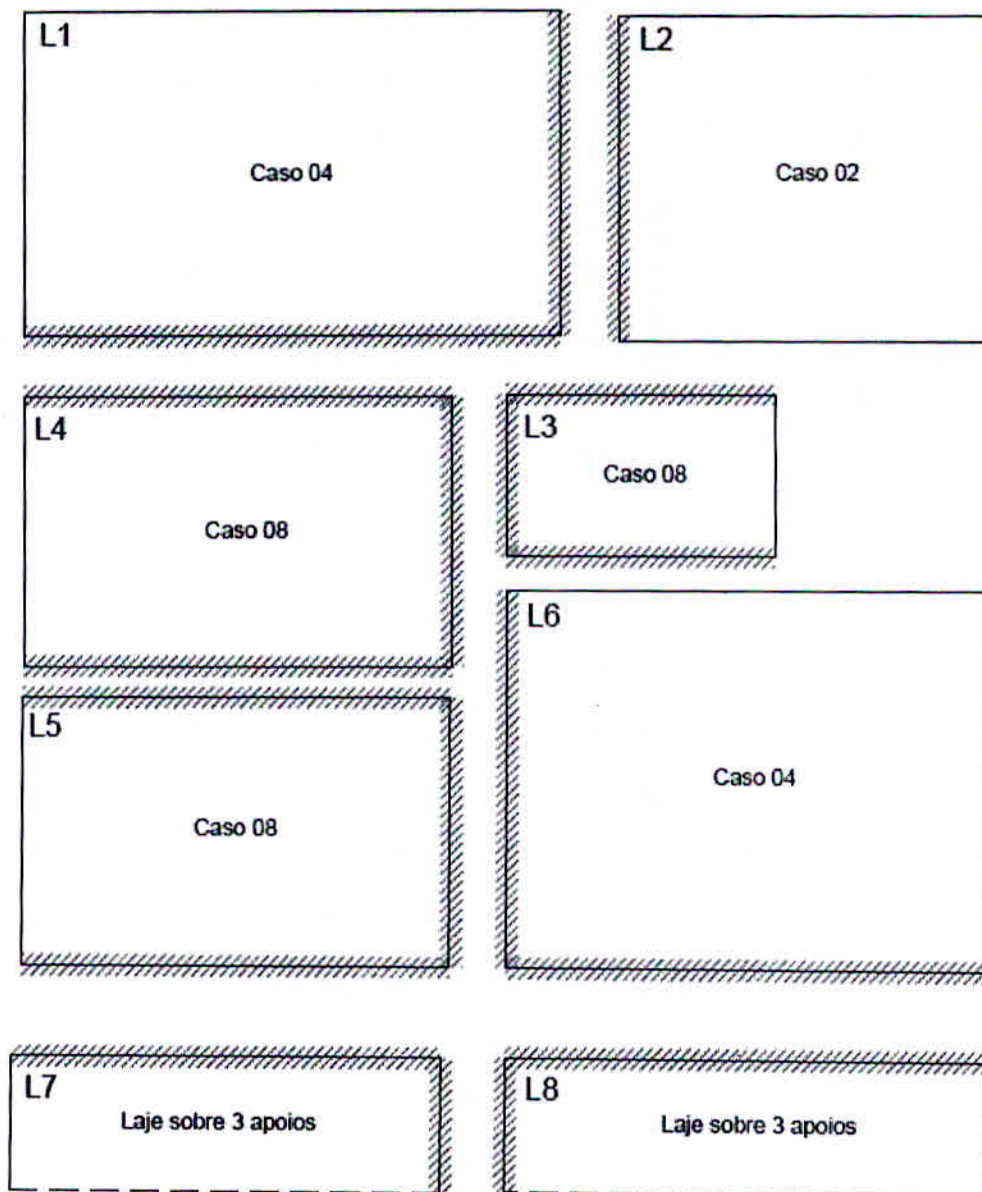
Para ambas as concepções estruturais, os vínculos nas bordas e o tipo de laje do pavimento estão indicados nas figuras 10 e 11 a seguir:

Figura 10: Esquema estático – concepção estrutural 1



Fonte: O autor

Figura 11: Esquema estático – concepção estrutural II



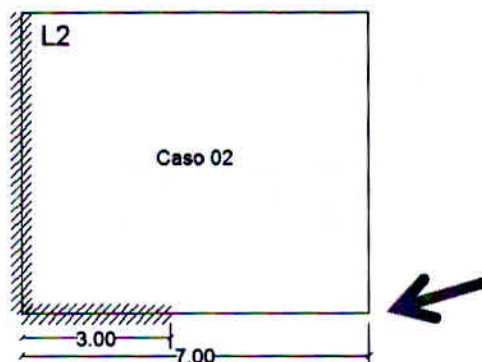
Fonte: O autor

No caso do pavimento deste exemplo, para ambas as concepções estruturais, todas as lajes encontram-se ligadas ou apoiadas nas bordas superiores das vigas, ou seja, nenhuma das lajes está rebaixada, de modo que as lajes podem ser consideradas contínuas umas com as outras.

As tabelas para dimensionamento das lajes, em geral, consideram as bordas livres, apoiadas ou engastadas, com o mesmo tipo de vínculo ao longo de toda a extensão dessas bordas. Entretanto, na prática, pode ocorrer de uma borda ser parcialmente apoiada e

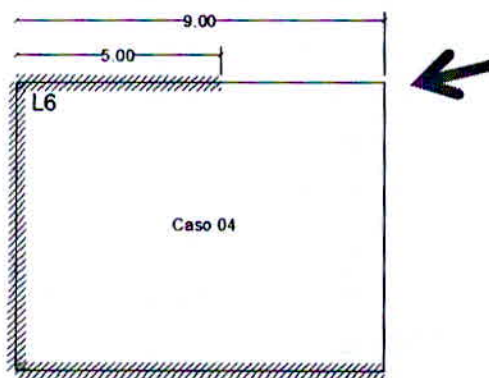
parcialmente engastada. Este caso pode ser visualizado nas lajes L2 e L6 do pavimento em estudo, mostrados nas figuras 12 e 13 a seguir.

Figura 12: Esquema estático da Laje L2



Fonte: O autor

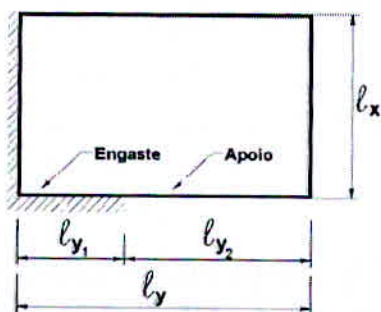
Figura 13: Esquema estático da laje L6



Fonte: O autor

Um critério aproximado utilizado para determinação do tipo de apoio para estes casos está descrito na tabela 11.

Figura 14: Caso específico de Vinculação



Fonte: O autor

Tabela 11: Critério para bordas com uma parte engastada e outra parte apoiada

$l_{y1} < 2/3 l_y$	Considera-se borda totalmente apoiada
$l_{y1} \geq 2/3 l_y$	Considera-se borda totalmente Engastada

Fonte: O autor

Como as lajes L2 e L6 tiveram o comprimento de engaste inferior a 2/3 do comprimento na direção considerada, a borda foi considerada totalmente apoiada em ambos os casos.

5.3 Exemplo prático de dimensionamento (Laje L1)

A seguir, será realizado o dimensionamento da laje L1 para todas as CAA, onde serão apresentados detalhadamente os cálculos efetuados. Este dimensionamento tem por objetivo exemplificar a metodologia de cálculo empregada para obtenção dos esforços, armaduras e verificações no ELU e ELS nas lajes do pavimento.

Em relação à obtenção dos esforços, mais especificamente dos momentos fletores, o exemplo a seguir é válido para lajes maciças armadas em duas direções. Para o pavimento em estudo, este cálculo se aplica a todas as lajes, com exceção da laje L7 (engastada), armada em apenas uma direção.

5.3.1 Dimensionamento da laje L1 para classe de agressividade ambiental I

5.3.1.1 Esforços

5.3.1.1.1 Ações

- Peso próprio

Peso específico do concreto armado: $\gamma = 25 \text{ KN/m}^3$ (tabela 1 da NBR 6120:1980).

Espessura da laje L1: $h = 16 \text{ cm}$.

$$g_1 = \gamma_{\text{concreto arm.}} \cdot h$$

$$g_1 = 25 \cdot 0,16$$

$$g_1 = 4,0 \text{ kN/m}^2$$

- Revestimento

Espessura revestimento = 2 cm

Material utilizado: Granito; $\gamma = 28 \text{ KN/m}^3$ (tabela 1 da NBR 6120:1980).

Espessura da argamassa = 2,5 cm

Peso específico da argamassa de assentamento: $\gamma = 21 \text{ KN/m}^3$ (tabela 1 da NBR 6120:1980).

$$g_2 = (\gamma_{\text{revestimento}} \cdot e_{\text{revestimento}} + \gamma_{\text{argamassa}} \cdot e_{\text{argamassa}})$$

$$g_2 = (0,025 \cdot 21 + 0,02 \cdot 28)$$

$$g_2 = 1,09 \text{ kN/m}^2$$

- Parede

Altura adotada para as paredes: 3,4 m

Largura das paredes (acabada): 20 cm

Espessura tijolo = 15 cm

Peso específico do tijolo: $\gamma = 13 \text{ kN/m}^3$

Espessura argamassa revestimento = 2,5 cm de cada lado

Peso específico da argamassa = $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$

$$g_3 = \frac{(\gamma_{\text{tijolo}} \cdot e_{\text{tijolo}} + \gamma_{\text{argamassa}} \cdot e_{\text{argamassa}}) \cdot h_{\text{parede}} \cdot L_{\text{parede}}}{A_{\text{laje}}}$$

$$g_3 = \frac{(13 \cdot 0,15 + 21 \cdot 0,05) \cdot 3,4 \cdot 2}{60}$$

$$g_3 = 0,69 \text{ KN/m}^2$$

- Varável

$$q = 2,00 \text{ KN/m}^2$$

- Total

$$P = g_1 + g_2 + g_3 + q$$

$$P = 4,0 + 1,09 + 0,69 + 2$$

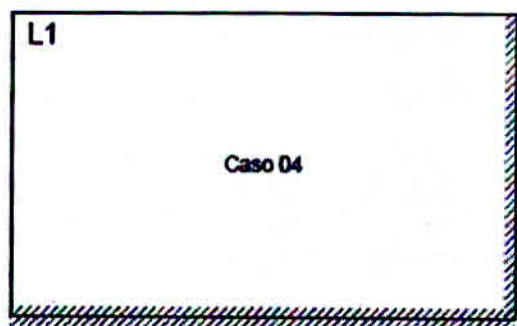
$$P = 7,78 \text{ kN/m}^2$$

5.3.1.1.2 Momentos fletores

Laje armada em duas direções:

- Vinculação e relação λ

Figura 15: Esquema estático Laje L1



Fonte: O autor

$$\lambda = \frac{L_y}{L_x}$$

Sendo L_y igual a 10 m e L_x igual 6m :

$$\lambda = \frac{10}{6} = 1,67$$

- Coeficientes μ

Para $\lambda = 1,67$ e caso 04, a tabela 01 disponibilizada no anexo A, fornece os seguintes valores de μ :

$$\mu_x = 5,27; \mu_x' = 11,30; \mu_y = 2,16; \mu_y' = 8,15$$

- Momentos fletores solicitantes e de cálculo

Momentos fletores positivos na direção X:

$$M_a = \mu_x \cdot p \cdot l_x^2 = 5,27 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 1475,11 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 1475,11 \cdot 1,4 = 2065,16 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores negativos na borda perpendicular a direção X:

$$M_a = \mu_x' \cdot p \cdot l_x^2 = 11,30 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 3162,95 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 3162,95 \cdot 1,4 = 4428,13 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores positivos na direção Y:

$$M_a = \mu_y \cdot p \cdot l_x^2 = 2,16 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 604,60 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 604,60 \cdot 1,4 = 846,44 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores negativos na borda perpendicular a direção Y:

$$M_a = \mu_y' \cdot p \cdot l_x^2 = 8,15 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 2281,24 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 2281,24 \cdot 1,4 = 3193,74 \text{ kN.cm/m}$$

5.3.1.2 Armaduras longitudinais de flexão

5.3.1.2.1 Armadura calculada

Armadura positiva na direção X:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{2065,16}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,0740$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0740))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,1140 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,1140 = 0,9544$$

Determinação da altura útil d :

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 2,0 + 1,5 \cdot 1 = 3,5 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d'$$

$$d = 16 - 3,5 = 12,5 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{2065,16}{0,9544 \cdot 12,5 \cdot 43,48} = 3,98 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura negativa na borda perpendicular a direção X:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{4428,13}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,1587$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,1587))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,2605 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,2605 = 0,8958$$

Determinação da altura útil d:

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 2,0 + 1,5 \cdot 1 = 3,5 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 3,5 = 12,5 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{4428,13}{0,8958 \cdot 12,5 \cdot 43,48} = 9,10 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura positiva na direção Y:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{846,44}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,0303$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0303)}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,0450 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,0450 = 0,9818$$

Determinação da altura útil d :

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 2,0 + 1,5 \cdot 1 = 3,5 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 3,5 = 12,5 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{846,44}{0,9818 \cdot 12,5 \cdot 43,48} = 1,59 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura negativa na borda perpendicular a direção Y:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{3193,74}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,1145$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,1145))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,1815 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,1815 = 0,9274$$

Determinação da altura útil d:

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 2,0 + 1,5 \cdot 1 = 3,5 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 3,5 = 12,5 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{3193,74}{0,9274 \cdot 12,5 \cdot 43,48} = 6,34 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.1.2.2 Armadura mínima

$$\rho_{\text{mín.}} = 0,15\%$$

$$A_c \text{ (área de concreto)} = b_w \cdot h$$

$$A_{s \text{ mín}} = \rho_{\text{mín.}} \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.1.2.3 Armadura passiva aderente

Armadura passiva aderente (armadura positiva na direção X):

$$\rho_s = \rho_{\text{mín}}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura negativa na borda perpendicular a direção X):

$$\rho_s = \rho_{\text{mín}}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura positiva na direção Y):

$$\rho_s = \rho_{\text{mín}}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura negativa na borda perpendicular a direção Y):

$$\rho_s = \rho_{min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.1.3 Momento de fissuração

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t}$$

$$\alpha = 1,5 \text{ (seção retangular)}$$

$$f_{ct} = f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 25^{2/3} = 2,56 \text{ Mpa} = 0,256 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{100 \cdot 16^3}{12} = 34133,333 \text{ cm}^4$$

$$y_t = h - y_{cg} = h - \frac{h}{2} = 16 - 8 = 8 \text{ cm}$$

$$M_r = \frac{1,5 \cdot 0,256 \cdot 34133,333}{8} = 1641,58 \text{ kN.cm/m}$$

5.3.1.4 Momento de Inércia de Branson

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \right] \cdot I_{II}$$

I_I = inércia homogenizada (com presença de armadura)

I_{II} = inércia no estado II puro

M_{at} = maior momento atuante na laje (combinação quase permanente)

$n = 3$ (para o caso de lajes)

Determinação do momento atuante (M_{at}):

$$M_{at} = \mu'_x \cdot p_{quase\ perm.} \cdot l_x^2 = \frac{11,30 \cdot 6,58 \cdot 6^2}{100} = 26,7479 \text{ kN.m/m} = 2674,79 \text{ kN.cm/m}$$

$$p_{quase\ perm.} = g_1 + g_2 + g_3 + \psi_2 \cdot q = 4 + 1,09 + 0,69 + 0,4 \cdot 2 = 6,58 \text{ kN/m}^2$$

Determinação do momento inércia da seção homogeneizada (I_h):

$$I_l = I_h = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (y_h - h/2)^2 + A_s (\alpha - 1) \cdot (y_h - d)^2$$

A_s = pertinte ao maior momento (armadura negativa na borda perpendicular a direção X)

$$A_s = 9,10 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{21000}{2415} = 8,70$$

$$A_h = b \cdot h + A_s (\alpha - 1) = 100 \cdot 16 + 9,10 \cdot (8,70 - 1) = 1670 \text{ cm}^2$$

$$y_h = \frac{b \cdot \frac{h^2}{2} + A_s (\alpha - 1) \cdot d}{A_h} = \frac{100 \cdot \frac{16^2}{2} + 9,10 (8,70 - 1) \cdot 12,5}{1670} = 8,19 \text{ cm}$$

$$I_l = I_h = \frac{100 \cdot 16^3}{12} + 100 \cdot 16 \cdot (8,19 - 16/2)^2 + 9,10 (8,70 - 1) \cdot (8,19 - 12,5)^2$$

$$I_h = 35491,37 \text{ cm}^4$$

Determinação do momento inércia no estágio II puro ($I_{xII,0}$):

$$I_{xII,0} = \frac{b \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (X_{II} - d)^2$$

$$X_{II} = -a_2 \pm \frac{\sqrt{a_2^2 - 4a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} = -79,09 \pm \frac{\sqrt{(-79,09)^2 - 4 \cdot 50 \cdot (-988,66)}}{2 \cdot 50} = 3,73 \text{ cm}$$

$$a_1 = b_w/2 = 100/2 = 50$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s = 8,70 \cdot 9,10 = 79,09$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s = -12,5 \cdot 8,70 \cdot 9,10 = -988,66$$

$$I_{xII,0} = \frac{100 \cdot 3,73^3}{3} + 8,70 \cdot 9,10 (3,73 - 12,5)^2 = 7813,09 \text{ cm}^4$$

Determinação do momento inércia de Branson (I_m):

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \right] \cdot I_{II}$$

$$I_m = \left(\frac{1641,58}{2674,79} \right)^3 \cdot 35491,37 + \left[1 - \left(\frac{1641,58}{2674,79} \right)^3 \right] \cdot 7813,09 = 14211,22 \text{ cm}^4$$

5.3.1.5 Flechas

5.3.1.5.1 Flechas Elásticas

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{CS} \cdot 100}$$

Determinação do E_{CS} :

$\alpha_e = 1$ (granito e gnaisse)

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{F_{ck}} = 1.5600 \cdot \sqrt{25} = 28000 \text{ Mpa} = 2800 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{CS} = \alpha_i \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{F_{ck}}{80} \right) \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{25}{80} \right) \cdot 2800 = 2415 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação da flecha elástica para cargas acidentais:

$p = 2,0 \text{ kN/m}^2$ (Variável)

$\alpha = 4,88$ para $\lambda = 1,67$ e caso 04 (tabela 03, disponibilizada anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p_{variável} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

$$a_{elástica} = \frac{4,88 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 600^4}{16^3 \cdot 2415 \cdot 100} = 0,13 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{350} = \frac{600}{350} = 1,71 \text{ cm}$$

Determinação da flecha elástica para cargas totais:

$p = 7,78 \text{ kN/m}^2$ (totalidade das cargas)

$\alpha = 4,88$ para $\lambda = 1,67$ e caso 04 (tabela 03, disponibilizada anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p_{total} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

$$a_{elástica} = \frac{4,88 \cdot 7,78 \cdot 10^{-4} \cdot 600^4}{16^3 \cdot 2415 \cdot 100} = 0,50 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

5.3.1.5.2 Flechas totais no tempo infinito

$$a_{t,\infty} = a_i (1 + \alpha_f)$$

Determinação da flecha imediata a_i

Como $M_{at} = 2674,79 \text{ kN.cm/m} > M_r = 1641,58 \text{ kN.cm/m}$ a seção encontra-se no estágio II. E para uma seção no estágio II, a flecha imediata a_i pode ser determinada multiplicando a flecha elástica $a_{elástica}$ pela relação I_c/I_m . Logo:

$$a_i = a_{elástica} \cdot \frac{I_c}{I_m} = \frac{\alpha \cdot p_{quase\ perm} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{CS} \cdot 100} = \frac{4,88 \cdot 6,58 \cdot 600^4}{16^3 \cdot 2415 \cdot 100} \cdot \frac{34133,333}{14211,22} = 1,01 \text{ cm}$$

Determinação do coeficiente α_f

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_0)}{1 + 50p'} = \frac{2 - 0,53}{1 + 50,0} = 1,47$$

$\xi(t_0) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32} = 0,68 \cdot (0,996^{14/30}) \cdot (14/30)^{0,32} = 0,53$ (retirada do escoramento com 14 dias, em que $t = 14/30$ meses).

$\xi(t) = 2$ para $t > 70$ meses.

Determinação da flecha no tempo infinito ($a_{t,\infty}$):

$$a_{t,\infty} = a_i (1 + \alpha_f) = 1,01 (1 + 1,47) = 2,49 \text{ cm} > a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

Logo é necessário uma contra flecha:

$$a_{cf} = -\frac{l_x}{350} = -\frac{600}{350} = -1,71 \text{ cm}$$

Assim, a flecha no tempo infinito passa a ser:

$$a_{t,\infty} = 2,49 - 1,71 = 0,78 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

5.3.2. Dimensionamento da laje L1 para classe de agressividade ambiental II

5.3.2.1 Esforços

5.3.2.1.1 Ações

- Peso próprio

$$g_1 = 4,0 \text{ kN/m}^2$$

- Revestimento

$$g_2 = 1,09 \text{ kN/m}^2$$

- Parede

$$g_3 = 0,69 \text{ KN/m}^2$$

- Varável

$$q = 2,00 \text{ KN/m}^2$$

- Total

$$P = 7,78 \text{ kN/m}^2$$

5.3.2.1.2 Momentos fletores

Laje armada em duas direções:

- Vinculação e relação λ

$$\lambda = 1,67$$

- Coeficientes μ

Para $\lambda = 1,67$ e caso 04, a tabela 01 disponibilizada no anexo A, fornece os seguintes valores de μ :

$$\mu_x = 5,27; \mu_x' = 11,30; \mu_y = 2,16; \mu_y' = 8,15$$

- Momentos fletores solicitantes e de cálculo

Momentos fletores positivos na direção X:

$$M_a = \mu_x \cdot p \cdot l_x^2 = 5,27 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 1475,11 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 1475,11 \cdot 1,4 = 2065,16 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores negativos na borda perpendicular a direção X:

$$M_a = \mu_x' \cdot p \cdot l_x^2 = 11,30 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 3162,95 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 3162,95 \cdot 1,4 = 4428,13 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores positivos na direção Y:

$$M_a = \mu_y \cdot p \cdot l_x^2 = 2,16 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 604,60 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 604,60 \cdot 1,4 = 846,44 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores negativos na borda perpendicular a direção Y:

$$M_a = \mu_y' \cdot p \cdot l_x^2 = 8,15 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 2281,24 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 2281,24 \cdot 1,4 = 3193,74 \text{ kN.cm/m}$$

5.3.2.2 Armaduras longitudinais de flexão

5.3.2.2.1 Armadura calculada

Armadura positiva na direção X:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{2065,16}{100 \cdot 12,0^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,0803$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0803))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,1243 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,1243 = 0,9503$$

Determinação da altura útil d:

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 2,5 + 1,5 \cdot 1 = 4,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d'$$

$$d = 16 - 4,0 = 12,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{2065,16}{0,9503 \cdot 12,0 \cdot 43,48} = 4,17 \text{ cm}^2/m$$

Armadura negativa na borda perpendicular a direção X:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{4428,13}{100 \cdot 12,0^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,1722$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,1722))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,2859 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,2859 = 0,8856$$

Determinação da altura útil d:

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 2,5 + 1,5 \cdot 1 = 4,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 4,0 = 12,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{4428,13}{0,8956 \cdot 12,0 \cdot 43,48} = 9,58 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura positiva na direção Y:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{846,44}{100 \cdot 12,0^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,0329$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0329)}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,0494 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,0494 = 0,9802$$

Determinação da altura útil d :

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 2,5 + 1,5 \cdot 1 = 4,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 4,0 = 12,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{846,44}{0,9802 \cdot 12,0 \cdot 43,48} = 1,66 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura negativa na borda perpendicular a direção Y:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{3193,74}{100 \cdot 12,0^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,1242$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,1242))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,1984 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,1984 = 0,9206$$

Determinação da altura útil d :

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 2,5 + 1,5 \cdot 1 = 4,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 4,0 = 12,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{3193,74}{0,9206 \cdot 12,0 \cdot 43,48} = 6,65 \text{ cm}^2/m$$

5.3.2.2.2 Armadura mínima

$$\rho_{\text{mín.}} = 0,15\%$$

A_c (área de concreto) = $b_w \cdot h$

$$A_{s \text{ mín}} = \rho_{\text{mín.}} \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/m$$

5.3.2.2.3 Armadura passiva aderente

Armadura passiva aderente (armadura positiva na direção X):

$$\rho_s = \rho_{min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/m$$

Armadura passiva aderente (armadura negativa na borda perpendicular a direção X):

$$\rho_s = \rho_{min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/m$$

Armadura passiva aderente (armadura positiva na direção Y):

$$\rho_s = \rho_{min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/m$$

Armadura passiva aderente (armadura negativa na borda perpendicular a direção Y):

$$\rho_s = \rho_{min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,15}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,4 \text{ cm}^2/m$$

5.3.2.3 Momento de fissuração

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t}$$

$\alpha = 1,5$ (seção retangular)

$$f_{ct} = f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 25^{2/3} = 2,56 \text{ Mpa} = 0,256 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{100 \cdot 16^3}{12} = 34133,333 \text{ cm}^4$$

$$y_t = h - y_{cg} = h - \frac{h}{2} = 16 - 8 = 8 \text{ cm}$$

$$M_r = \frac{1,5 \cdot 0,256 \cdot 34133,333}{8} = 1641,58 \text{ kN.cm/m}$$

5.3.2.4 Momento de Inércia de Branson

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \right] \cdot I_{II}$$

I_I = inércia homogenizada (com presença de armadura)

I_{II} = inércia no estado II puro

M_{at} = maior momento atuante na laje (combinação quase permanente)

$n = 3$ (para o caso de lajes)

Determinação do momento atuante (M_{at}):

$$M_{at} = \mu'_x \cdot p_{quase \text{ perm.}} \cdot l_x^2 = \frac{11,30 \cdot 6,58 \cdot 6^2}{100} = 26,7479 \text{ kN.m/m} = 2674,79 \text{ kN.cm/m}$$

$$p_{quase \text{ perm.}} = g_1 + g_2 + g_3 + \psi_2 \cdot q = 4 + 1,09 + 0,69 + 0,4 \cdot 2 = 6,58 \text{ kN/m}^2$$

Determinação do momento inércia da seção homogeneizada (I_h):

$$I_l = I_h = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (y_h - h/2)^2 + A_s (\alpha - 1) \cdot (y_h - d)^2$$

A_s = pertinte ao maior momento (armadura negativa na borda perpendicular a direção X)

$$A_s = 9,58 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{21000}{2415} = 8,70$$

$$A_h = b \cdot h + A_s (\alpha - 1) = 100 \cdot 16 + 9,58 \cdot (8,70 - 1) = 1673,75 \text{ cm}^2$$

$$y_h = \frac{b \cdot \frac{h^2}{2} + A_s (\alpha - 1) \cdot d}{A_h} = \frac{100 \cdot \frac{16^2}{2} + 9,58 (8,70 - 1) \cdot 12,0}{1673,75} = 8,18 \text{ cm}$$

$$I_l = I_h = \frac{100 \cdot 16^3}{12} + 100 \cdot 16 \cdot (8,18 - 16/2)^2 + 9,58 (8,70 - 1) \cdot (8,18 - 12,0)^2$$

$$I_h = 35261,35 \text{ cm}^4$$

Determinação do momento inércia no estágio II puro ($I_{xII,0}$):

$$I_{xII,0} = \frac{b \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (X_{II} - d)^2$$

$$X_{II} = -a_2 \pm \frac{\sqrt{a_2^2 - 4a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} = -83,33 \pm \frac{\sqrt{(-83,33)^2 - 4 \cdot 50 \cdot (-1000,01)}}{2 \cdot 50} = 3,72 \text{ cm}$$

$$a_1 = b_w/2 = 100/2 = 50$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s = 8,70 \cdot 9,58 = 83,33$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s = -12,0 \cdot 8,70 \cdot 9,58 = -1000,01$$

$$I_{xII,0} = \frac{100.3,72^3}{3} + 8,70.9,58(3,72 - 12,0)^2 = 7429,19 \text{ cm}^4$$

Determinação do momento inércia de Branson (I_m):

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n\right] \cdot I_{II}$$

$$I_m = \left(\frac{1641,58}{2674,79}\right)^3 \cdot 35261,35 + \left[1 - \left(\frac{1641,58}{2674,79}\right)^3\right] \cdot 7429,19 = 13862,89 \text{ cm}^4$$

5.3.2.5 Flechas

5.3.2.5.1 Flechas Elásticas

$$\alpha_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

Determinação do E_{cs} :

$\alpha_e = 1$ (granito e gnaiss)

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{F_{ck}} = 1.5600 \cdot \sqrt{25} = 28000 \text{ Mpa} = 2800 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{F_{ck}}{80}\right) \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{25}{80}\right) \cdot 2800 = 2415 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação da flecha elástica para cargas acidentais:

$p = 2,0 \text{ kN/m}^2$ (Variável)

$\alpha = 4,88$ para $\lambda = 1,67$ e caso 04 (tabela 03, disponibilizada anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p_{variável} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{CS} \cdot 100}$$

$$a_{elástica} = \frac{4,88 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 600^4}{16^3 \cdot 2415 \cdot 100} = 0,13 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{350} = \frac{600}{350} = 1,71 \text{ cm}$$

Determinação da flecha elástica para cargas totais:

$p = 7,78 \text{ kN/m}^2$ (totalidade das cargas)

$\alpha = 4,88$ para $\lambda = 1,67$ e caso 04 (tabela 03, disponibilizada anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p_{total} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{CS} \cdot 100}$$

$$a_{elástica} = \frac{4,88 \cdot 7,78 \cdot 10^{-4} \cdot 600^4}{16^3 \cdot 2415 \cdot 100} = 0,50 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

5.3.2.5.2 Flechas totais no tempo infinito

$$a_{t,\infty} = a_i (1 + \alpha_f)$$

Determinação da flecha imediata a_i

Como $M_{at} = 2674,79 \text{ kN.cm/m} > M_r = 1641,58 \text{ kN.cm/m}$ a seção encontra-se no estágio II. E para uma seção no estágio II, a flecha imediata a_i pode ser determinada multiplicando a flecha elástica $a_{elástica}$ pela relação $\frac{l_c}{l_m}$. Logo:

$$a_i = a_{elástica} \cdot \frac{l_c}{l_m} = \frac{\alpha \cdot p_{quase\ perm} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100} = \frac{4,88 \cdot 6,58 \cdot 600^4}{16^3 \cdot 2415 \cdot 100} \cdot \frac{34133,333}{13862,89} = 1,04 \text{ cm}$$

Determinação do coeficiente α_f

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_0)}{1 + 50p'} = \frac{2 - 0,53}{1 + 50 \cdot 0} = 1,47$$

$\xi(t_0) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32} = 0,68 \cdot (0,996^{14/30}) \cdot (14/30)^{0,32} = 0,53$ (retirada do escoramento com 14 dias, em que $t = 14/30$ meses).

$\xi(t) = 2$ para $t > 70$ meses.

Determinação da flecha no tempo infinito ($a_{t,\infty}$):

$$a_{t,\infty} = a_i (1 + \alpha_f) = 1,04 (1 + 1,47) = 2,55 \text{ cm} > a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

Logo é necessário uma contra flecha:

$$a_{cf} = -\frac{l_x}{350} = -\frac{600}{350} = -1,71 \text{ cm}$$

Assim, a flecha no tempo infinito passa a ser:

$$a_{t,\infty} = 2,55 - 1,71 = 0,84 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

5.3.3 Dimensionamento da laje L1 para classe de agressividade ambiental III

5.3.3.1 Esforços

5.3.3.3.1.1 Ações

- **Peso próprio**
 $g_1 = 4,0 \text{ kN/m}^2$
- **Revestimento**
 $g_2 = 1,09 \text{ kN/m}^2$
- **Parede**
 $g_3 = 0,69 \text{ kN/m}^2$
- **Varável**
 $q = 2,00 \text{ kN/m}^2$
- **Total**
 $P = 7,78 \text{ kN/m}^2$

5.3.3.3.1.2 Momentos fletores

Laje armada em duas direções:

- **Vinculação e relação λ**

$$\lambda = 1,67$$

- **Coefficientes μ**

Para $\lambda = 1,67$ e caso 04, a tabela 01 disponibilizada no anexo A, fornece os seguintes valores de μ :

$$\mu_x = 5,27; \mu_x' = 11,30; \mu_y = 2,16; \mu_y' = 8,15$$

- **Momentos fletores solicitantes e de cálculo**

Momentos fletores positivos na direção X:

$$M_a = \mu_x \cdot p \cdot l_x^2 = 5,27 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 1475,11 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 1475,11 \cdot 1,4 = 2065,16 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores negativos na borda perpendicular a direção X:

$$M_a = \mu_x' \cdot p \cdot l_x^2 = 11,30 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 3162,95 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 3162,95 \cdot 1,4 = 4428,13 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores positivos na direção Y:

$$M_a = \mu_y \cdot p \cdot l_x^2 = 2,16 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 604,60 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 604,60 \cdot 1,4 = 846,44 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores negativos na borda perpendicular a direção Y:

$$M_a = \mu_y' \cdot p \cdot l_x^2 = 8,15 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 2281,24 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 2281,24 \cdot 1,4 = 3193,74 \text{ kN.cm/m}$$

5.3.3.2 Armaduras longitudinais de flexão

5.3.3.2.1 Armadura calculada

Armadura positiva na direção X:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{2065,16}{100 \cdot 11,0^2 \cdot 4,0/1,4} = 0,0597$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0597))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,0912 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,0912 = 0,9635$$

Determinação da altura útil d :

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 3,5 + 1,5 \cdot 1 = 5,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d'$$

$$d = 16 - 5,0 = 11,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{2065,16}{0,9635 \cdot 11,0 \cdot 43,48} = 4,48 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura negativa na borda perpendicular a direção X:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_x :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{4428,13}{100 \cdot 11,0^2 \cdot 4,0/1,4} = 0,1281$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,1281))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,2052 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,2052 = 0,9179$$

Determinação da altura útil d :

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 3,5 + 1,5 \cdot 1 = 5,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 5,0 = 11,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{4428,13}{0,9179 \cdot 11,0 \cdot 43,48} = 10,09 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura positiva na direção Y:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{846,44}{100 \cdot 11,0^2 \cdot 4,0/1,4} = 0,0245$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0245)}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,0365 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,0365 = 0,9854$$

Determinação da altura útil d :

c (cobertura) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 3,5 + 1,5 \cdot 1 = 5,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 5,0 = 11,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{846,44}{0,9854 \cdot 11,0 \cdot 43,48} = 1,80 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura negativa na borda perpendicular a direção Y:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_x :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{3193,74}{100 \cdot 11,0^2 \cdot 4,0/1,4} = 0,0924$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0924))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,1442 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,1442 = 0,9423$$

Determinação da altura útil d :

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 3,5 + 1,5 \cdot 1 = 5,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 5,0 = 11,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{3193,74}{0,9423 \cdot 11,0 \cdot 43,48} = 7,09 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.3.2.2 Armadura mínima

$$\rho_{\text{mín.}} = 0,179\%$$

A_c (área de concreto) = $b_w \cdot h$

$$A_{s \text{ mín}} = \rho_{\text{mín.}} \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.3.2.3 Armadura passiva aderente

Armadura passiva aderente (armadura positiva na direção X):

$$\rho_s = \rho_{\min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura negativa na borda perpendicular a direção X):

$$\rho_s = \rho_{\min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura positiva na direção Y):

$$\rho_s = \rho_{\min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura negativa na borda perpendicular a direção Y):

$$\rho_s = \rho_{\min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.3.3 Momento de fissuração

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t}$$

$\alpha = 1,5$ (seção retangular)

$$f_{ct} = f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 40^{2/3} = 3,51 \text{ Mpa} = 0,351 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{100 \cdot 16^3}{12} = 34133,333 \text{ cm}^4$$

$$y_t = h - y_{cg} = h - \frac{h}{2} = 16 - 8 = 8 \text{ cm}$$

$$M_r = \frac{1,5 \cdot 0,351 \cdot 34133,333}{8} = 2245,65 \text{ kN.cm/m}$$

5.3.3.4 Momento de Inércia de Branson

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \right] \cdot I_{II}$$

I_I = inércia homogenizada (com presença de armadura)

I_{II} = inércia no estado II puro

M_{at} = maior momento atuante na laje (combinação quase permanente)

$n = 3$ (para o caso de lajes)

Determinação do momento atuante (M_{at}):

$$M_{at} = \mu'_x \cdot p_{quase \text{ perm.}} \cdot l_x^2 = \frac{11,30 \cdot 6,58 \cdot 6^2}{100} = 26,7479 \text{ kN.m/m} = 2674,79 \text{ kN.cm/m}$$

$$p_{quase \text{ perm.}} = g_1 + g_2 + g_3 + \psi_2 \cdot q = 4 + 1,09 + 0,69 + 0,4 \cdot 2 = 6,58 \text{ kN/m}^2$$

Determinação do momento inércia da seção homogeneizada (I_h):

$$I_I = I_h = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (y_h - h/2)^2 + A_s (\alpha - 1) \cdot (y_h - d)^2$$

A_s = pertinte ao maior momento (armadura negativa na borda perpendicular a direção X)

$$A_s = 10,09 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{21000}{3187,6} = 6,59$$

$$A_h = b \cdot h + A_s (\alpha - 1) = 100 \cdot 16 + 10,09 \cdot (6,59 - 1) = 1656,37 \text{ cm}^2$$

$$y_h = \frac{b \cdot \frac{h^2}{2} + A_s(\alpha - 1) \cdot d}{A_h} = \frac{100 \cdot \frac{16^2}{2} + 10,09(6,59 - 1) \cdot 11,0}{1656,37} = 8,10 \text{ cm}$$

$$I_l = I_h = \frac{100 \cdot 16^3}{12} + 100 \cdot 16 \cdot (8,10 - 16/2)^2 + 10,09(6,59 - 1) \cdot (8,10 - 11,0)^2$$

$$I_h = 34623,36 \text{ cm}^4$$

Determinação do momento inércia no eixo II puro ($I_{xII,0}$):

$$I_{xII,0} = \frac{b \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (X_{II} - d)^2$$

$$X_{II} = -a_2 \pm \frac{\sqrt{a_2^2 - 4a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} = -66,45 \pm \frac{\sqrt{(-66,45)^2 - 4 \cdot 50 \cdot (-730,98)}}{2 \cdot 50} = 3,22 \text{ cm}$$

$$a_1 = b_w/2 = 100/2 = 50$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s = 6,59 \cdot 10,09 = 66,45$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s = -11,0 \cdot 6,59 \cdot 10,09 = -730,98$$

$$I_{xII,0} = \frac{100 \cdot 3,22^3}{3} + 6,59 \cdot 10,09 (3,22 - 11,0)^2 = 5135,13 \text{ cm}^4$$

Determinação do momento inércia de Branson (I_m):

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n \cdot I_l + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n\right] \cdot I_{II}$$

$$I_m = \left(\frac{2245,65}{2674,79}\right)^3 \cdot 34623,36 + \left[1 - \left(\frac{2245,65}{2674,79}\right)^3\right] \cdot 5135,13 = 22585,42 \text{ cm}^4$$

5.3.3.5 Flechas

5.3.3.5.1 Flechas Elásticas

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{CS} \cdot 100}$$

Determinação do E_{CS} :

$\alpha_e = 1$ (granito e gnaiss)

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{F_{ck}} = 1.5600 \cdot \sqrt{40} = 35417,51 \text{ Mpa} = 3541,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{F_{ck}}{80}\right) \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{40}{80}\right) \cdot 3541,8 = 3187,6 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação da flecha elástica para cargas acidentais:

$p = 2,0 \text{ kN/m}^2$ (Variável)

$\alpha = 4,88$ para $\lambda = 1,67$ e caso 04 (tabela 03, disponibilizada anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p_{variável} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{CS} \cdot 100}$$

$$a_{elástica} = \frac{4,88 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 600^4}{16^3 \cdot 3187,6 \cdot 100} = 0,10 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{350} = \frac{600}{350} = 1,71 \text{ cm}$$

Determinação da flecha elástica para cargas totais:

$p = 7,78 \text{ kN/m}^2$ (totalidade das cargas)

$\alpha = 4,88$ para $\lambda = 1,67$ e caso 04 (tabela 03, disponibilizada anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p_{total} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{CS} \cdot 100}$$

$$a_{elástica} = \frac{4,88 \cdot 7,78 \cdot 10^{-4} \cdot 600^4}{16^3 \cdot 3187,6 \cdot 100} = 0,38 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

5.3.3.5.2 Flechas totais no tempo infinito

$$a_{t,\infty} = a_i (1 + \alpha_f)$$

Determinação da flecha imediata a_i

Como $M_{at} = 2674,79 \text{ kN.cm/m} > M_r = 2245,65 \text{ kN.cm/m}$ a seção encontra-se no estágio II. E para uma seção no estágio II, a flecha imediata a_i pode ser determinada multiplicando a flecha elástica $a_{elástica}$ pela relação I_c/I_m . Logo:

$$a_i = a_{elástica} \cdot \frac{I_c}{I_m} = \frac{\alpha \cdot p_{quase perm} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100} = \frac{4,88 \cdot 6,58 \cdot 600^4}{16^3 \cdot 3187,6 \cdot 100} \cdot \frac{34133,333}{22585,42} = 0,48 \text{ cm}$$

Determinação do coeficiente α_f

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_0)}{1 + 50p'} = \frac{2 - 0,53}{1 + 50 \cdot 0} = 1,47$$

$\xi(t_0) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32} = 0,68 \cdot (0,996^{14/30}) \cdot (14/30)^{0,32} = 0,53$ (retirada do escoramento com 14 dias, em que $t = 14/30$ meses).

$\xi(t) = 2$ para $t > 70$ meses.

Determinação da flecha no tempo infinito ($a_{t,\infty}$):

$$a_{t,\infty} = a_i (1 + \alpha_f) = 0,48 (1 + 1,47) = 1,19 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

Logo não é necessário contraflecha

$$a_{cf} = -0,00$$

5.3.4 Dimensionamento da laje L1 para classe de agressividade ambiental IV

5.3.4.1 Esforços

5.3.4.1.1 Ações

- **Peso próprio**

$$g_1 = 4,0 \text{ kN/m}^2$$

- **Revestimento**

$$g_2 = 1,09 \text{ kN/m}^2$$

- **Parede**

$$g_3 = 0,69 \text{ kN/m}^2$$

- **Varável**

$$q = 2,00 \text{ kN/m}^2$$

- **Total**

$$P = 7,78 \text{ kN/m}^2$$

5.3.4.1.2 Momentos fletores

$$\lambda = 1,67$$

- **Coefficientes μ**

Para $\lambda = 1,67$ e caso 04, a tabela 01 disponibilizada no anexo A, fornece os seguintes valores de μ :

$$\mu_x = 5,27; \mu_x' = 11,30; \mu_y = 2,16; \mu_y' = 8,15$$

- Momentos fletores solicitantes e de cálculo

Momentos fletores positivos na direção X:

$$M_a = \mu_x \cdot p \cdot l_x^2 = 5,27 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 1475,11 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 1475,11 \cdot 1,4 = 2065,16 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores negativos na borda perpendicular a direção X:

$$M_a = \mu_x' \cdot p \cdot l_x^2 = 11,30 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 3162,95 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 3162,95 \cdot 1,4 = 4428,13 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores positivos na direção Y:

$$M_a = \mu_y \cdot p \cdot l_x^2 = 2,16 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 604,60 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 604,60 \cdot 1,4 = 846,44 \text{ kN.cm/m}$$

Momentos fletores negativos na borda perpendicular a direção Y:

$$M_a = \mu_y' \cdot p \cdot l_x^2 = 8,15 \cdot 7,78 \cdot 6^2 = 2281,24 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_d = M_a \cdot \gamma_f = 2281,24 \cdot 1,4 = 3193,74 \text{ kN.cm/m}$$

5.3.4.2 Armaduras longitudinais de flexão

5.3.4.2.1 Armadura calculada

Armadura positiva na direção X

:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{2065,16}{100 \cdot 10,0^2 \cdot 4,0/1,4} = 0,0723$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0723))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,1112 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,1112 = 0,9555$$

Determinação da altura útil d:

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 4,5 + 1,5 \cdot 1 = 6,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d'$$

$$d = 16 - 6,0 = 10,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{2065,16}{0,9555 \cdot 10,0 \cdot 43,48} = 4,97 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura negativa na borda perpendicular a direção X:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{4428,13}{100 \cdot 10,0^2 \cdot 4,0/1,4} = 0,1550$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,1550))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,22537 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,22537 = 0,8985$$

Determinação da altura útil d:

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 4,5 + 1,5 \cdot 1 = 6,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 6,0 = 10,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{4428,13}{0,8985 \cdot 10,0 \cdot 43,48} = 11,33 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura positiva na direção Y:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{846,44}{100 \cdot 10,0^2 \cdot 4,0/1,4} = 0,0296$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,0296)}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,0444 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,0444 = 0,9823$$

Determinação da altura útil d :

c (cobertura) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 4,5 + 1,5 \cdot 1 = 6,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 6,0 = 10,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{846,44}{0,9823 \cdot 10,0 \cdot 43,48} = 1,98 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura negativa na borda perpendicular a direção Y:

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

Determinação de K_z :

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{3193,74}{100 \cdot 10,0^2 \cdot 4,0/1,4} = 0,1118$$

$$K_x = \frac{-0,68 \cdot \sqrt{(0,68^2 - 4 \cdot (-0,272) \cdot (-0,118))}}{2 \cdot (-0,272)}$$

$$K_x = 0,1769 < k_{x \text{ lim}} = 0,45$$

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot K_x = 1 - 0,4 \cdot 0,1769 = 0,9292$$

Determinação da altura útil d :

c (cobrimento) = 2 cm (para CAA I)

ϕ (diâmetro da barra) = 10 mm

$$d' = c + 1,5 \cdot \phi$$

$$d' = 4,5 + 1,5 \cdot 1 = 6,0 \text{ cm}$$

h (espessura da laje) = 16 cm

$$d = h - d' = 16 - 6,0 = 10,0 \text{ cm}$$

Determinação de f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação de A_s :

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{3193,74}{0,9292 \cdot 10,0 \cdot 43,48} = 7,90 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.4.2.2 Armadura mínima

$$\rho_{\text{mín.}} = 0,179\%$$

$$A_c \text{ (área de concreto)} = b_w \cdot h$$

$$A_{s \text{ mín}} = \rho_{\text{mín.}} \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.4.2.3 Armadura passiva aderente

Armadura passiva aderente (armadura positiva na direção X):

$$\rho_s = \rho_{\min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura negativa na borda perpendicular a direção X):

$$\rho_s = \rho_{\min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura positiva na direção Y):

$$\rho_s = \rho_{\min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura passiva aderente (armadura negativa na borda perpendicular a direção Y):

$$\rho_s = \rho_{\min}$$

$$A_s = \rho_s \cdot A_c = \frac{0,179}{100} \cdot 100 \cdot 16 = 2,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.4.3 Momento de fissuração

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t}$$

$\alpha = 1,5$ (seção retangular)

$$f_{ct} = f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 40^{2/3} = 3,51 \text{ Mpa} = 0,351 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{100 \cdot 16^3}{12} = 34133,333 \text{ cm}^4$$

$$y_t = h - y_{cg} = h - \frac{h}{2} = 16 - 8 = 8 \text{ cm}$$

$$M_r = \frac{1,5 \cdot 0,351 \cdot 34133,333}{8} = 2245,65 \text{ kN.cm/m}$$

5.3.4.4 Momento de Inércia de Branson

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n\right] \cdot I_{II}$$

I_I = inércia homogenizada (com presença de armadura)

I_{II} = inércia no estado II puro

M_{at} = maior momento atuante na laje (combinação quase permanente)

$n = 3$ (para o caso de lajes)

Determinação do momento atuante (M_{at}):

$$M_{at} = \mu'_x \cdot p_{quase \text{ perm.}} \cdot l_x^2 = \frac{11,30 \cdot 6,58 \cdot 6^2}{100} = 26,7479 \text{ kN.m/m} = 2674,79 \text{ kN.cm/m}$$

$$p_{quase \text{ perm.}} = g_1 + g_2 + g_3 + \psi_2 \cdot q = 4 + 1,09 + 0,69 + 0,4 \cdot 2 = 6,58 \text{ kN/m}^2$$

Determinação do momento inércia da seção homogeneizada (I_h):

$$I_I = I_h = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (y_h - h/2)^2 + A_s (\alpha - 1) \cdot (y_h - d)^2$$

A_s = pertinente ao maior momento (armadura negativa na borda perpendicular a direção X)

$$A_s = 11,33 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{21000}{3187,6} = 6,59$$

$$A_h = b \cdot h + A_s (\alpha - 1) = 100 \cdot 16 + 11,33 \cdot (6,59 - 1) = 1663,34 \text{ cm}^2$$

$$y_h = \frac{b \cdot \frac{h^2}{2} + A_s (\alpha - 1) \cdot d}{A_h} = \frac{100 \cdot \frac{16^2}{2} + 11,33 (6,59 - 1) \cdot 10,0}{1663,34} = 8,08 \text{ cm}$$

$$I_l = I_h = \frac{100.16^3}{12} + 100.16.(8,08 - 16/2)^2 + 11,33(6,59 - 1).(8,08 - 10,0)^2$$

$$I_h = 34377,04 \text{ cm}^4$$

Determinação do momento inércia no eixo II puro ($I_{xII,0}$):

$$I_{xII,0} = \frac{b \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (X_{II} - d)^2$$

$$X_{II} = -a_2 \pm \frac{\sqrt{a_2^2 - 4a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} = -74,67 \pm \frac{\sqrt{(-74,67)^2 - 4.50 \cdot (-746,74)}}{2.50} = 3,19 \text{ cm}$$

$$a_1 = b_w/2 = 100/2 = 50$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s = 6,59 \cdot 11,33 = 74,67$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s = -10,0 \cdot 6,59 \cdot 11,33 = -746,74$$

$$I_{xII,0} = \frac{100 \cdot 3,19^3}{3} + 6,59 \cdot 11,33 (3,19 - 10,0)^2 = 4545,16 \text{ cm}^4$$

Determinação do momento inércia de Branson (I_m):

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n \cdot I_l + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n\right] \cdot I_{II}$$

$$I_m = \left(\frac{2245,65}{2674,79}\right)^3 \cdot 34377,04 + \left[1 - \left(\frac{2245,65}{2674,79}\right)^3\right] \cdot 4545,16 = 22198,81 \text{ cm}^4$$

5.3.4.5 Flechas

5.3.4.5.1 Flechas Elásticas

$$\alpha_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

Determinação do E_{cs} :

$\alpha_e = 1$ (granito e gnaiss)

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{F_{ck}} = 1.5600 \cdot \sqrt{40} = 35417,51 \text{ Mpa} = 3541,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{F_{ck}}{80}\right) \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{40}{80}\right) \cdot 3541,8 = 3187,6 \text{ kN/cm}^2$$

Determinação da flecha elástica para cargas acidentais:

$p = 2,0 \text{ kN/m}^2$ (Variável)

$\alpha = 4,88$ para $\lambda = 1,67$ e caso 04 (tabela 03, disponibilizada anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p_{variável} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

$$a_{elástica} = \frac{4,88 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 600^4}{16^3 \cdot 3187,6 \cdot 100} = 0,10 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{350} = \frac{600}{350} = 1,71 \text{ cm}$$

Determinação da flecha elástica para cargas totais:

$p = 7,78 \text{ kN/m}^2$ (totalidade das cargas)

$\alpha = 4,88$ para $\lambda = 1,67$ e caso 04 (tabela 03, disponibilizada anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{\alpha \cdot p_{total} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

$$a_{elástica} = \frac{4,88 \cdot 7,78 \cdot 10^{-4} \cdot 600^4}{16^3 \cdot 3187,6 \cdot 100} = 0,38 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

5.3.4.5.2 Flechas totais no tempo infinito

$$a_{t,\infty} = a_i (1 + \alpha_f)$$

Determinação da flecha imediata a_i

Como $M_{at} = 2674,79 \text{ kN.cm/m} > M_r = 2245,65 \text{ kN.cm/m}$ a seção encontra-se no estágio II. E para uma seção no estágio II, a flecha imediata a_i pode ser determinada multiplicando a flecha elástica $a_{elástica}$ pela relação I_c/I_m . Logo:

$$a_i = a_{elástica} \cdot \frac{I_c}{I_m} = \frac{\alpha \cdot p_{quase \text{ perm}} \cdot l_x^4}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100} = \frac{4,88 \cdot 6,58 \cdot 600^4}{16^3 \cdot 3187,6 \cdot 100} \cdot \frac{34133,333}{2198,81} = 0,49 \text{ cm}$$

Determinação do coeficiente α_f

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_0)}{1 + 50p'} = \frac{2 - 0,53}{1 + 50 \cdot 0} = 1,47$$

$\xi(t_0) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32} = 0,68 \cdot (0,996^{14/30}) \cdot (14/30)^{0,32} = 0,53$ (retirada do escoramento com 14 dias, em que $t = 14/30$ meses).

$\xi(t) = 2$ para $t > 70$ meses.

Determinação da flecha no tempo infinito ($a_{t,\infty}$):

$$a_{t,\infty} = a_i (1 + \alpha_f) = 0,49 (1 + 1,47) = 1,21 \text{ cm} < a_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm}$$

Logo não é necessário contraflecha

$$a_{cf} = -0,00$$

6 RESULTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO

Neste tópico do trabalho serão apresentados os resultados obtidos para o dimensionamento das lajes do pavimento.

6.1 Resultados para os esforços

6.1.1 Resultados para as ações

Resultados para ações nas lajes internas:

A tabela 12 fornece os resultados obtidos para ações nas lajes internas.

Tabela 12: Carregamento das lajes internas

Laje	h (cm)	g_{pp} (kN/m ²)	Rev. (kN/m ²)	Paredes (kN/m ²)	Variavel(kN/m ²)	total (kN/m ²)
L1	16	4,0	1,09	0,69	2,00	7,78
L2	14	3,5	1,09	0,00	2,00	6,59
L3	14	3,5	1,09	2,04	2,00	8,63
L4	14	3,5	1,09	3,00	2,00	9,59
L5	14	3,5	1,09	2,17	2,00	8,76
L6	16	4,0	1,09	0,00	2,00	7,09

Fonte: O autor

- **Peso Próprio:**

Ao se estimar o peso próprio das lajes foi considerado peso específico do concreto armado $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ (tabela 1 da NBR 6118:2014).

- **Revestimento (Piso e contrapiso):**

Ao se estimar o peso do revestimento foram feitas as seguintes considerações de projeto:

Espessura revestimento = 2 cm

Material utilizado: Granito; $\gamma = 28 \text{ KN/m}^3$ (tabela 1 da NBR 6120:1980).

Espessura da argamassa = 2,5 cm

Peso específico da argamassa de assentamento: $\gamma = 21 \text{ KN/m}^3$ (tabela 1 da NBR 6120:1980).

- **Carga das paredes/ divisórias:**

Em se tratando das lajes L1, L3, L4 e L5, armadas em 2 direções, o peso das paredes/divisórias a ser considerado foi uniformemente distribuído na área da laje, resultando em uma carga por m^2 .

Ao se estimar a carga das paredes de alvenaria nas lajes L1, L3 e L5 foram feitas as seguintes considerações de projeto:

Altura adotada para as paredes: 3,4 m

Largura das paredes (acabada): 20 cm

Espessura tijolo = 15 cm

Peso específico do tijolo: $\gamma = 13 \text{ kN/m}^3$

Espessura argamassa revestimento = 2,5 cm de cada lado

Peso específico da argamassa = $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$

Ao se estimar a carga das divisórias da laje L4 foram feitas as seguintes considerações de projeto:

Altura adotada para as divisórias: 3,4 m

Espessura divisória = 9 cm

Peso específico da divisória = $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$

- Carga Variável:

Sendo o pavimento um escritório comercial, a sobrecarga considerada no projeto foi de $2,0 \text{ kN/m}^2$, conforme especificação da NBR 6120:1980 (tabela 2).

Resultados para ações nas lajes em balanço:

- Resultado das ações na laje em balanço L7 (engastada)

Tabela 13: Carregamento laje engastada L7 – Concepção estrutural I

Laje	$h(\text{cm})$	$g_{pp} (\text{kN/m}^2)$	Rev. (kN/m^2)	Variável (kN/m^2)	total (kN/m^2)
L7 (engastada)	18	4,50	1,00	2,00	7,50

Fonte: O autor

- Peso próprio:

Assim como para as lajes internas, ao se estimar o peso próprio da laje L7 foi considerado peso específico do concreto armado $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ (tabela 1 da NBR 6118:2014).

- Revestimento:

O peso do revestimento foi considerado como sendo $1,0 \text{ kN/m}^2$.

- Carga Variável:

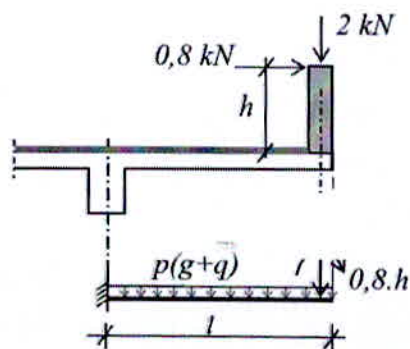
A sobrecarga considerada foi de $2,0 \text{ kN/m}$ (sem acesso ao público), conforme tabela 2 da NBR 6120:1980.

- Carga aplicada no parapeito:

Em se tratando de lajes armadas em uma direção, como é o caso da laje L7(engastada), o cálculo das ações é análogo ao de uma viga de base 1m e altura correspondente à espessura da laje. Assim, em razão da simplificação dos processos manuais de cálculo, o carregamento a ser considerado foi uniformemente distribuído por metro de laje.

Na extremidade da laje L7(engastada), ao longo do parapeito foi suposta uma carga uniformemente distribuída vertical de $2,0 \text{ kN/m}$ e uma carga horizontal de $0,8 \text{ kN/m}$ respeitando-se prescrições contidas no item 2.2.1.5 da NBR 6120: 1980. A figura a seguir representa o esquema de carregamento da laje L7.

Figura 16: Ações da laje L7 (engastada)



Fonte: O autor

- Resultados das ações nas lajes sobre três apoios L7 e L8

Tabela 14: Carregamento das Lajes sobre 3 apoios – Concepção estrutural II

Laje	$h(cm)$	$g_{pp}(kN/m^2)$	$Rev.(kN/m^2)$	$Carga\ vertical(kN/m^2)$	$Variavel(kN/m^2)$	$total(kN/m^2)$
L7 (3 apoios)	16	4,0	1,00	0,80	2,00	7,80
L8 (3 apoios)	16	4,0	1,00	0,80	2,00	7,80

Fonte: O autor

- Peso próprio:

Ao se estimar o peso próprio das lajes L7 (3 apoios) e L8 (3 apoios) foi considerado peso específico do concreto armado $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ (tabela 1 da NBR 6118:2014).

- Revestimento:

O peso do revestimento foi considerado como sendo $1,0 \text{ kN/m}^2$.

- Carga aplicada no parapeito:

Em razão da simplificação dos processos manuais de cálculo para lajes armadas em duas direções, o carregamento a ser considerado foi uniformemente distribuído por área de laje (por m^2).

Em se tratando das lajes em balanço L7 (3 apoios) e L8 (3 apoios), armadas em duas direções a consideração da carga uniformemente distribuída vertical de $2,0 \text{ kN/m}$ aplicada sobre o parapeito na extremidade do balanço foi uniformemente distribuída por m^2 de laje. Tendo em vista que o comprimento do balanço nessas lajes é de $2,5 \text{ m}$, a carga vertical a ser aplicada por área de laje é de $0,8 \text{ kN/m}^2$ (conforme pode ser visto na tabela 15)

- Carga Variável:

A sobrecarga considerada foi de $2,0 \text{ kN/m}$ (sem acesso ao público), conforme tabela 2 da NBR 6120:1980.

6.1.2 Resultados para os momentos fletores de cálculo

As tabelas a seguir fazem referência aos momentos fletores obtidos nas lajes do pavimento para ambas as concepções estruturais.

Resultados para os momentos fletores de cálculo nas lajes internas:

Tabela 15: Momentos fletores de cálculo – Laje L1

Laje	$\lambda(l_y/l_x)$	μ		$M(kN.cm/m)$	γ_f	$M_d(kN.cm/m)$	
L1	1,67	μ_x	5,27	M_x	1475	1,4	2065
		μ_x'	11,30	M_x'	3163	1,4	4428
		μ_y	2,16	M_y	605	1,4	846
		μ_y'	8,15	M_y'	2281	1,4	3194

Fonte: O autor

Tabela 16: Momentos fletores de cálculo – Laje L2

Laje	$\lambda(l_y/l_x)$	μ		$M(kN.cm/m)$	γ_f	$M_d(kN.cm/m)$	
L2	1,17	μ_x	4,51	M_x	1069	1,4	1497
		μ_y	4,05	M_y	961	1,4	1344
		μ_y'	9,88	M_y'	2342	1,4	3279

Fonte: O autor

Tabela 17: Momentos fletores de cálculo – Laje L3

Laje	$\lambda(l_y/l_x)$	μ		$M(kN.cm/m)$	γ_f	$M_d(kN.cm/m)$	
L3	1,67	μ_x	3,98	M_x	309	1,4	432
		μ_x'	8,25	M_x'	640	1,4	896
		μ_y	1,32	M_y	102	1,4	143
		μ_y'	5,58	M_y'	433	1,4	606

Fonte: O autor

Tabela 18: Momentos fletores de cálculo – Laje L4

Laje	$\lambda(l_y/l_x)$	μ		$M(kN.cm/m)$	γ_f	$M_d(kN.cm/m)$	
L4	1,60	μ_x	3,89	M_x	932	1,4	1305
		μ_x'	8,14	M_x'	1950	1,4	2730
		μ_y	1,42	M_y	340	1,4	476
		μ_y'	5,66	M_y'	1356	1,4	1898

Fonte: O autor

Tabela 19: Momentos fletores de cálculo – Laje L5

Laje	$\lambda(l_y/l_x)$	μ	$M(kN.cm/m)$		γ_f	$M_d(kN.cm/m)$	
L5	1,60	μ_x	3,89	M_x	851	1,4	1192
		μ_x'	8,14	M_x'	1781	1,4	2494
		μ_y	1,42	M_y	311	1,4	435
		μ_y'	5,66	M_y'	1239	1,4	1734

Fonte: O autor

Tabela 20: Momentos fletores de cálculo – Laje L6

Laje	$\lambda(l_y/l_x)$	μ	$M(kN.cm/m)$		γ_f	$M_d(kN.cm/m)$	
L6	1,29	μ_x	4,16	M_x	14444	1,4	2022
		μ_x'	9,37	M_x'	3253	1,4	4554
		μ_y	2,69	M_y	934	1,4	1307
		μ_y'	7,81	M_y'	2711	1,4	3796

Fonte: O autor

Resultados para momentos fletores de cálculo nas lajes em balanço:

- Momentos fletores de cálculo na laje em balanço L7 (engastada)

Tabela 21: Momentos fletores de cálculo – Laje L7

Laje	$M(kN.cm/m)$	γ_f	γ_n	$M_d(kN.cm/m)$
L7 (engastada)	3082	1,40	1,05	4530

Fonte: O autor

Sendo a laje L7 armada em uma direção, o cálculo do momento fletor foi análogo ao de uma viga de base 1m e altura correspondente à espessura da laje. Para o cálculo do momento fletor atuante foi utilizada a seguinte equação, considerando esquema estático da laje L7 (visto na figura 16 deste trabalho):

$$M = \frac{W \cdot l^2}{2} + P \cdot l + M_{aplicado} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Onde:

W = somatório de ações permanentes (peso próprio + revestimento) e ações variáveis.

P = carga vertical aplicada no parapeito na extremidade do balanço de 2,0 kN/m.

$M_{aplicado}$ = o produto da carga horizontal (0,8 kN/m aplicada na altura do parapeito) pela altura do parapeito ($h = 1,30$ m).

$l =$ vão livre

Com o valor do momento atuante, obtido pela equação, calculou-se então o momento de cálculo M_d (majorado pelos coeficientes γ_f e γ_n).

Considerando que a altura adotada para a laje L7 foi de 18 cm, o valor obtido para γ_n foi de 1,05.

Resultados para momentos fletores de cálculo nas lajes sobre três apoios:

Os momentos fletores obtidos nas lajes sobre três apoios são mostrados nas tabelas 22 e 24 a seguir.

- Resultados para os momentos fletores de cálculo na laje L7 (3 apoios)

Tabela 22: Momentos fletores de cálculo – Laje L7 (3 apoios)

Laje	$\gamma(l_a/l_b)$	μ	$M(kN.cm/m)$	γ_f	γ_n	$M_d(kN.cm/m)$		
L7 (3 apoios)	0,31	μ_x	6,11	M_x	298	1,4	1,15	480
		$\mu_{x'}$	40,71	$M_{x'}$	1985	1,4	1,15	3195
		μ_y	1,45	M_y	71	1,4	1,15	114
		μ_{yb}	7,45	M_{yb}	363	1,4	1,15	585
		$\mu_{y'}$	7,28	$M_{y'}$	355	1,4	1,15	571

Fonte: O autor

Os valores obtidos para μ são valores tabelados e dependem da relação γ e do tipo de vinculação. Tais valores podem vistos na tabela a seguir:

Tabela 23: coeficientes μ -Laje L7 (3 apoios)

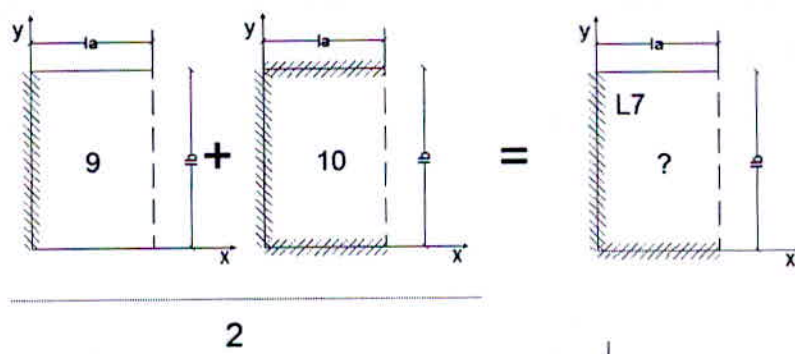
μ cálculo dos momentos máximos Lajes sobre 3 apoios															
Tipo	9				10				?						
$\gamma(l_a/l_b)$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	μ_{yb}	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	μ_{yb}	$\mu_{y'}$	$\mu_{yb'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	μ_{yb}	$\mu_{y'}$
0,30	-7,33	43,08	0,78	6,22	-4,89	38,33	2,11	8,67	14,56	37,00	-6,11	40,71	1,45	7,45	7,28

Fonte: O autor (adaptado da tabela 2.3 e, Pinheiro, 2007-Escola de engenharia de São Carlos- USP)

Sendo l_a o menor vão da laje e l_b o maior vão da laje

Diante da inexistência de um caso específico das condições de vinculação e da relação γ na tabela, que pudesse representar o esquema estático da laje L7 (3 apoios), os valores de μ foram obtidos pela média aritmética entre os valores de μ para o caso 9 e 10 (indicado em amarelo na tabela 23). A figura a seguir refere-se ao esquema estático representativo da laje L7 (3 apoios).

Figura 17: Esquema estático representativo da laje L7(3 apoios)



Fonte: O autor.

- Resultados para os momentos fletores de cálculo na laje L8 (3 apoios)

Tabela 24: coeficientes μ – Laje L8 (3 apoios)

Laje	$\gamma(l_a/l_b)$	μ	$M(kN.cm/m)$	γ_f	γ_n	$M_d(kN.cm/m)$		
L8 (3 apoios)	0,28	μ_x	12,50	M_x	609	1,40	1,15	9,81
		$\mu_{x'}$	50,00	$M_{x'}$	2438	1,40	1,15	3924
		μ_y	1,45	M_y	71	1,40	1,15	114
		μ_{yb}	7,45	M_{yb}	363	1,40	1,15	585
		$\mu_{y'}$	7,28	$M_{y'}$	355	1,40	1,15	571

Fonte: O autor

Os valores obtidos para μ são valores tabelados e dependem da relação γ e do tipo de vinculação. Tais valores podem vistos na tabela a seguir:

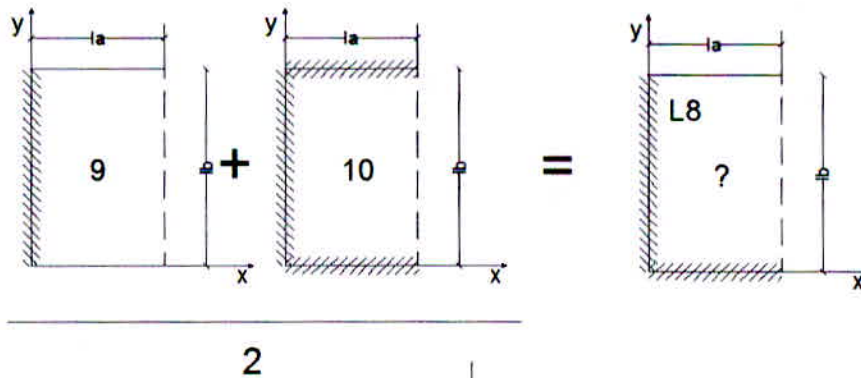
Tabela 25: Momentos fletores de cálculo – Laje L8 (3 apoios)

μ cálculo dos momentos máximos Lajes sobre 3 apoios															
Tipo	9				10					?					
$\gamma (l_a/l_b)$	μ_x	μ_x'	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ_x'	μ_y	μ_{yb}	μ_y'	μ_{yb}'	μ_x	μ_x'	μ_y	μ_{yb}	μ_y'
<0,30	-12,50	50,00	0,78	6,22	-12,50	50,00	2,11	8,67	14,56	37,00	-12,50	50,00	1,45	7,45	7,28

Fonte: O autor (adaptado da tabela 2.3 e, Pinheiro, 2007-Escola de engenharia de São Carlos- USP)

Assim como para a laje L7 (3 apoios), a inexistência de um caso específico das condições de vinculação e da relação γ na tabela, que pudesse representar o esquema estático da laje L8, os valores de μ foram obtidos pela média aritmética entre os valores de μ para o caso 9 e 10. A figura a seguir refere-se ao esquema estático representativo da laje L8 (3 apoios).

Figura 18: Esquema estático representativo da laje L8 (3 apoios)



Fonte: O autor.

6.2 Resultados para armaduras longitudinais de flexão

Resultados para as armaduras longitudinais das lajes internas:

Tabela 26: Área de aço – Laje L1

Laje	CAA	M_d (kN.cm/m)	c (cm)	d' (cm)	d (cm)	A_s (cm ² /m)	
L1	I	M_x	2065	2,0	3,5	12,5	3,98
		M_x'	4428				9,10
		M_y	846				2,40
		M_y'	3194				6,34
	II	M_x	2065	2,5	4,0	12,0	4,17
		M_x'	4428				9,58
		M_y	846				2,40
		M_y'	3194				6,65
	III	M_x	2065	3,5	5,0	11,0	4,48
		M_x'	4428				10,09
		M_y	846				2,86
		M_y'	3194				7,09
	IV	M_x	2065	4,5	6,0	10,0	4,97
		M_x'	4428				11,33
		M_y	846				2,86
		M_y'	3194				7,90

Fonte: O autor

Tabela 27: Área de aço – Laje L2

Laje	CAA	M_d (kN.cm/m)	c (cm)	d' (cm)	d (cm)	A_s (cm ² /m)	
L2	I	M_x	1497	2,0	3,5	10,5	3,44
		M_y	1344				3,07
		M_y'	3279				8,07
	II	M_x	1497	2,5	4,0	10,0	3,63
		M_y	1344				3,24
		M_y'	3279				8,60
	III	M_x	1497	3,5	5,0	9,0	3,98
		M_y	1344				3,56
		M_y'	3279				9,23
	IV	M_x	1497	4,5	6,0	8,0	4,53
		M_y	1344				4,05
		M_y'	3279				10,71

Fonte: O autor

Tabela 28: Área de aço – Laje L3

Laje	CAA	$M_d(kN.cm/m)$	$c(cm)$	$d'(cm)$	$d(cm)$	$A_s(cm^2/m)$	
L3	I	M_x	432	2,0	3,5	10,5	2,10
		M_x'	896				2,10
		M_y	143				2,10
		M_y'	606				2,10
	II	M_x	432	2,5	4,0	10,0	2,10
		M_x'	896				2,13
		M_y	143				2,10
		M_y'	606				2,10
	III	M_x	432	3,5	5,0	9,0	2,51
		M_x'	896				2,51
		M_y	143				2,51
		M_y'	606				2,51
	IV	M_x	432	4,5	6,0	8,0	2,51
		M_x'	896				2,66
		M_y	143				2,51
		M_y'	606				2,51

Fonte: O autor

Tabela 29: Área de aço – Laje L4

Laje	CAA	$M_d(kN.cm/m)$	$c(cm)$	$d'(cm)$	$d(cm)$	$A_s(cm^2/m)$	
L4	I	M_x	1305	2,0	3,5	10,5	2,98
		M_x'	2730				6,57
		M_y	476				2,10
		M_y'	1898				4,43
	II	M_x	1305	2,5	4,0	10,0	3,14
		M_x'	2730				6,98
		M_y	476				2,10
		M_y'	1898				4,68
	III	M_x	1305	3,5	5,0	9,0	3,45
		M_x'	2730				7,54
		M_y	476				2,51
		M_y'	1898				5,11
	IV	M_x	1305	4,5	6,0	8,0	3,92
		M_x'	2730				8,69
		M_y	476				2,51
		M_y'	1898				5,84

Fonte: O autor

Tabela 30: Área de aço – Laje L5

Laje	CAA	M_d (kN.cm/m)	c (cm)	d' (cm)	d (cm)	A_s (cm ² /m)	
L5	I	M_x	1192	2,0	3,5	10,5	2,71
		M_x'	2494				5,95
		M_y	435				2,10
		M_y'	1734				4,02
	II	M_x	1192	2,5	4,0	10,0	2,86
		M_x'	2494				6,31
		M_y	435				2,10
		M_y'	1734				4,25
	III	M_x	1192	3,5	5,0	9,0	3,14
		M_x'	2494				6,84
		M_y	435				2,51
		M_y'	1734				4,65
	IV	M_x	1192	4,5	6,0	8,0	3,57
		M_x'	2494				7,86
		M_y	435				2,51
		M_y'	1734				5,30

Fonte: O autor

Tabela 31: Área de aço – Laje L6

Laje	CAA	M_d (kN.cm/m)	c (cm)	d' (cm)	d (cm)	A_s (cm ² /m)	
L6	I	M_x	2022	2,0	3,5	15,5	3,89
		M_x'	4554				9,39
		M_y	1307				2,48
		M_y'	3796				7,66
	II	M_x	2022	2,5	4,0	15,0	4,07
		M_x'	4554				9,9
		M_y	1307				2,59
		M_y'	3796				8,05
	III	M_x	2022	3,5	5,0	14,0	4,38
		M_x'	4554				10,4
		M_y	1307				2,86
		M_y'	3796				8,53
	IV	M_x	2022	4,5	6,0	13,0	4,86
		M_x'	4554				11,7
		M_y	1307				3,09
		M_y'	3796				9,55

Fonte: O autor

Resultados para as armaduras longitudinais das lajes em balanço:

- Resultados para as armaduras longitudinais da laje em balanço L7 (engastada):

Tabela 32: Área de aço – Laje L7 (engastada)

Laje	CAA	$M_d(kN.cm/m)$	$c(cm)$	$d'(cm)$	$d(cm)$	$A_s(cm^2/m)$
L7 (engastada)	I	4530	2,0	3,5	14,5	7,78
	II	4530	2,5	4,0	14,0	8,12
	III	4530	3,5	5,0	13,0	8,51
	IV	4530	4,5	6,0	12,0	9,33

Fonte: O autor

- Resultados para as armaduras longitudinais das lajes sobre 3 apoios L7 e L8:

Tabela 33: Área de aço – Laje L7 (3 apoios)

Laje	CAA	$M_d(kN.cm/m)$	$c(cm)$	$d'(cm)$	$d(cm)$	$A_s(cm^2/m)$	
L7 (3 apoios)	I	M_x	480	2,0	3,5	12,5	1,61
		M_x'	3195				6,34
		M_y	114				1,61
		M_y'	585				1,61
		M_{yb}	571				1,61
	II	M_x	480	2,5	4,0	12,0	1,61
		M_x'	3195				6,65
		M_y	114				1,61
		M_y'	585				1,61
		M_{yb}	571				1,61
	III	M_x	480	3,5	5,0	11,0	1,92
		M_x'	3195				7,09
		M_y	114				1,92
		M_y'	585				1,92
		M_{yb}	571				1,92
	IV	M_x	480	4,5	6,0	10,0	1,92
		M_x'	3195				7,91
		M_y	114				1,92
		M_y'	585				1,92
		M_{yb}	571				1,92

Fonte: O autor

Tabela 34: Área de aço – Laje L8 (3 apoios)

Laje	CAA	$M_d(kN.cm/m)$	$c (cm)$	$d'(cm)$	$d (cm)$	$A_s (cm^2/m)$	
L8 (3 apoios)	I	M_x	981	2,0	3,5	12,5	1,84
		M_x'	3924				7,94
		M_y	114				1,61
		M_{yb}	585				1,61
		M_y'	571				1,61
	II	M_x	981	2,5	4,0	12,0	1,92
		M_x'	3924				8,35
		M_y	114				1,61
		M_{yb}	585				1,61
		M_y'	571				1,61
	III	M_x	981	3,5	5,0	11,0	2,09
		M_x'	3924				8,84
		M_y	114				1,92
		M_y'	585				1,92
		M_{yb}	571				1,92
	IV	M_x	981	4,5	6,0	10,0	2,3
		M_x'	3924				9,9
		M_y	114				1,92
		M_y'	585				1,92
		M_{yb}	571				1,92

Fonte: O autor

6.3 Resultados pra verificação das flechas

6.3.1 Resultados para a verificação das flechas elásticas

Para a verificação das flechas elásticas nas lajes, os limites para os deslocamentos foram definidos considerando o efeito da aceitabilidade sensorial. Para a totalidade das cargas (g+ q) o deslocamento limite foi de $l/250$, e para cargas acidentais (q) o deslocamento limite foi de $l/350$, conforme tabela 10 deste trabalho.

Resultados para a verificação das Flechas elásticas nas lajes internas:

Tabela 35: Verificação flecha elástica Laje L1

Laje	CAA	Tipo	l_x	λ	α	Flecha (q)	Flecha Limite $l_x/350 (q)$	Verificação	Flecha (g+q)	Flecha Limite (g+q)	Verificação $l_x/250$
L1	I	caso 4	6,0	1,67	4,88	0,13	1,7	Ok	0,50	2,4	Ok
	II					0,13		Ok	0,50		Ok
	III					0,10		Ok	0,38		Ok
	IV					0,10		Ok	0,38		Ok

Fonte: O autor

Tabela 36: Verificação flecha elástica Laje L2

Laje	CAA	Tipo	l_x	λ	α	Flecha (q)	Flecha Limite (q)	Verificação	Flecha (g+q)	Flecha Limite (g+q)	Verificação
L2	I	caso 2	6,0	1,17	4,91	0,19	1,7	Ok	0,63	2,4	Ok
	II					0,19			0,63		
	III					0,15			0,48		
	IV					0,15			0,48		

Fonte: O autor

Tabela 37: Verificação flecha elástica Laje L3

Laje	CAA	Tipo	l_x	λ	α	Flecha (q)	Flecha Limite (q)	Verificação	Flecha (g+q)	Flecha Limite (g+q)	Verificação
L3	I	caso 8	3,0	1,67	2,79	0,01	0,9	Ok	0,03	1,2	Ok
	II					0,01			0,03		
	III					0,01			0,02		
	IV					0,01			0,02		

Fonte: O autor

Tabela 38: Verificação flecha elástica Laje L4

Laje	CAA	Tipo	l_x	λ	α	Flecha (q)	Flecha Limite (q)	Verificação	Flecha (g+q)	Flecha Limite (g+q)	Verificação
L4	I	caso 8	5,0	1,6	2,87	0,05	1,4	Ok	0,26	2,0	Ok
	II					0,05			0,26		
	III					0,04			0,20		
	IV					0,04			0,20		

Fonte: O autor

Tabela 39: Verificação flecha elástica Laje L5

Laje	CAA	Tipo	l_x	λ	α	Flecha (q)	Flecha Limite (q)	Verificação	Flecha (g+q)	Flecha Limite (g+q)	Verificação
L5	I	caso 8	5,0	1,6	2,87	0,05	1,4	Ok	0,24	2,0	Ok
	II					0,05			0,24		
	III					0,04			0,18		
	IV					0,04			0,18		

Fonte: O autor

Tabela 40: Verificação flecha elástica Laje L6

Laje	CAA	Tipo	l_x	λ	α	Flecha (q)	Flecha Limite (q)	Verificação	Flecha (g+q)	Flecha Limite (g+q)	Verificação
L6	I	caso 4	7,0	1,29	3,73	0,18	2,0	Ok	0,64	2,8	Ok
	II					0,18			0,64		
	III					0,14			0,49		
	IV					0,14			0,49		

Fonte: O autor

Resultados para a verificação das Flechas elásticas nas lajes em balanço:

- Resultados para a verificação das Flechas elásticas na Laje L7 engastada

Tabela 41: Verificação flecha elástica Laje L7 (engastada)

Laje	CAA	l_x	Flecha (q)	Flecha Limite (q)	Verificação	Flecha (g+q)	Flecha Limite (g+q)	Verificação
L7	I	2,5	0,20	1,4	Ok	0,43	1,0	Ok
	II		0,20		Ok	0,43		Ok
	III		0,15		Ok	0,32		Ok
	IV		0,15		Ok	0,32		Ok

Fonte: O autor

Para a laje L7 engastada, armada em uma direção, as flechas foram calculadas com o auxílio da equação a seguir supondo a laje como sendo uma viga (Ver tabela 05 disponibilizada no anexo B).

$$a_{elástica} = \frac{W \cdot lx^4}{8 \cdot E_{cs} \cdot I_c} + \frac{P \cdot lx^3}{3 \cdot E_{cs} \cdot I_c} + \frac{M \cdot lx^2}{2 \cdot E_{cs} \cdot I_c} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Onde:

W = carregamento distribuído (peso próprio + revestimento + sobrecarga)

P = Carga vertical de 2,0 kN/m aplicada no parapeito

E_{cs} = Módulo de elasticidade secante utilizado nas verificações em serviço

l_x = menor dimensão da laje

I_c = inércia bruta da seção; seção retangular; $I_c = \frac{b \cdot h^3}{12}$

- Resultados para a verificação das flechas elásticas nas lajes sobre 3 apoios L7 e L8

As tabelas a seguir mostram os resultados obtidos para as flechas no centro e na extremidade das lajes L7 e L8. As flechas foram calculadas com o auxílio do coeficiente αa e αb encontrados na tabela 04 disponibilizados no anexo B

Tabela 42: Verificação flecha elástica Laje L7 (3 apoios)

Laje	Tipo	CAA	l_a	Y	αa	αb	Flecha αa cm (q)	Flecha αb cm (q)	Flecha Limite	Verificação (q)	Flecha αa cm (g+q)	Flecha αb cm (g+q)	Flecha Limite	Verificação (g+q)
L7	?	I	2,50	0,31	39,81	103,51	0,03	0,08	0,71	Ok	0,12	0,32	1,0	Ok
		II					0,03	0,08		Ok	0,12	0,32		Ok
		III					0,02	0,06		Ok	0,09	0,24		Ok
		IV					0,02	0,06		Ok	0,09	0,24		Ok

Fonte: O autor

Tabela 43: Verificação flecha elástica Laje L8 (3 apoios)

Laje	Tipo	CAA	l_a	Y	a_a	a_b	Flecha a_a cm (q)	Flecha a_b cm (q)	Flecha Limite	Verificação (q)	Flecha a_a cm (g+q)	Flecha a_b cm (g+q)	Flecha Limite	Verificação (g+q)
L8	?	I	2,50	0,28	53	150	0,04	0,12	0,71	Ok	0,16	0,46	1,0	Ok
		II					0,04	0,12		Ok	0,16	0,46		Ok
		III					0,03	0,09		Ok	0,12	0,35		Ok
		IV					0,03	0,09		Ok	0,12	0,35		Ok

Fonte: O autor

Dos resultados obtidos para as flechas nas lajes sobre 3 apoios L7 e L8, constatou-se que a flecha crítica é a que atua na extremidade (borda livre).

6.3.2 Resultados para a verificação da flecha total no tempo infinito

Para verificação das flechas no tempo infinito, os limites foram definidos para o efeito da aceitabilidade sensorial.

Resultados para a verificação da flecha total no tempo infinito nas lajes internas:

Tabela 44: Verificação flecha total, ∞ Laje L1

Laje	CAA	P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	I_m cm ⁴	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L1	I	6,58	2675	1641,6	Est.II	14211	1,01	2,49	-1,7	0,78	Ok
	II			1641,6	Est.II	13863	1,04	2,55	-1,7	0,84	Ok
	III			2245,7	Est.II	22585	0,48	1,19	0,0	1,19	Ok
	IV			2245,7	Est.II	22199	0,49	1,21	0,0	1,21	Ok

Fonte: O autor

Tabela 45: Verificação flecha total, ∞ Laje L2

Laje	CAA	P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	I_m cm ⁴	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L2	I	5,39	1915	1257	Est.II	10134	1,17	2,88	-1,7	1,17	Ok
	II			1257	Est.II	9887	1,20	2,95	-1,7	1,24	Ok
	III			1719	Est.II	17533	0,51	1,26	0,0	1,26	Ok
	IV			1719	Est.II	17312	0,51	1,28	0,0	1,28	Ok

Fonte: O autor

Tabela 46: Verificação flecha total, ∞ Laje L3

Laje CAA		P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L3	I	7,42	551	1257	Est.I	0,03	0,06	0,0	0,06	Ok
	II			1257	Est.I	0,03	0,06	0,0	0,06	Ok
	III			1719	Est.I	0,02	0,05	0,0	0,05	Ok
	IV			1719	Est.I	0,02	0,05	0,0	0,05	Ok

Fonte: O autor

Tabela 47: Verificação flecha total, ∞ Laje L4

Laje CAA		P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	I_m cm ⁴	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L4	I	8,38	1706	1257	Est.II	11853	0,44	1,08	0,0	1,08	Ok
	II			1257	Est.II	11656	0,45	1,10	0,0	1,10	Ok
	III			1719	Est.I	-	0,17	0,42	0,0	0,42	Ok
	IV			1719	Est.I	-	0,17	0,42	0,0	0,42	Ok

Fonte: O autor

Tabela 48: Verificação flecha total, ∞ Laje L5

Laje CAA		P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	I_m cm ⁴	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L5	I	7,55	1537	1257	Est.II	14515	0,32	0,80	0,0	0,80	Ok
	II			1257	Est.II	14348	0,33	0,80	0,0	0,80	Ok
	III			1719	Est.I	-	0,15	0,38	0,0	0,38	Ok
	IV			1719	Est.I	-	0,15	0,38	0,0	0,38	Ok

Fonte: O autor

Tabela 49: Verificação flecha total, ∞ Laje L6

Laje CAA		P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	I_m cm ⁴	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L6	I	5,89	2702	1642	Est.II	14181	1,28	3,17	-2,0	1,17	Ok
	II			1642	Est.II	13823	1,32	3,25	-2,0	1,25	Ok
	III			2246	Est.II	22126	0,62	1,54	0,0	1,54	Ok
	IV			2246	Est.II	21723	0,63	1,57	0,0	1,57	Ok

Fonte: O autor

Resultados para a verificação da flecha total no tempo infinito nas lajes em balanço:

- Resultados para a verificação da flecha total no tempo infinito na laje L7 (engastada)

Tabela 50: Verificação flecha total, ∞ Laje L7 (engastada)

Laje CAA	P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	I_m cm ⁴	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L7	6,30	2706,5	2078	Est.II	28023	0,66	1,62	-0,71	0,91	Ok
			2078	Est.II	27689	0,66	1,64	-0,71	0,93	Ok
			2842	Est.I	-	0,29	0,71	0,00	0,71	Ok
			2842	Est.I	-	0,29	0,71	0,00	0,71	Ok

Fonte: O autor

- Resultados para a verificação da flecha total no tempo infinito nas lajes sobre 3 apoios L7 e L8

Tabela 51: Verificação flecha total, ∞ Laje L7 (3 apoios)

Laje CAA	P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	I_m cm ⁴	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L7	6,60	1679	1642	Est.II	33167	0,28	0,69	0,00	0,69	Ok
			1642	Est.II	32994	0,28	0,69	0,00	0,69	Ok
			2246	Est.I	-	0,20	0,50	0,00	0,50	Ok
			2246	Est.I	-	0,20	0,50	0,00	0,50	Ok

Fonte: O autor

Tabela 52: Verificação flecha total, ∞ Laje L8 (3 apoios)

Laje CAA	P kN/m ²	M_{at} kN.cm/m	M_r kN.cm/m	Verificação Estádio	I_m cm ⁴	a_i cm	$a_{t,\infty}$ cm	a_{cf} cm	$a_{t,\infty}$ cm	Verificação l/250
L8	6,60	2062,5	1642	Est.II	21294	0,63	1,55	-0,71	0,83	Ok
			1642	Est.II	21020	0,63	1,57	-0,71	0,85	Ok
			2246	Est.I	-	0,30	0,73	0,00	0,73	Ok
			2246	Est.I	-	0,30	0,73	0,00	0,73	Ok

Fonte: O autor

6.4 Resultados para os quantitativos de materiais e indicadores de consumo

Nas tabelas a seguir são mostrados os resultados obtidos para o quantitativo de materiais (aço e concreto) e indicadores de consumo das lajes do pavimento para ambas as concepções estruturais.

Entende-se por concepção estrutural I, aquela referente à planta de forma da figura 07 (com laje em balanço L7 engastada).

Entende-se por concepção estrutural II, aquela referente à planta de forma da figura 08 (com lajes em balanço L7 e L8 sobre 3 apoios).

Considerando que em ambas as concepções estruturais, as quantidades e indicadores de consumo para fôrmas são os mesmos, para efeitos de comparação, não houve necessidade de se estimar tais quantidades e indicadores.

- Quantitativos de materiais e indicadores de consumo para **CAA I**

Tabela 53: Consumo e indicadores de consumo – Concepção estrutural I - CAA I

Consumo e indicadores para as lajes do pavimento - concepção estrutural I				
Concreto	Indicador Consumo	Aço	Taxas de armadura	
m ³ de concreto	m ³ de concreto/m ² de laje	Kg	Kg de aço/m ² de laje	Kg de aço/m ³ de concreto
46,51	0,15	3005,73	9,94	64,63

Fonte: O autor

Tabela 54: Consumo e indicadores de consumo – Concepção estrutural II -CAA I

Consumo e indicadores para as lajes do pavimento - concepção estrutural II				
Concreto	Indicador Consumo	Aço	Taxas de armadura	
m ³ de concreto	m ³ de concreto/m ² de laje	Kg	Kg de aço/m ² de laje	Kg de aço/m ³ de concreto
46	0,15	3078,41	10,09	66,83

Fonte: O autor

- Quantitativos de materiais e indicadores de consumo para **CAA II**

Tabela 55: Consumo e indicadores de consumo – Concepção estrutural I -CAA II

Consumo e indicadores para as lajes do pavimento - concepção estrutural I				
Concreto	Indicador Consumo	Aço	Taxas de armadura	
m ³ de concreto	m ³ de concreto/m ² de laje	Kg	Kg de aço/m ² de laje	Kg de aço/m ³ de concreto
46,51	0,15	3139	10,38	67,50

Fonte: O autor

Tabela 56: Consumo e indicadores de consumo – Concepção estrutural II - CAA II

Consumo e indicadores para as lajes do pavimento - concepção estrutural II				
Concreto	Indicador Consumo	Aço	Taxas de armadura	
m ³ de concreto	m ³ de concreto/m ² de laje	Kg	Kg de aço/m ² de laje	Kg de aço/m ³ de concreto
46	0,15	3189,39	10,46	69,24

Fonte: O autor

- Quantitativos de materiais e indicadores de consumo para **CAA III**

Tabela 57: Consumo e indicadores de consumo– Concepção estrutural I -CAA III

Consumo e indicadores para as lajes do pavimento - concepção estrutural I				
Concreto	Indicador Consumo	Aço	Taxas de armadura	
m ³ de concreto	m ³ de concreto/m ² de laje	Kg	Kg de aço/m ² de laje	Kg de aço/m ³ de concreto
46,51	0,15	3458	11,43	74,34

Fonte: O autor

Tabela 58: Consumo e indicadores de consumo – Concepção estrutural II-CAA III

Consumo e indicadores para as lajes do pavimento - concepção estrutural II				
Concreto	Indicador Consumo	Aço	Taxas de armadura	
m ³ de concreto	m ³ de concreto/m ² de laje	Kg	Kg de aço/m ² de laje	Kg de aço/m ³ de concreto
46	0,15	3392	11,12	73,65

Fonte: O autor

- Quantitativos de materiais e indicadores de consumo para CAA IV

Tabela 59: Consumo e indicadores de consumo– Concepção estrutural I - CAA IV

Consumo e indicadores para as lajes do pavimento - concepção estrutural I				
Concreto	Indicador Consumo	Aço	Taxas de armadura	
m ³ de concreto	m ³ de concreto/m ² de laje	Kg	Kg de aço/m ² de laje	Kg de aço/m ³ de concreto
46,51	0,15	3822	12,63	82,18

Fonte: O autor

Tabela 60: Consumo e indicadores de consumo– Concepção estrutural II -CAA IV

Consumo e indicadores para as lajes do pavimento - concepção estrutural II				
Concreto	Indicador Consumo	Aço	Taxas de armadura	
m ³ de concreto	m ³ de concreto/m ² de laje	Kg	Kg de aço/m ² de laje	Kg de aço/m ³ de concreto
46	0,15	3712	12,17	80,60

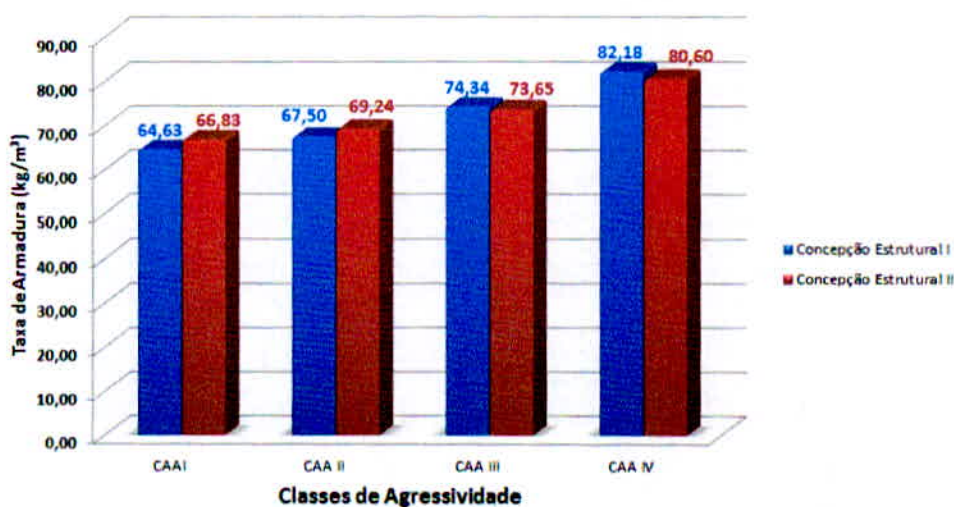
Fonte: O autor

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 Análises dos resultados obtidos para o quantitativo de materiais e indicadores de consumo.

Com base nos resultados apresentados para as quantidades e indicadores de consumo nas lajes do pavimento, observou-se um aumento significativo nas taxas de armaduras para ambientes mais agressivos conforme pode ser visto no gráfico abaixo.

Gráfico 1: Indicadores de Consumo de Aço para as Classes de Agressividade Ambiental
Indicadores de Consumo de Aço



Fonte: O autor

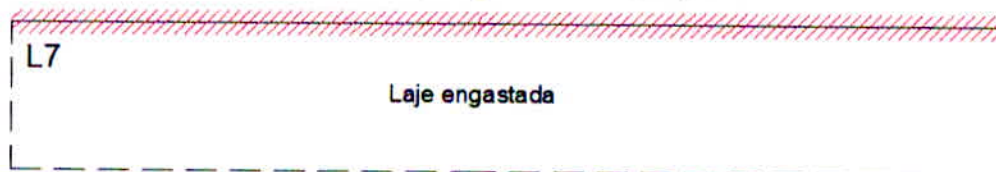
7.2 Análises dos resultados obtidos para a laje em balanço

7.2.1 Análise da concepção estrutural para a laje em balanço

Neste tópico, será realizada a análise dos resultados obtidos para a laje em balanço do pavimento exposto neste trabalho. Tal análise contempla duas situações hipotéticas de projeto que podem ser visualizadas abaixo:

Concepção estrutural I

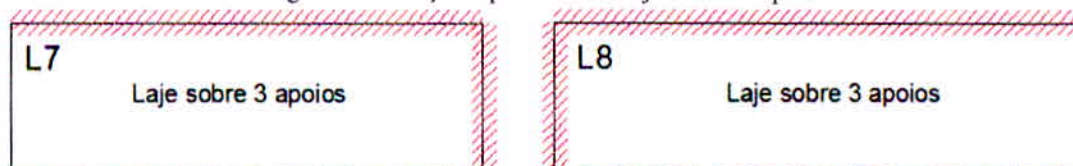
Figura 19: situação hipotética 1 – Laje engastada



Fonte: O autor

Concepção estrutural II

Figura 20: situação hipotética 2 – Lajes sobre 3 apoios



Fonte: O autor

Com base nos históricos de verificação para ELU e ELS de ambas as situações analisadas, foram arbitradas as espessuras das lajes em balanço para cada uma das situações. Na tabela a seguir são fornecidos os valores para as espessuras mínimas necessárias que devem ser adotadas em cada uma das concepções de projeto de forma a atender as verificações no ELU e ELS.

Tabela 61: Histórico de verificações ELU/ELS para as lajes em balanço

Verificações	Concepção Estrutural I	Concepção Estrutural II
ELU / ELS	L7 (engastada)	L7 (3 apoios)/L8 (3 apoios)
	Espessura mínima (cm)	Espessura mínima (cm)
Flecha elástica $a_{elástica}$	13	12
Posição da L.N (Kx)	15	14
Flecha total a_{∞}	18	16

Fonte: O autor

De acordo com os dados fornecidos na tabela 61, pode-se constatar que para a concepção de projeto I, houve a necessidade de se arbitrar uma espessura final de laje em balanço consideravelmente maior (18 cm), para que a mesma pudesse atender a todas as verificações no ELU e ELS mostradas na tabela 61. Já para a concepção de projeto II, estas mesmas verificações puderam ser atendidas arbitrando-se uma espessura final de laje consideravelmente menor (16 cm).

7.2.2 Análise dos ponderadores adicionais nas lajes em balanço

Este tópico do trabalho tem por objetivo analisar a influência dos ponderadores adicionais γ_n no dimensionamento das lajes em balanço do pavimento em estudo.

Considerando que o coeficiente γ_n se aplica somente nos casos de lajes em balanço com espessuras inferiores a 19 cm, e que a espessura mínima admissível para uma laje em balanço é de 10 cm, a análise a cerca dos ponderadores adicionais, utilizados na majoração dos esforços solicitantes de cálculo, admite lajes em balanço com espessuras variando de 10 cm a 19 cm.

Nas tabelas a seguir, são mostrados os resultados obtidos para os momentos fletores solicitantes de cálculo nas lajes em balanço, com e sem a utilização do γ_n .

Concepção estrutural I

Tabela 62: Influência dos ponderadores adicionais na majoração dos esforços da laje L7(engastada)

Localização	h adotada(cm)	Ma (kN.cm/m)	Sem γ_n		Com γ_n		
			γ_f	Md (kN.cm/m)	γ_f	γ_n	Md (kN.cm/m)
L7	10	2457	1,4	3439	1,4	1,45	4987
	11	2535	1,4	3548	1,4	1,40	4968
	12	2613	1,4	3658	1,4	1,35	4938
	13	2691	1,4	3767	1,4	1,30	4897
	14	2769	1,4	3877	1,4	1,25	4846
	15	2847	1,4	3986	1,4	1,20	4783
	16	2925	1,4	4095	1,4	1,15	4710
	17	3003	1,4	4205	1,4	1,10	4625
	18	3082	1,4	4314	1,4	1,05	4530
	19	3160	1,4	4423	1,4	1,00	4423

Fonte: O autor

Concepção estrutural II

Tabela 63: Influência dos ponderadores adicionais na majoração dos esforços da laje L7(3 apoios)

Localização	h adotada(cm)	Ma (kN.cm/m)	Sem Y_n		Com Y_n			
			y \bar{f}	Md (kN.cm/m)	y \bar{f}	y \bar{h}	Md (kN.cm/m)	
L.7 (3 apoios)	10	Mx	241		337			488
		Mx'	1603		2244			3254
		My	57	1,4	80	1,4	1,45	116
		Myb	293		411			595
		My'	287		401			582
	11	Mx	250		350			490
		Mx'	1667		2333			3266
		My	59	1,4	83	1,4	1,40	116
		Myb	305		427			598
		My'	298		417			584
	12	Mx	260		364			491
		Mx'	1730		2422			3270
		My	62	1,4	86	1,4	1,35	116
		Myb	317		443			598
		My'	309		433			585
	13	Mx	269		377			490
		Mx'	1794		2511			3265
		My	64	1,4	89	1,4	1,30	116
		Myb	328		460			597
My'		321		449			584	
14	Mx	279		390			488	
	Mx'	1857		2600			3250	
	My	66	1,4	93	1,4	1,25	116	
	Myb	340		476			595	
	My'	332		465			581	
15	Mx	288		404			484	
	Mx'	1921		2689			3227	
	My	68	1,4	96	1,4	1,20	115	
	Myb	352		492			591	
	My'	344		481			577	
16	Mx	298		417			480	
	Mx'	1985		2778			3195	
	My	71	1,4	99	1,4	1,15	114	
	Myb	363		508			585	
	My'	355		497			571	
17	Mx	307		430			473	
	Mx'	2048		2868			3154	
	My	73	1,4	102	1,4	1,10	112	
	Myb	375		525			577	
	My'	366		513			564	
18	Mx	317		444			466	
	Mx'	2112		2957			3104	
	My	75	1,4	105	1,4	1,05	111	
	Myb	386		541			568	
	My'	378		529			555	
19	Mx	327		457			457	
	Mx'	2175		3046			3046	
	My	77	1,4	108	1,4	1,00	108	
	Myb	398		557			557	
	My'	389		545			545	

Tabela 64: Influência dos ponderadores adicionais na majoração dos esforços da laje L8(3 apoios)

Localização	h adotada(cm)	Mu (kN.cm/m)	Sem Y_n		Com Y_n			
			γ_f	Md (kN.cm/m)	γ_f	γ_h	Md (kN.cm/m)	
L8 (3 apoios)	10	Mx	492	1,4	689	1,4	1,45	999
		Mx'	1969		2756			3997
		My	57		80			116
		Myb	293		411			595
		My'	287		401			582
	11	Mx	512	1,4	716	1,4	1,40	1003
		Mx'	2047		2866			4012
		My	59		83			116
		Myb	305		427			598
		My'	298		417			584
	12	Mx	531	1,4	744	1,4	1,35	1004
		Mx'	2125		2975			4016
		My	62		86			116
		Myb	317		443			598
		My'	309		433			585
	13	Mx	551	1,4	771	1,4	1,30	1002
		Mx'	2203		3084			4010
		My	64		89			116
		Myb	328		460			597
My'		321	449		584			
14	Mx	570	1,4	798	1,4	1,25	998	
	Mx'	2281		3194			3992	
	My	66		93			116	
	Myb	340		476			595	
	My'	332		465			581	
15	Mx	590	1,4	826	1,4	1,20	991	
	Mx'	2359		3303			3964	
	My	68		96			115	
	Myb	352		492			591	
	My'	344		481			577	
16	Mx	609	1,4	853	1,4	1,15	981	
	Mx'	2438		3413			3924	
	My	71		99			114	
	Myb	363		508			585	
	My'	355		497			571	
17	Mx	629	1,4	880	1,4	1,10	969	
	Mx'	2516		3522			3874	
	My	73		102			112	
	Myb	375		525			577	
	My'	366		513			564	
18	Mx	648	1,4	908	1,4	1,05	953	
	Mx'	2594		3631			3813	
	My	75		105			111	
	Myb	386		541			568	
	My'	378		529			555	
19	Mx	668	1,4	935	1,4	1,00	935	
	Mx'	2672		3741			3741	
	My	77		108			108	
	Myb	398		557			557	
	My'	389		545			545	

Fonte: O autor

Com base nos resultados apresentados nas tabelas acima, pode-se constatar:

- Lajes com espessuras menores exigem a adoção de coeficientes ponderadores adicionais γ_n maiores, de acordo com as disposições da NBR 6118:2014. Por exemplo, como pode ser visto nas tabelas acima, para uma laje com espessura de 10 cm, o coeficiente $\gamma_n = 1,45$ enquanto que para uma laje com espessura de 19 cm o coeficiente $\gamma_n = 1,00$.
- Os momentos fletores solicitantes de cálculo, **quando majorados pelo coeficiente γ_n** , em geral, se apresentam maiores para lajes em balanço com espessuras menores, conforme pode ser observado nas tabelas acima.

Influência dos ponderadores adicionais na verificação dos ELU e ELS para as lajes em balanço (Concepção estrutural I e II):

Com o propósito de se analisar a influência dos ponderadores adicionais na determinação das espessuras mínimas das lajes em balanço (atendendo-se às verificações do ELU e ELS), o dimensionamento ocorreu de duas maneiras distintas: ora considerando a utilização do ponderador adicional, ora desprezando tal consideração.

Na tabela a seguir são fornecidos os valores mínimos obtidos para espessuras das lajes em balanço, quando dimensionadas com γ_n e sem γ_n .

Tabela 65: Influência dos ponderadores adicionais no histórico de verificações ELU/ELS para as lajes em balanço

Verificações	Com a utilização de ponderadores adicionais γ_n		Sem a utilização de ponderadores adicionais γ_n	
	Concepção Estrutural I	Concepção Estrutural II	Concepção Estrutural I	Concepção Estrutural II
ELU / ELS	L7 (engastada)	L7 (3 apoios)/L8 (3 apoios)	L7 (engastada)	L7 (3 apoios)/L8 (3 apoios)
	Espessura mínima (cm)	Espessura mínima (cm)	Espessura mínima (cm)	Espessura mínima (cm)
Flecha elástica $a_{elástica}$	13	12	13	12
Posição da L.N (Kx)	15	14	14	13
Flecha total a_{∞}	18	16	18	16

Fonte: O autor

Com base nos resultados apresentados na tabela acima se pode constatar:

- A utilização do coeficiente γ_n no dimensionamento das lajes em balanço influenciou apenas nas espessuras mínimas arbitradas para o atendimento das verificações no ELU (Verificação do K_x).
- A utilização do coeficiente γ_n no dimensionamento das lajes em balanço não teve influência nas espessuras mínimas arbitradas para o atendimento das verificações no ELS (Verificação das flechas).

CONCLUSÕES

Com base nas disposições normativas apresentadas neste trabalho, e os resultados que foram obtidos para o dimensionamento das lajes nas diferentes classes de agressividade ambiental, pode-se ter um série de conclusões sobre os fatores que condicionaram aos resultados obtidos:

1) Em relação aos resultados para os **quantitativos de materiais e indicadores de consumo** nas lajes do pavimento, pode-se comprovar que em ambientes agressivos (ambientes marinhos e industriais) os quantitativos e taxas de armadura tendem a ser mais elevados quando comparados aos ambientes de classe I e II (ambientes rurais e urbanos), conforme pode ser observado no gráfico 1 (página 124) deste trabalho.

Em se tratando de ambientes marinhos e industriais (CAA III e IV), a norma de estruturas de concreto NBR 6118:2014 é mais rigorosa quanto aos parâmetros de qualidade do concreto (resistências mínimas características) e cobrimentos nominais. Para ambientes mais agressivos, a norma exige a adoção de concretos mais resistentes e cobrimentos nominais maiores para as lajes.

No dimensionamento das lajes do pavimento para as CAA III e IV, a adoção de cobrimentos maiores resultou em alturas úteis menores, e conseqüentemente em maiores taxas de armaduras.

2) Em se tratando especificamente das **lajes em balanço**, os resultados obtidos para as mesmas demonstraram a importância dos ponderadores adicionais na majoração dos esforços solicitantes finais de cálculo e a influência dos mesmos na determinação das espessuras finais de lajes necessárias as verificações no ELU/ELS.

3) Com base nos resultados obtidos para as espessuras finais das lajes em balanço em cada uma das **concepções de projeto** analisadas pode-se chegar a seguinte conclusão:

- Conceção de Projeto I (lajes engastadas em uma das extremidades e livre nas demais): se mostrou inviável sobre o ponto de vista econômico, tendo em vista a necessidade de se arbitrar espessuras de lajes consideravelmente maiores (18 cm) para o atendimento das verificações no ELU/ELS.
- Conceção de Projeto II (lajes apoiadas sobre vigas): se mostrou ideal sob o ponto de vista econômico, tendo em vista a possibilidade de se arbitrar espessuras de lajes consideravelmente menores (16 cm) para o atendimento das verificações no ELU/ELS.

As conclusões obtidas em cada uma das concepções de projeto são válidas para lajes que apresentam balanços significativos (balanços superiores a 2 metros), como é o caso das lajes analisadas neste trabalho.

ANEXO A – Tabelas utilizadas no cálculo dos momentos fletores

Tabela 01: valores de μ para cálculo dos momentos máximos

μ para cálculo dos momentos máximos - Lajes armadas em duas direções												
λ	Caso 01		Caso 02			Caso 03			Caso 04			
	μ_x	μ_y	μ_x	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	$\mu_{y'}$
1,00	4,41	4,41	3,07	3,94	8,52	3,94	8,52	3,07	2,81	6,99	2,81	6,99
1,05	4,80	4,45	3,42	3,78	8,79	4,19	8,91	2,84	3,05	7,43	2,81	7,18
1,10	5,18	4,49	3,77	3,90	9,18	4,43	9,30	2,76	3,30	7,87	2,81	7,36
1,15	5,56	4,49	4,14	3,97	9,53	4,64	9,63	2,68	3,53	8,28	2,80	7,50
1,20	5,90	4,48	4,51	4,05	9,88	4,85	9,95	2,59	3,76	8,69	2,79	7,63
1,25	6,27	4,45	4,88	4,10	10,16	5,03	10,22	2,51	3,96	9,03	2,74	7,72
1,30	6,60	4,42	5,25	4,15	10,41	5,20	10,48	2,42	4,16	9,37	2,69	7,81
1,35	6,93	4,37	5,60	4,18	10,64	5,36	10,71	2,34	4,33	9,65	2,65	7,88
1,40	7,25	4,33	5,95	4,21	10,86	5,51	10,92	2,25	4,51	9,93	2,60	7,94
1,45	7,55	4,30	6,27	4,19	11,05	5,64	11,10	2,19	4,66	10,41	2,54	8,00
1,50	7,86	4,25	6,60	4,18	11,23	5,77	11,27	2,12	4,81	10,62	2,47	8,06
1,55	8,12	4,20	6,90	4,17	11,39	5,87	11,42	2,04	4,93	10,82	2,39	8,09
1,60	8,34	3,14	7,21	4,14	11,55	5,98	11,55	1,95	5,06	10,99	2,31	8,12
1,65	8,62	4,07	7,42	4,12	11,67	6,07	11,67	1,87	5,16	11,16	2,24	8,14
1,70	8,86	4,00	7,62	4,09	11,79	6,16	11,80	1,79	5,27	11,30	2,16	8,15
1,75	9,06	3,96	7,66	4,05	11,88	6,24	11,92	1,74	5,36	11,43	2,11	8,16
1,80	9,27	3,91	7,69	3,99	11,96	6,31	12,04	1,68	5,45	11,55	2,04	8,17
1,85	9,45	3,83	8,22	3,97	12,03	6,38	12,14	1,64	5,53	11,57	1,99	8,17
1,90	9,63	3,75	8,74	3,94	12,14	6,43	12,24	1,59	5,60	11,67	1,93	8,18
1,95	9,77	3,71	8,97	3,88	12,17	6,47	12,29	1,54	5,67	11,78	1,91	8,19
2,00	10,00	3,64	9,18	3,80	12,20	6,51	12,34	1,48	5,74	11,89	1,88	8,20
∞	12,57	3,77	9,18	3,80	12,20	7,62	12,76	1,48	7,06	12,50	1,95	8,20

Fonte: O autor (adaptada de BARES, 1972)

Continuação Tabela 01: valores de μ para cálculo dos momentos máximos

μ para cálculo dos momentos máximos - Lajes armadas em duas direções																		
λ	Caso 05			Caso 06			Caso 07				Caso 08				Caso 09			
	μ_x	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	$\mu_{y'}$
1,00	2,15	3,17	6,99	3,17	6,99	2,15	2,13	5,46	2,60	6,17	2,60	6,17	2,13	5,46	2,11	5,15	2,11	5,15
1,05	2,47	3,32	7,43	3,29	7,20	2,07	2,38	5,98	2,66	6,46	2,78	6,47	2,09	5,56	2,31	5,50	2,31	5,29
1,10	2,78	3,47	7,87	3,42	7,41	1,99	2,63	6,50	2,71	6,75	2,95	6,76	2,04	5,65	2,50	5,85	2,50	5,43
1,15	3,08	3,58	8,26	3,52	7,56	1,89	2,87	7,11	2,75	6,97	3,09	6,99	1,98	5,70	2,73	6,14	2,73	5,51
1,20	3,38	3,70	8,65	3,63	7,70	1,80	3,11	7,72	2,78	7,19	3,23	7,22	1,92	5,75	2,94	6,43	2,94	5,59
1,25	3,79	3,80	9,03	3,71	7,82	1,74	3,43	8,81	2,79	7,36	3,34	7,40	1,85	5,75	3,04	6,67	3,04	5,64
1,30	4,15	3,90	9,33	3,79	7,93	1,67	3,56	8,59	2,77	7,51	3,46	7,57	1,78	5,76	3,13	6,90	3,13	5,68
1,35	4,50	3,96	9,69	3,84	8,02	1,59	3,76	8,74	2,74	7,63	3,55	7,70	1,72	5,75	3,25	7,09	3,25	5,69
1,40	4,85	4,03	10,00	3,90	8,11	1,52	3,96	8,88	2,71	7,74	3,64	7,82	1,64	5,74	3,38	7,28	3,38	5,70
1,45	5,19	4,09	10,25	3,94	8,13	1,45	4,15	9,16	2,67	7,83	3,71	7,91	1,59	5,73	3,48	7,43	3,48	5,71
1,50	5,53	4,14	10,49	3,99	8,15	1,38	4,32	9,44	2,63	7,91	3,78	8,00	1,53	5,72	3,58	7,57	3,58	5,72
1,55	5,86	4,16	10,70	4,03	8,20	1,34	4,48	9,68	2,60	7,98	3,84	8,07	1,47	5,69	3,66	7,68	3,66	5,72
1,60	6,18	4,17	10,91	4,06	8,25	1,28	4,63	9,91	2,55	8,02	3,89	8,14	1,42	5,66	3,73	7,79	3,73	5,72
1,65	6,48	4,14	11,08	4,09	8,28	1,23	4,78	10,13	2,50	8,03	3,94	8,20	1,37	5,62	3,80	7,88	3,80	5,72
1,70	6,81	4,12	11,24	4,12	8,30	1,18	4,92	10,34	2,45	8,10	3,98	8,25	1,32	5,58	3,86	7,97	3,86	5,72
1,75	7,11	4,12	11,39	4,14	8,31	1,15	5,04	10,53	2,39	8,13	4,01	8,30	1,27	5,56	3,91	8,05	3,91	5,72
1,80	7,41	4,10	11,43	4,15	8,32	1,11	5,17	10,71	2,32	8,17	4,04	8,34	1,20	5,54	3,95	8,12	3,95	5,72
1,85	7,68	4,08	11,65	4,16	8,33	1,08	5,26	10,88	2,27	8,16	4,07	8,38	1,17	5,55	3,98	8,18	3,98	5,72
1,90	7,95	4,04	11,77	4,17	8,33	1,04	5,36	11,04	2,22	8,14	4,10	8,42	1,14	5,56	4,01	8,24	4,01	5,72
1,95	8,21	3,99	11,83	4,17	8,33	1,01	5,45	11,20	2,14	8,13	4,11	8,45	1,11	5,60	4,04	8,29	4,04	5,72
2,00	8,47	3,92	11,88	4,18	8,33	0,97	5,55	11,35	2,07	8,12	4,13	8,47	1,08	5,64	4,07	8,33	4,07	5,72
∞	12,58	4,13	11,88	4,18	8,33	0,97	7,07	12,50	2,05	8,12	4,18	8,33	1,09	5,64	4,19	8,33	4,19	5,72

Fonte: O autor (adaptada de BARES, 1972)

Tabela 02: valores de μ para cálculo das lajes sobre 3 apoios

<p style="text-align: center;">μ para cálculo dos momentos máximos - Lajes sobre três apoios</p>															
Tipo															
	$\gamma (l_a/l_b)$	μ_x	μ_x'	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ_x'	μ_y	μ_{yb}	μ_y'	μ_{yb}'	μ_x	μ_x'	μ_y	μ_{yb}
<0,30	-12,50	50,00	0,78	6,22	-12,50	50,00	2,11	8,67	14,56	37,00	-12,50	50,00	1,45	7,45	7,28
0,30	-7,33	43,08	0,78	6,22	-4,89	38,33	2,11	8,67	14,56	37,00	-6,11	40,71	1,45	7,45	7,28
0,35	-5,17	39,98	1,89	7,89	-2,57	33,08	3,18	9,74	14,84	35,53	-3,87	36,53	2,54	8,82	7,42
0,40	-3,00	36,87	3,00	9,56	-0,25	27,83	4,25	10,81	15,13	34,06	-1,63	32,35	3,63	10,19	7,57
0,45	-1,78	33,89	3,62	10,54	0,54	23,94	4,53	10,77	14,26	31,21	-0,62	28,92	4,08	10,66	7,13
0,50	-0,56	30,91	4,24	11,52	1,32	20,04	4,80	10,72	13,40	28,36	0,38	25,48	4,52	11,12	6,70
0,55	0,25	28,02	4,62	11,82	1,62	17,40	4,86	9,99	12,48	25,26	0,94	22,71	4,74	10,91	6,24
0,60	1,06	25,13	5,00	12,11	1,92	14,76	4,92	9,25	11,56	22,17	1,49	19,95	4,96	10,68	5,78
0,65	1,47	22,90	5,25	12,12	1,91	12,91	4,68	8,55	10,81	19,63	1,69	17,91	4,97	10,34	5,41
0,70	1,88	20,66	5,49	12,12	1,90	11,06	4,43	7,84	10,06	17,08	1,89	15,86	4,96	9,98	5,03
0,75	2,06	18,84	5,61	11,81	1,82	9,86	4,14	7,15	9,42	15,17	1,94	14,35	4,88	9,48	4,71
0,80	2,23	17,02	5,72	11,50	1,73	8,65	3,86	6,45	8,77	13,25	1,98	12,84	4,79	8,98	4,39
0,85	2,26	15,59	5,66	11,05	1,64	7,78	3,59	5,86	8,19	11,87	1,95	11,69	4,63	8,46	4,10
0,90	2,28	14,16	5,60	10,59	1,54	6,91	3,33	5,26	7,60	10,49	1,91	10,54	4,47	7,93	3,80
0,95	2,25	12,99	5,48	10,07	1,40	6,25	3,11	4,81	7,12	9,50	1,83	9,62	4,30	7,44	3,56
1,00	2,21	11,82	5,36	9,55	1,25	5,59	2,88	4,35	6,64	8,51	1,73	8,71	4,12	6,95	3,32
1,05	2,33	11,91	5,72	9,91	1,25	5,59	2,98	4,37	6,82	8,50	1,79	8,75	4,35	7,14	3,41
1,10	2,45	12,00	6,08	10,27	1,24	5,58	3,08	4,39	6,99	8,50	1,85	8,79	4,58	7,33	3,50
1,15	2,57	12,08	6,44	10,62	1,24	5,58	3,18	4,41	7,17	6,49	1,91	8,83	4,81	7,52	3,59
1,20	2,69	12,17	6,80	10,98	1,24	5,57	3,27	4,43	7,34	8,48	1,97	8,87	5,04	7,71	3,67
1,25	2,67	12,20	7,09	11,20	1,20	5,57	3,34	4,44	7,44	8,48	1,94	8,89	5,22	7,82	3,72
1,30	2,64	12,22	7,37	11,42	1,17	5,57	3,41	4,45	7,54	8,47	1,91	8,90	5,39	7,94	3,77
1,35	2,62	12,25	7,55	11,64	1,14	5,57	3,49	4,46	7,64	8,47	1,88	8,91	5,52	8,05	3,82
1,40	2,59	12,28	7,93	11,85	1,11	5,58	3,56	4,47	7,73	8,47	1,85	8,93	5,75	8,16	3,87
1,45	2,57	12,31	8,22	12,07	1,09	5,58	3,63	4,48	7,83	8,46	1,83	8,95	5,93	8,28	3,92
1,50	2,54	12,33	8,50	12,29	1,06	5,58	3,70	4,49	7,93	8,46	1,80	8,96	6,10	8,39	3,97
1,55	2,56	12,35	8,68	12,37	1,04	5,58	3,74	4,49	7,97	8,46	1,80	8,97	6,21	8,43	3,99
1,60	2,58	12,36	8,86	12,45	1,01	5,58	3,77	4,49	8,00	8,46	1,80	8,97	6,32	8,47	4,00
1,65	2,59	12,38	9,04	12,53	0,99	5,57	3,81	4,49	8,04	8,46	1,79	8,98	6,43	8,51	4,02
1,70	2,61	12,39	9,22	12,61	0,97	5,57	3,84	4,49	8,08	8,46	1,79	8,98	6,53	8,55	4,04
1,75	2,63	12,41	9,41	12,68	0,95	5,57	3,88	4,50	8,12	8,46	1,79	8,99	6,65	8,59	4,06
1,80	2,65	12,42	9,59	12,76	0,93	5,57	3,92	4,50	8,15	8,45	1,79	9,00	6,76	8,63	4,08
1,85	2,67	12,44	9,76	12,84	0,91	5,57	3,95	4,50	8,19	8,45	1,79	9,01	6,86	8,67	4,10
1,90	2,68	12,45	9,94	12,92	0,88	5,56	3,99	4,50	8,23	8,45	1,78	9,01	6,97	8,71	4,12
1,95	2,70	12,47	10,13	13,00	0,86	5,56	4,02	4,50	8,26	8,45	1,78	9,02	7,08	8,75	4,13
2,00	2,72	12,48	10,31	13,08	0,84	5,56	4,06	4,50	8,30	8,45	1,78	9,02	7,19	8,79	4,15
> 2,0	2,72	12,48	12,50	13,08	0,84	5,56	4,17	4,50	8,33	8,45	1,78	9,02	8,34	8,79	4,17

Fonte: O autor (adaptada da tabela 2.3e, PINHEIRO, 2007)

ANEXO B – Tabelas utilizadas no cálculo das flechas

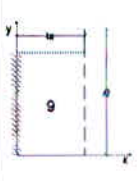
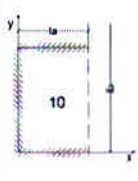
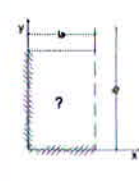
Tabela 03: α para cálculo de flechas

α : Coeficientes para cálculo de flechas - Lajes armadas em duas direções									
λ	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
1,00	4,67	3,20	3,20	2,42	2,21	2,21	1,81	1,81	1,46
1,05	5,17	3,61	3,42	2,67	2,55	2,31	2,04	1,92	1,60
1,10	5,64	4,04	3,63	2,91	2,92	2,41	2,27	2,04	1,74
1,15	6,09	4,47	3,82	3,12	3,29	2,48	2,49	2,14	1,87
1,20	6,52	4,91	4,02	3,34	3,67	2,56	2,72	2,24	1,98
1,25	6,95	5,34	4,18	3,55	4,07	2,63	2,95	2,33	2,10
1,30	7,36	5,77	4,35	3,73	4,48	2,69	3,16	2,42	2,20
1,35	7,76	6,21	4,50	3,92	4,92	2,72	3,36	2,48	2,30
1,40	8,14	6,62	4,65	4,08	5,31	2,75	3,56	2,56	2,37
1,45	8,51	7,02	4,78	4,23	5,73	2,80	3,73	2,62	2,45
1,50	8,87	7,41	4,92	4,38	6,14	2,84	3,91	2,68	2,51
1,55	9,22	7,81	5,00	4,53	6,54	2,86	4,07	2,53	2,57
1,60	9,54	8,17	5,09	4,65	6,93	2,87	4,22	2,87	2,63
1,65	9,86	8,52	5,13	4,77	7,33	2,87	4,37	2,78	2,68
1,70	10,15	8,87	5,17	4,88	7,70	2,88	4,51	2,79	2,72
1,75	10,43	9,19	5,26	4,97	8,06	2,88	4,63	2,81	2,76
1,80	10,71	9,52	5,36	5,07	8,43	2,89	4,75	2,83	2,80
1,85	10,96	9,82	5,43	5,16	8,77	2,89	4,87	2,85	2,83
1,90	11,21	10,11	5,50	5,23	9,08	2,90	4,98	2,87	2,85
1,95	11,44	10,39	5,58	5,31	9,41	2,90	5,08	2,89	2,88
2,00	11,68	10,68	5,66	5,39	9,72	2,91	5,19	2,91	2,91
∞	15,35	15,35	6,38	6,38	15,35	3,07	6,38	3,07	3,07

Fonte: O autor (adaptada de BARES, 1972)

Tabela 04: valores de α para cálculo das lajes sobre 3 apoios

α : Coeficientes para cálculo de flechas - Lajes sobre 3 apoios

$\gamma (l_a/l_b)$						
	α_a	α_b	α_a	α_b	α_a	α_b
<0,30	53,13	150,00	53,13	150,00	53,13	150,00
0,30	41,98	110,02	37,64	97,00	39,81	103,51
0,35	37,48	96,70	31,65	78,05	34,57	87,38
0,40	32,98	83,37	25,65	59,09	29,32	71,23
0,45	29,06	71,61	20,89	46,71	24,98	59,16
0,50	25,14	59,85	16,13	34,33	20,64	47,09
0,55	22,12	51,42	13,22	27,07	17,67	39,25
0,60	19,09	42,98	10,31	19,81	14,70	31,40
0,65	16,80	37,00	8,53	15,96	12,67	26,48
0,70	14,50	31,01	6,74	12,11	10,62	21,56
0,75	12,79	26,67	5,63	9,82	9,21	18,25
0,80	11,08	22,33	4,52	7,53	7,80	14,93
0,85	9,78	19,25	3,84	6,19	6,81	12,72
0,90	8,47	16,16	3,15	4,84	5,81	10,50
0,95	7,49	13,96	2,71	4,04	5,10	9,00
1,00	6,50	11,76	2,26	3,24	4,38	7,50
1,05	6,91	12,19	2,34	3,26	4,63	7,73
1,10	7,32	12,60	2,42	3,27	4,87	7,94
1,15	7,72	13,01	2,49	3,29	5,11	8,15
1,20	8,13	13,46	2,57	3,30	5,35	8,38
1,25	8,46	13,72	2,61	3,31	5,54	8,52
1,30	8,80	13,97	2,64	3,31	5,72	8,64
1,35	9,13	14,23	2,68	3,32	5,91	8,78
1,40	9,46	14,48	2,71	3,33	6,09	8,91
1,45	9,80	14,74	2,75	3,33	6,28	9,04
1,50	10,13	14,99	2,78	3,34	6,46	9,17
1,55	10,35	15,09	2,79	3,34	6,57	9,22
1,60	10,57	15,19	2,80	3,34	6,69	9,27
1,65	10,79	15,29	2,81	3,35	6,80	9,32
1,70	11,01	15,39	2,82	3,35	6,92	9,37
1,75	12,23	15,50	2,83	3,35	7,53	9,43
1,80	11,44	15,60	2,84	3,35	7,14	9,48
1,85	11,66	15,70	2,85	3,35	7,26	9,53
1,90	11,88	15,80	2,86	3,36	7,37	9,58
1,95	12,10	15,90	2,87	3,36	7,49	9,63
2,00	12,32	16,00	2,88	3,36	7,60	9,68
∞	15,63	16,00	3,13	3,36	9,38	9,68

Fonte: O autor (adaptada da tabela 2.3e, PINHEIRO, 2007)

Tabela 05: Flechas em vigas

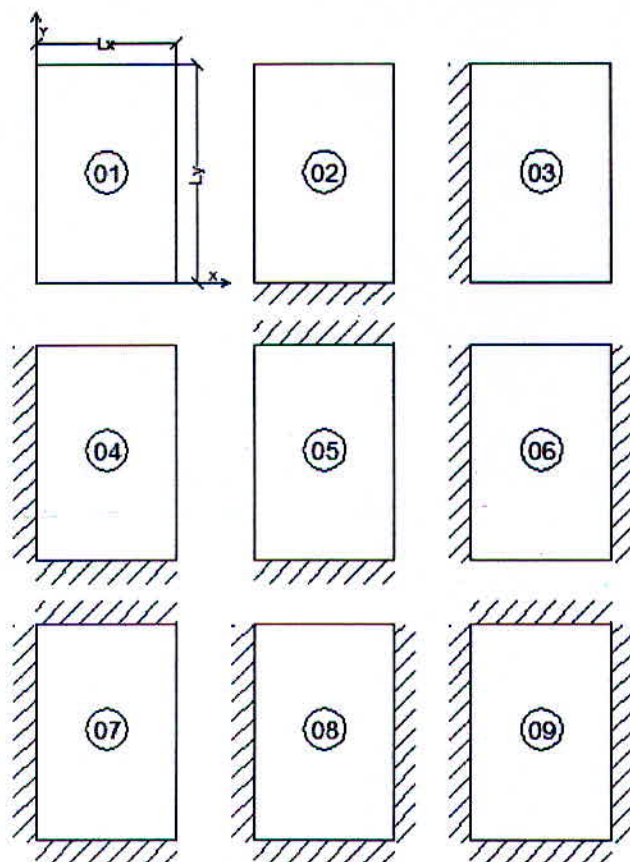
DEFORMAÇÃO DAS VIGAS



Tipos de viga e carregamento	Linha elástica	Flecha máxima	Rotação nos apoios	Equação da linha elástica
1 		$-\frac{PL^3}{3EI}$	$-\frac{PL^2}{2EI}$	$y = -\frac{P}{6EI}(x^3 - 3Lx^2)$
2 		$-\frac{wL^4}{8EI}$	$-\frac{wL^3}{6EI}$	$y = -\frac{w}{24EI}(x^4 - 4Lx^3 + 6L^2x^2)$
3 		$-\frac{ML^3}{2EI}$	$-\frac{ML}{EI}$	$y = -\frac{M}{2EI}x^2$

Fonte: O autor (adaptada da Tabela deformação em vigas, BEER & JONHSTON, p.1198)

Figura 01: Situações de vinculação das lajes isoladas



Fonte: O autor (adaptada da figura 7.5, CARVALHO & FIGUEIREDO, 2003, p.302).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projetos de estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas. Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

BARES, R. (1972) Tablas para el calculo de placas y vigas pared. Barcelona, Gustavo Gili.

BEER, Ferdinand P. & JOHNSTON E. Russell, **Resistência dos Materiais** 3.Ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995 - (tradução e revisão técnica Celso Pinto Morais Pereira)

CARVALHO, R.C. de; FIGUEIREDO, J.R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas usuais de Concreto Armado**. 3. Ed. São Carlos: EdUFSCar, 2013. PINI, 2009 ISBN – 978-85-7600-086-0

PINHEIRO, L.M. (2007) *Concreto armado: tabelas de lajes*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

SOUZA, Gleicione Aparecida Dias Bagne; et al. Manual de normalização: Trabalhos científicos – Varginha – MG , UNIS , 2012.