



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**EMERSON JUAREZ RIBEIRO MARTINS FARIAS**

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES MACIÇAS EM CONCRETO ARMADO**

**FORTALEZA**

**2022**

EMERSON JUAREZ RIBEIRO MARTINS FARIAS

ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES MACIÇAS EM CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Christus, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Francisco Rosendo Sobrinho.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Centro Universitário Christus - Unichristus  
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do  
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F224e Farias, Emerson Juarez Ribeiro Martins.  
Estudo paramétrico de lajes maciças em concreto armado /  
Emerson Juarez Ribeiro Martins Farias. - 2022.  
133 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro  
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,  
Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Me. Francisco Rosendo Sobrinho.

1. Análise paramétrica. 2. Dimensionamento. 3. Estados limites.  
4. Lajes maciças. 5. Parâmetros. I. Título.

CDD 624

EMERSON JUAREZ RIBEIRO MARTINS FARIAS

ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES MACIÇAS EM CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Christus, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me Francisco Rosendo Sobrinho.

Aprovada em: 18/06/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Francisco Rosendo Sobrinho (Orientador)  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Profª. Me. Mariana de Araújo Leite  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof. Agérbon César Cunha da Nóbrega  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)



## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Marcos Antônio de Farias e, à minha tia, Lucilene, pessoa de coração ímpar, que sempre me ajudou e me concedeu a oportunidade de estar aqui e que faz um papel imensurável na minha vida desde o falecimento de minha mãe, jamais conseguirei retribuir por tanto.

À minha mãe (*in memoriam*), Maria Ribeiro Martins, que mais do que ninguém sonhou, batalhou e lutou para que eu alcançasse meus objetivos, mas que infelizmente não pode estar aqui hoje.

Aos amigos que fiz na faculdade e sei que levarei para a vida, Jenifer, Victor, Túlio e Thiago.

Ao meu orientador, professor Rosendo, por aceitar me orientar. Agradeço por toda a disponibilidade, paciência e conhecimentos repassados que possibilitaram a construção desse trabalho.

A todos os meus professores que contribuíram com tanto conhecimento durante toda essa caminhada

Aos integrantes da banca avaliadora por aceitarem o convite.

À Unichristus por todo suporte e estrutura fornecidos durante esses cinco anos de graduação.

## RESUMO

No dimensionamento de estruturas em concreto armado, a experiência no manuseio de parâmetros e variáveis envolvidas nas etapas de projeto é sem dúvida um fator importante na concepção do melhor modelo estrutural para uma edificação, aliando características como segurança e economia. É papel do calculista definir qual tipo de laje se compatibiliza mais ao projeto, sejam por fatores econômicos ou técnicos. As lajes maciças em concreto armado são objeto de estudo neste trabalho, onde por meio de um estudo paramétrico serão analisados os resultados para o dimensionamento conforme atendimento ao Estado limite último e Estado limite serviço, preconizados na NBR 6118 (ABNT, 2014). A análise paramétrica visa observar o comportamento de parâmetros de projeto no processo de dimensionamento de lajes maciças e tanto o dimensionamento quanto a análise serão feitos com a criação e utilização de planilha eletrônica no Excel. Foram elencados os parâmetros de análise e definidas 4 análises, a ideia é que por meio dos resultados se obtenha uma sensibilidade no processo de dimensionamento. Para obtenção de resultados plausíveis, foram considerados modelos genéricos de lajes que apresentam características comuns às lajes projetadas na realidade e os resultados obtidos mediante a parametrização do vão demonstraram situações já esperadas que podem promover uma sensibilidade e percepção maior das vantagens e desvantagens do uso de lajes maciças, dependendo do vão a ser vencido.

**Palavras-chave:** Análise paramétrica. Dimensionamento. Estados limites. Lajes maciças. Parâmetros.

## **ABSTRACT**

In the design of reinforced concrete structures, experience in handling parameters and variables involved in the design stages is undoubtedly an important factor in designing the best structural model for a building, combining features such as safety and economy. It is the role of the calculator to define which type of slab is most compatible with the project, whether due to economic or technical factors. The solid slabs in reinforced concrete are the object of study in this work, where, through a parametric study, the results for the design will be analyzed according to the ultimate limit state and service limit state, recommended in NBR 6118 (ABNT, 2014). The parametric analysis aims to observe the behavior of design parameters in the design process of massive slabs and both the design and the analysis will be done with the creation and use of a spreadsheet in Excel. The analysis parameters were listed and 4 analyses were defined, the idea is that through the results a sensitivity in the sizing process is obtained. In order to obtain plausible results, generic models of slabs that have characteristics common to the slabs designed in reality were considered and the results obtained through the parameterization of the span showed already expected situations that can promote a greater sensitivity and perception of the advantages and disadvantages of using slabs massive, depending on the gap to be overcome.

**Keywords:** Parametric analysis. Sizing. limit states. Massive slabs. parameters.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Laje maciça	18
Figura 2 – Estádio I	19
Figura 3 – Estádio II	19
Figura 4 – Estádio III	20
Figura 5 – Domínio 1	21
Figura 6 – Domínio 2	21
Figura 7 – Domínio 3	22
Figura 8 – Domínio 4	22
Figura 9 – Domínio 5	23
Figura 10 – Diagrama dos domínios de deformações	23
Figura 11 – Planta de fôrmas e lajes	24
Figura 12 – Cálculo do vão efetivo segundo NBR 6118:2014	27
Figura 13 – Vão efetivo usualmente adotado	27
Figura 14 – Condições de vinculação para lajes	29
Figura 15 – Condições de vinculação	30
Figura 16 – Condições de vinculação para lajes com níveis diferentes	30
Figura 17 – Altura útil e total	33
Figura 18 – Altura estimada	34
Figura 19 – Piso e revestimento inferior	36
Figura 20 – Alvenarias dispostas em lajes armadas em duas direções	39
Figura 21 – Alvenarias dispostas em lajes armadas em uma direção a) Caso1 b) Caso2	40
Figura 22 – Laje armada em uma direção sobre apoios simples	45
Figura 23 – Laje armada em uma direção sobre apoio simples e engaste perfeito	46
Figura 24 – Laje armada em uma direção sobre apoios com engastamento perfeito	46
Figura 25 – Laje armada em uma direção em balanço.	47
Figura 26 – Reação da laje nas vigas	51
Figura 27 – Compatibilização dos momentos de uma laje contínua	53
Figura 28 – Região tracionada do concreto	54
Figura 29 – Diagrama retangular simplificado	55
Figura 30 – Diagrama tensão-deformação para armaduras passivas	55
Figura 31 – Fluxograma de metodologia	67
Figura 32 – Espessura inicial adotada	70
Figura 33 – Subdivisões para análise	73

Figura 34 – Modelo genérico da laje das Análises 2, 3, 4 e 5	75
Figura 35 – Fluxograma das combinações de ações	77
Figura 36 – Modelo genérico de laje para análise	78
Figura 37 - Parâmetros fixos na Análise 4	79
Figura 38 – Roteiro de dimensionamento da planilha	81
Figura 39 – Dados de entrada do dimensionamento	82
Figura 40 – Classificação da laje	83
Figura 41 – Pré-dimensionamento da laje	84
Figura 42 – Ações atuantes na laje	84
Figura 43 – Análise estrutural da laje	85
Figura 44 – Dimensionamento da laje no ELU	86
Figura 45 – Verificação do ELS da laje	87
Figura 46 – Aba de análise paramétrica	87
Figura 47 – Dados de análise	88
Figura 48 – Cálculo dos momentos fletores máximos na planilha	88
Figura 49 – Tabela de momentos fletores	89
Figura 50 – Verificação dos domínios de deformação	89
Figura 51 – Etapa de cálculo das flechas	90
Figura 52 – Verificação do ELS	90
Figura 53 – Dados obtidos da parametrização completa	91
Figura 54 – Subdivisões da Análise 1	92
Figura 55 – Não atendimento ao ELU para Análise 1.1	93
Figura 56 – Limitação do vão pelo ELU na Análise 1.1	94
Figura 57 – Análise dos Estados Limites da Análise 1.1	94
Figura 58 – ELU na Análise 1.2	95
Figura 59 – Variação de $l_x$ na análise	96
Figura 60 – Subdivisões da Análise 2	97
Figura 61 – Resultados parciais da Análise 2.1	97
Figura 62 – Relatório da laje 3	98
Figura 63 – Limitação do vão de 4,50x6,75m pelo ELS	99
Figura 64 – Limitação do vão de 5,50x8,25m pelo ELU e ELS	100
Figura 65 – Limitação do vão de 3,50x5,25m pelo ELU.	101
Figura 66 – Aumento da influência do peso próprio da estrutura com o aumento da espessura	

Figura 67 – Limitação do vão de 3,50x5,25m pelo ELU	103
Figura 68 – Vão em que o ELS começa a limitar o dimensionamento	104
Figura 69 – Fluxograma da Análise 3	105
Figura 70 – Limitação do vão de 3,50x5,25m pelo ELU	106
Figura 71 – Limitação do vão de 4,00x6,00m pelo ELU	106
Figura 72 – Falhas no dimensionamento no ELU e verificação no ELS	107
Figura 73 – Estado limite de vibrações excessivas limitando o vão de 5,50x8,25m	108
Figura 74 – ELS de vibrações excessivas limitando o dimensionamento	108
Figura 75 – Domínios de deformação da Análise 3.3	109
Figura 76 – Cargas atuantes na Análise 3.3	109
Figura 77 – Limitação do vão de 4,00x6,00m pelo ELU	110
Figura 78 – Limitação do vão de 4,50x6,75m pelo ELU	110
Figura 79 – Fluxograma da Análise 4	112
Figura 80 – Limitação do vão de 3,50x5,25m pelo ELU	113
Figura 81 – Limitação do vão de 4,00x6,00m pelo ELU	113
Figura 82 – Limitação do vão de 4,50x6,75m pelo ELU	113
Figura 83 – Análise da relação entre vão x espessura das lajes	114

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Justificativa do trabalho</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Objetivos</b>	<b>14</b>
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	14
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Histórico do Concreto</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Laje maciça</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Comportamento de peças fletidas em concreto armado</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Etapas do projeto estrutural</b>	<b>24</b>
2.4.1 <i>Concepção estrutural</i>	24
2.4.1.1 Classe de Agressividade Ambiental (CAA) e critérios de qualidade	25
2.4.1.2 Vão efetivo	26
2.4.1.3 Classificação	28
2.4.1.4 Vinculação	29
2.4.1.5 Módulo de elasticidade	31
2.4.1.6 Aço de armadura passiva	31
2.4.1.7 Classes de concreto	32
2.4.2 <i>Pré-dimensionamento</i>	32
2.4.3 <i>Cálculos das ações atuantes</i>	34
2.4.3.1 Ações permanentes	35
Laje armada em duas direções	38
Laje armada em uma direção	39
2.4.3.2 Ações variáveis	41
2.4.4 <i>Combinação de ações</i>	41
2.4.5 <i>Análise estrutural</i>	44
2.4.5.1 Análise estrutural de lajes armadas em uma direção	45
2.4.5.2 Análise estrutural de lajes armadas em cruz	48
2.4.6 <i>Dimensionamento à flexão no ELU</i>	53
2.4.6.1 Cálculo da armadura simples	55
2.4.7 <i>Dimensionamento ao cisalhamento no ELU</i>	58
2.4.8 <i>Verificação no ELS</i>	59
2.4.8.1 Verificação do estado limite de deformação excessiva (ELS-DEF)	60

2.4.9 <i>Detalhamento de projeto</i>	63
2.4.9.1 Armadura mínima	64
2.4.9.2 Armadura máxima	66
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>67</b>
<b>3.1 Concepção de projeto</b>	<b>68</b>
<b>3.2 Parâmetros de projeto</b>	<b>68</b>
3.2.1 <i>Vão efetivo</i>	69
3.2.2 <i>Espessura</i>	70
3.2.3 <i>Combinação de ações</i>	71
3.2.4 <i>Condições de contorno e vinculação da laje</i>	71
<b>3.3 Análises</b>	<b>72</b>
3.3.1 <i>Análise 1</i>	73
3.3.2 <i>Análise 2</i>	74
3.3.3 <i>Análise 3</i>	76
3.3.4 <i>Análise 4</i>	78
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>81</b>
<b>4.1 Planilha no Excel</b>	<b>82</b>
<b>4.2 Análises</b>	<b>91</b>
4.2.1 <i>Análise 1</i>	91
4.2.2 <i>Análise 2</i>	96
4.2.3 <i>Análise 3</i>	105
4.2.4 <i>Análise 4</i>	112
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>116</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>117</b>
<b>ANEXOS / APÊNDICES</b>	<b>119</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os tipos de projetos existentes, o projeto estrutural caracteriza-se pelo dimensionamento de estruturas a fim de se determinar uma solução estrutural, sendo dividido em etapas dispostas desde a concepção estrutural, o pré-dimensionamento, os cálculos de ações, a análise estrutural, o dimensionamento, as verificações, e os detalhamentos e desenhos. Segundo Carvalho e Filho (2014), o cálculo de uma estrutura deve garantir segurança e estabilidade, considerando todas as ações em que a estrutura está submetida, com o intuito de evitar a ruína, promovendo o melhor estado de utilização quanto a segurança e estética.

Para estruturas de concreto armado, segundo a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), se faz necessário o dimensionamento levando em consideração os estados limites definidos pela própria norma. O Estado Limite Último (ELU) é o limite de perda parcial ou total da capacidade resistente a qual a estrutura deve ter para resistir aos esforços e solicitações sem perder seu equilíbrio. Enquanto isso, o Estado Limite de serviço (ELS) diz respeito ao conforto e a estética para o uso da estrutura. De tal maneira, é parte inerente ao dimensionamento que o projeto, atenda aos requisitos de funcionalidade quando dimensionado pelo ELU e verificado seu ELS.

De acordo com Sampaio (2021), em meio aos inúmeros métodos e modelos para execução na construção civil, levando em consideração alguns fatores como: a localização da obra, a viabilidade de execução, considerada a especialização da mão de obra; os custos referentes ao metro cúbico de concreto, o peso da armadura e a metragem quadrada das formas; o calculista deve optar pela melhor opção de sistema estrutural pertinente à situação.

Um bom projeto implica no atendimento de alguns requisitos, como segurança, economia, durabilidade e ao atendimento do projeto arquitetônico. Atualmente, mesmo com um grande leque de possibilidades atreladas ao uso de *softwares* para dimensionamento, ainda é papel do projetista a escolha do melhor método construtivo que se adequa à situação. Portanto, não se trata apenas dos cálculos, ainda há a questão subjetiva incubida ao engenheiro no momento de definição, por exemplo, do tipo de laje a ser utilizada, bem como do seu pré-dimensionamento.

Araújo (2010), afirma que as lajes são elementos bidimensionais - possuem sua altura bem menor que as medidas de seus vãos - responsáveis pela transmissão dos esforços recebidos durante sua utilização para as vigas, onde as vigas por sua vez transmitem essas cargas para os pilares até que todos os esforços cheguem nas fundações. Existem diversos

tipos de lajes que são utilizados de maneira a fornecer funcionalidade necessária, sejam as lajes maciças, nervuradas ou treliçadas, todas possuem suas especificidades quanto aos materiais utilizados e a própria execução em si. Entretanto, cada uma possui suas características que definem qual a melhor opção a ser utilizada.

As lajes maciças são placas de concreto armado uniforme, apoiadas em suas extremidades por vigas ou alvenarias, utilizadas comumente em situações em que se é necessário vencer pequenos vãos (ARAÚJO, 2010). Outras características das lajes maciças, apontadas por Carvalho e Filho (2014) são a distribuição de suas reações nas vigas - ocasionando um bom aproveitamento por parte da vigas, visto que, dependendo do vão e das condições de contorno, as cargas podem ter a mesma ordem de grandeza - e da possibilidade de diminuição no custo do pavimento mediante a reutilização de formas e escoras em situações de pavimentos repetidos.

Na concepção de utilização da laje do tipo maciça, uma questão a ser levantada é o vão que deve ser vencido, em pequenos vãos, a utilização deste tipo é uma boa concepção em que se utiliza uma laje bidimensional com espessura pequena, até mesmo tendo em vista que na execução de múltiplos pavimentos, resultaria no ganho de alguns metros quadrados construídos quando comparados a lajes do tipo nervurada com maior espessura. Todavia, Bezerra (2017), afirma que o uso de lajes maciças em grandes vãos se torna uma opção o tanto quanto antieconômica, dado que, nessas condições, seria necessário uma laje maciça de altura elevada onde grande parte de sua resistência seria destinada a suportar o peso próprio.

As lajes maciças usualmente seguem dimensões que variam de 7 a 16 centímetros, a depender se é uma laje do tipo piso ou uma laje de cobertura, a carga que estará sujeita, se será uma laje lisa ou laje cogumelo e até mesmo se haverá protensão na laje. Eventualmente, é bastante utilizada em obras de grande porte, como edifícios residenciais. Mas em alguns casos, pode ser necessário lidar com a situação em que seja melhor buscar uma opção que possua maior eficiência, seja mais econômico e que possua execução mais simples. Carvalho e Pinheiro (2009), sustentam que as lajes nervuradas têm como vantagens grande inércia e peso próprio relativamente pequeno, com comportamento semelhante ao de lajes maciças.

Evidencia-se que há alguns parâmetros e fatores a serem levados em consideração na melhor escolha que se adequa ao projeto. Como dito anteriormente, os tipos de laje citados possuem suas semelhanças e características, como também apresentam diferenças que definem sua melhor utilização conforme o necessário, a depender do problema e/ ou questão, como o vão a ser vencido ou a espessura a ser escolhida.

## 1.1 Justificativa do trabalho

Para desenvolver e analisar os modelos de lajes que atendam as referências normativas, podem existir não somente variados *softwares*, como também, existirão diversas concepções propostas que podem se adequar de maneira melhor ou não a um mesmo projeto, pois é muito intrínseco ao engenheiro calculista a escolha das melhores variáveis dispostas para determinada situação. Conforme afirma Bezerra (2017), as escolhas dependem muito da sensibilidade e experiência já vivida pelo projetista. Diante disso, é necessário melhorias que ajudem no processo de dimensionamento de lajes do tipo maciça em concreto armado, para que seja possível então, definir em qual situação uma laje maciça estará mais bem disposta que uma laje nervurada e qual altura deverá ser utilizada levando em conta as limitações que esse tipo de laje apresenta quando disposto em grandes espessuras.

Em consideração a isso, a plataforma do *Microsoft Excel® (Excel)*, pode ser utilizada como uma proposta em meio a outras plataformas mais sofisticadas como o *software Eberick* que consegue dimensionar estruturas, mas possui um preço elevado que não o torna tão acessível, principalmente para engenheiros menos experientes e novos no mercado que buscam pela sensibilidade de um melhor processo de dimensionamento de projeto. Sendo assim, uma planilha elaborada no *Excel* poderia fornecer um estudo paramétrico para o dimensionamento de lajes maciças no ELU e ELS, apresentando uma análise do impacto da variação de parâmetros, de forma a apresentar critérios e informações para futuras tomadas de decisão.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo paramétrico de lajes maciças de concreto armado para atender os estados limites por meio de planilha eletrônica no *Microsoft Excel® (Excel)*.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Estudo bibliográfico sobre lajes maciças;



Criação de planilha eletrônica para auxiliar na escolha das lajes em relação ao vão;

Criar orientações paramétricas para lajes maciças de acordo com os resultados das análises feitas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Histórico do Concreto

Segundo afirma Clímaco (2008), em um primeiro momento os materiais mais utilizados em obras da antiguidade para execução de elementos estruturais foram a pedra e a madeira, com seu uso datado há 3 mil anos atrás, posteriormente, com seu surgimento datado há alguns séculos, as ligas metálicas também passaram a ser utilizadas. Esses materiais apresentavam suas características específicas quanto a resistência e durabilidade, no entanto, o principal avanço se deu com o surgimento dos materiais aglomerantes.

Os materiais chamados aglomerantes, possibilitavam como resultado uma “pedra artificial” denominada de “concreto”, devido a reação com a água, que ainda possuía a adição de materiais inertes com o intuito de aumentar volume, fornecer estabilidade físico-química e reduzir custos (CLÍMACO, 2008). Clímaco (2008), ainda afirma que os romanos utilizavam seu tipo de concreto usando cal e pozolana.

O concreto que conhecido hoje e amplamente utilizado na atualidade é uma composição de água, agregados e cimento. Mais especificamente, a mistura de água e cimento forma a pasta, que quando adicionada de agregado miúdo se transforma em argamassa. Por fim, ao se adicionarem agregados graúdos, como a brita, obtém-se então o concreto simples. Devido ao preço elevado do cimento, o agregado graúdo tem como finalidade reduzir esse custo ao encorpar volume na mistura sem prejudicar muito a qualidade final do material (CARVALHO e FILHO, 2014).

No entanto, o concreto simples embora possua suas qualidades e características, quando atua sozinho sendo disposto a esforços de flexão, possui seu ponto fraco na resistência à tração. Comprovadamente, o concreto possui forte resistência à compressão, mas fraca resistência à tração. Com a ampla utilização do concreto na construção, era necessário buscar uma compensação na fraca resistência à tração, foi como resultado dessa busca pela resistência à tração que se descobriu o concreto armado.

Portanto, em peças estruturais, o concreto não é capaz de resistir sozinho aos esforços, visto que, não existirão apenas solicitações provenientes da compressão. Em peças submetidas à flexão, uma parte da peça estará sujeita à tração e outra parte estará sujeita à flexão ao mesmo tempo. O aço é um material dúctil, resistente à tração, amplamente utilizado por promover uma ruptura dúctil, ou seja, quando na iminência da ruptura, o aço apresenta

fissurações que “avisam” antes da ruína da peça e graças à aderência, o aço consegue trabalhar mutuamente com o concreto simples.

Clímaco (2008), conceitua o concreto armado como sendo um material formado da junção do concreto simples com uma armadura passiva, para que ambos os materiais juntos trabalhem como um só solidariamente na resistência de esforços de flexão. Sendo assim, em estruturas de concreto armado, o concreto atua na resistência à compressão e o aço atua resistindo aos esforços provenientes da tração.

O concreto armado é um material que possui características vantajosas, principalmente quando são levadas em consideração as referências normativas que objetivam promover sua maior durabilidade. Carvalho e Filho (2014), apresentam como vantagens do material concreto armado: uma boa resistência à grande parte das solicitações, boa trabalhabilidade, a possibilidade de se formarem estruturas monolíticas, um bom domínio de execução do material pela mão de obra, a durabilidade, durabilidade e resistência ao fogo quando comparados ao aço e a madeira se o cobrimento e a durabilidade do material seguirem as adequações da norma, a possibilidade de pré-moldarem e por fim, as resistências a choques e vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos.

Assim como todo material possui as suas vantagens, os autores supracitados acima, apresentam também algumas desvantagens, como o peso próprio elevado em algumas situações que podem ou inviabilizar o uso ou elevar o custo, o fato de ser um material que conduz calor e som e o uso de fôrmas e escoras até que o material consiga chegar em sua resistência, o que leva um determinado tempo.

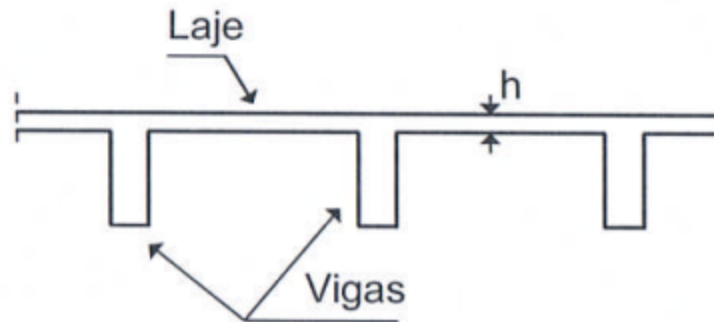
## **2.2 Laje maciça**

Segundo Clímaco (2008), as lajes são elementos laminares que recebem esforços normais predominantes em sua superfície média e têm como objetivo resistir aos esforços provenientes das ações atuantes de utilização na estrutura. As lajes recebem os esforços diretos, sejam de pessoas, móveis ou outros elementos e transmitem esses esforços para a estrutura, para que assim os elementos estruturais encaminhem esses esforços até o solo. Araújo (2010), designa as lajes como placas de concreto armado.

Portanto, as lajes maciças são placas de concreto armado com armaduras dispostas para combater os esforços de flexão. Diferente das lajes nervuradas, a laje macia é totalmente composta por concreto. Esse tipo de laje difere das lajes lisas e lajes do tipo cogumelo por ser apoiada e seu contorno por vigas. A NBR 6118 (ABNT, 2014), cita que as

lajes lisas e cogumelo são apoiadas em pilares, sendo que nas lajes cogumelo há a presença de capitéis. As lajes maciças podem ser armadas em uma ou duas direções, a depender de sua geometria e na grande maioria dos casos não necessitam de armaduras para combate ao cisalhamento. As lajes maciças seguem as dimensões mínimas da NBR 6118 (ABNT, 2014), com valores entre 7 e 16 centímetros.

Figura 1 – Laje maciça



Fonte: Araújo (2010).

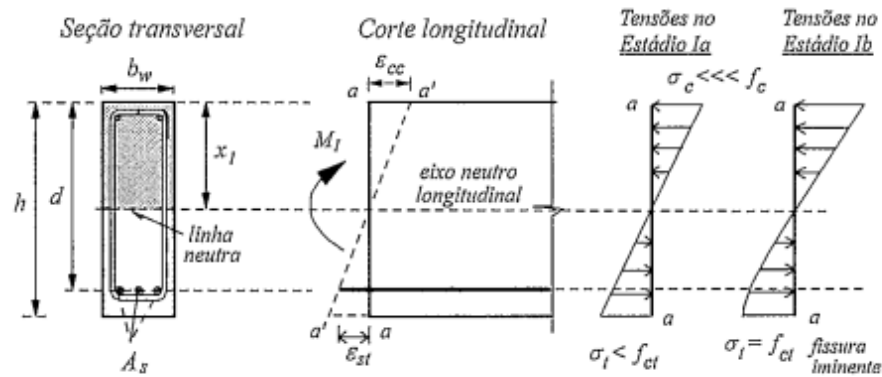
Como já citado, Carvalho e Figueiredo Filho (2014), apontam como vantagens da laje maciça a possibilidade de no processo de concretagem serem dispostas tubulações de instalações, além da redução no custo de pavimentos repetidos pela possibilidade de repetição das fôrmas e escoramentos. Em relação aos vãos, a laje maciça não é indicada quando se é necessário vencer grandes vãos, devido ao peso próprio das lajes maciças. Araújo (2010), afirma que para vão grandes, superiores a 8 metros, são utilizadas lajes nervuradas pois em suas nervuras estão dispostas armaduras de tração, dispensando parte do concreto que ficaria na zona tracionada, reduzindo o peso próprio.

### 2.3 Comportamento de peças fletidas em concreto armado

Quando uma peça é submetida a um carregamento, desde o carregamento inicial até sua ruptura, ela tende a passar por alguns estágios. Esses estágios, conforme afirma Clímaco (2008), são denominados de “estádios” na literatura técnica brasileira e apresentam as mudanças ocorridas desde o início do carregamento, até a conseqüente ruptura de peças submetidas à flexão pura simples. Cada estágio possui características bem definidas. Clímaco (2008), afirma que no Estádio I (Figura 2) a peça está sujeita aos carregamentos iniciais, possuindo valores baixos para os momentos fletores; ainda sem fissuração; com diagrama de

tensões com comportamento linear e tanto na zona de tração como na zona da compressão, as tensões máximas são inferiores às resistências características.

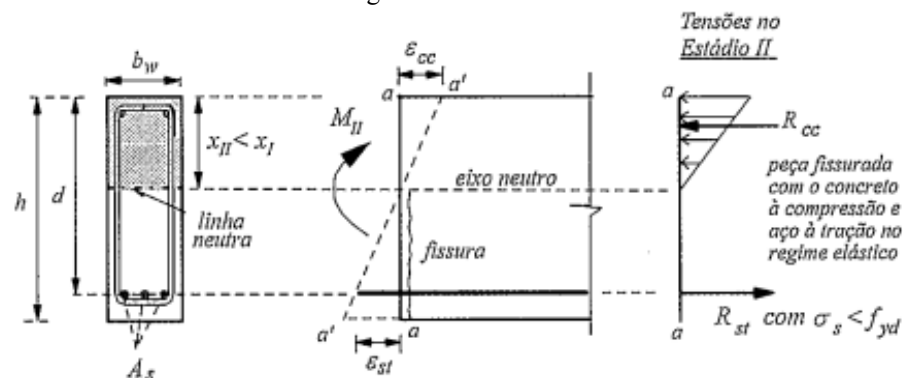
Figura 2 – Estádio I



Fonte: Clímaco (2008).

O fim do Estádio I culmina com o início da fissuração e, portanto, é neste estágio que se calcula o momento de fissuração. No Estádio II (estado de fissuração) (Figura 3), Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que com o aumento do momento fletor, abaixo da linha neutra, as tensões de tração são maiores que a resistência à tração e dessa forma apenas o aço passa a resistir esses esforços enquanto a compressão ainda permanece linear. O fim do Estádio II é marcado pelo início da plastificação do concreto comprimido.

Figura 3 – Estádio II

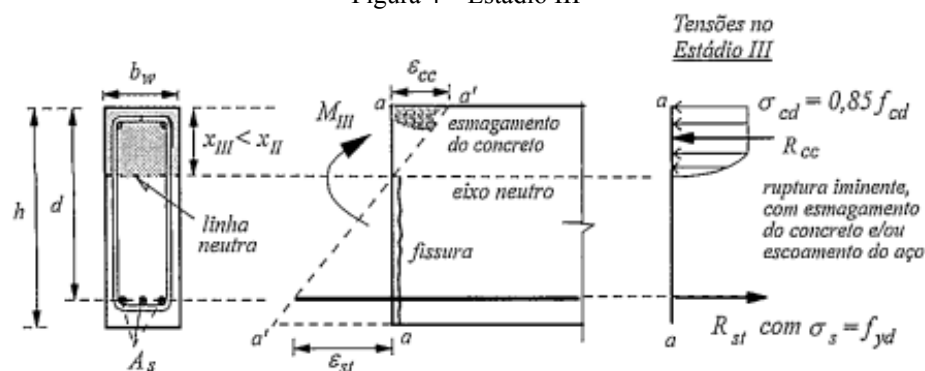


Fonte: Clímaco (2008).

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que no Estádio III (Figura 4), o momento fletor já é elevado o suficiente para levar a peça à iminência de sua ruína, a fibra

mais comprimida do concreto começa a plastificar e a peça encontra-se bastante fissurada, com fissuras próximas a linha neutra, diminuindo a região comprimida do concreto. Nesse estágio, o concreto também não resiste mais à tração e o diagrama de tensões está na forma de parábola-retangular.

Figura 4 – Estádio III



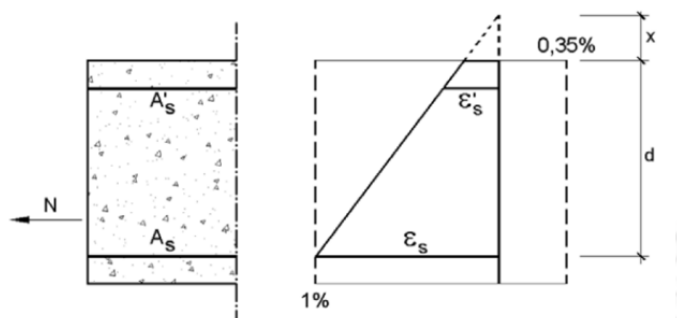
Fonte: Clímaco (2008).

Para aproveitamento integral da resistência dos pontos de vista seguro e econômico, Clímaco (2008), afirma que a ruptura da peça deve acontecer com o esmagamento do concreto à compressão e escoamento do aço à tração, de forma que exista uma margem segura para que a peça não chegue nesse estado limite de. Em resumo, o Estádios I e II, atendem as verificações de serviço, para determinar o deslocamento (ELS-W) e a abertura de fissuras (ELS-F), enquanto no Estádio III, é dimensionado a armadura de flexão simples ( $A_s$ ) e determinado o momento fletor resistente ( $M_{rd}$ ).

Para o dimensionamento de uma estrutura, é preciso entender como se dá a ruptura da seção de uma peça fletida em concreto armado. Carvalho e Figueiredo Filho (2014), conceituam os domínios de deformações como sendo o intervalo de deformações do aço e do concreto em uma seção transversal retangular com armadura tracionada. Clímaco (2008), afirma ainda que esse intervalo de deformações pontua possibilidades de situações em que a peça pode atingir sua ruína. Os domínios podem colapsar pelos seguintes tipos de ruínas: Deformação excessiva da armadura e esmagamento do concreto em seções parcialmente ou totalmente comprimidas.

No domínio 1 (Figura 5), Clímaco (2008), cita que a ruptura se dá por tração desuniforme, sem compressão, desprezando a resistência à tração do concreto (somente o aço resiste aos esforços), admite-se que a ruptura acontece quando a armadura mais tracionada atinge um valor de 10‰.

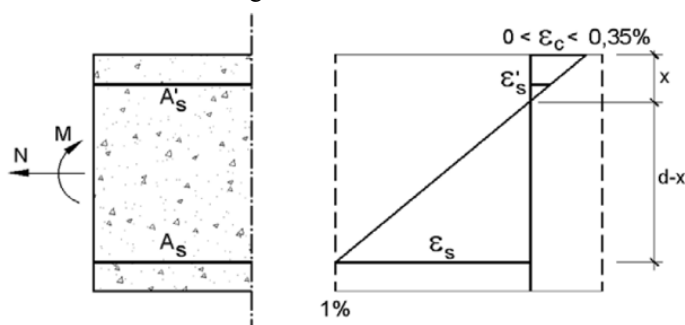
Figura 5 – Domínio 1



**Fonte:** Autoria própria (2021).

No domínio 2 (Figura 6), ocorre a deformação excessiva do aço, portanto, Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que o ELU acontece com a deformação excessiva do aço ( $\epsilon_s = 10\%$ ), mas o concreto não atinge a ruptura ( $\epsilon_c = 3,5\%$ ).

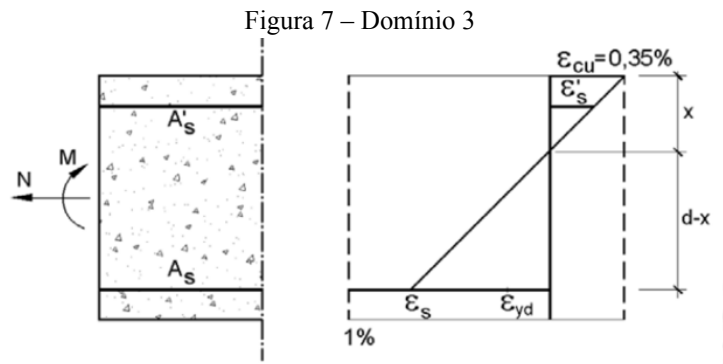
Figura 6 – Domínio 2



**Fonte:** Autoria própria (2021).

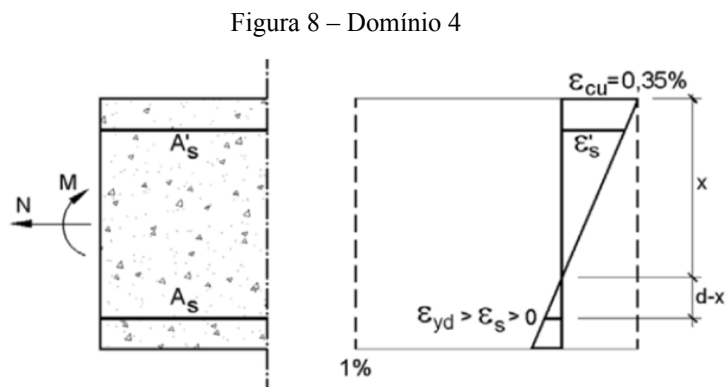
No domínio 3 (Figura 7), ocorre a ruptura do concreto na flexão, o limite deste domínio encontra-se no início do escoamento do aço ( $\epsilon_s = \epsilon_{yd} = 10\%$ ) e com o concreto na sua deformação máxima ( $\epsilon_c = 3,5\%$ ). Clímaco (2008), afirma que no domínio 3, a ruptura acontece com o escoamento do aço simultâneo ao esmagamento do concreto comprimido, caracterizando a ruptura da seção como sendo uma ruptura balanceada. Para Carvalho e Figueiredo Filho (2014), a situação de escoamento do aço e esmagamento do concreto

acontecendo ao mesmo tempo é ideal para o dimensionamento pelo fato que os dois materiais chegam aos seus limites de resistência juntos.



Fonte: Autoria própria (2021).

No domínio 4 (Figura 8) o estado limite é caracterizado pela ruína devido ruptura do concreto à flexão, onde a armadura não chega a atingir o escoamento e dessa forma a ruptura ocorre de maneira frágil, sem avisar. O dimensionamento de peças no domínio 4 deve ser evitado, pelo fato de serem peças superarmadas. Clímaco (2008), afirma que o rompimento destas peças acontece de maneira brusca, sem avisar, motivo pelo qual deve ser evitado o dimensionamento neste domínio. As peças devem ser dimensionadas de maneira que elas apresentem algum aviso antes da ruína (deformação do aço ou fissuração do concreto).

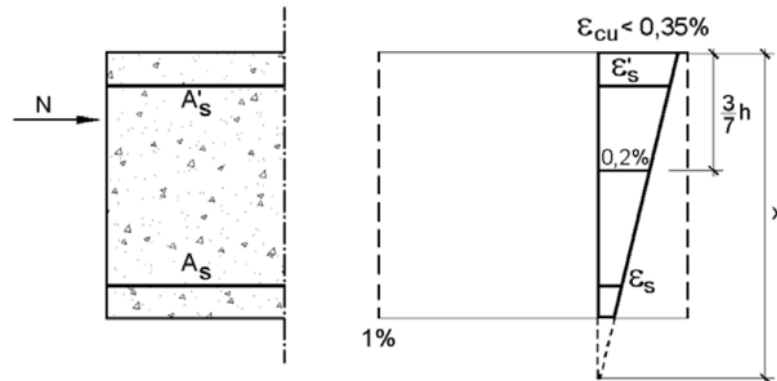


Fonte: Autoria própria (2021).



Para o domínio 5 (Figura 9), Clímaco (2008), afirma que acontece a ruptura por compressão não uniforme, sem tração. Nesse domínio, Clímaco (2008), afirma que a seção rompe devido a compressão com pequena excentricidade. Dessa maneira, Carvalho e Figueiredo Filho (2014), citam que para o domínio, a seção possui aço e concreto comprimidos na área resistente além de apresentar uma ruptura brusca.

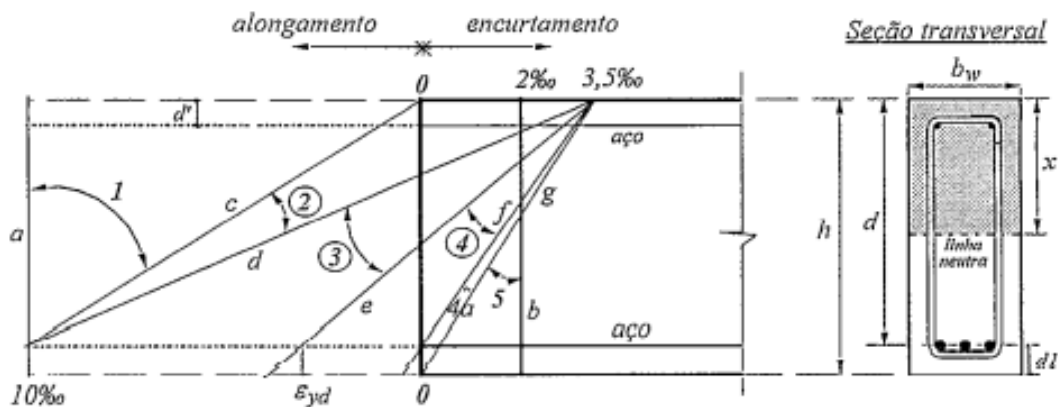
Figura 9 – Domínio 5



Fonte: Autoria própria (2021).

Considera-se a ocorrência de ruína quando as deformações se enquadrarem na Figura 10, que apresenta o diagrama de deformações para os domínios caracterizados.

Figura 10 – Diagrama dos domínios de deformações



Fonte: Clímaco (2008).

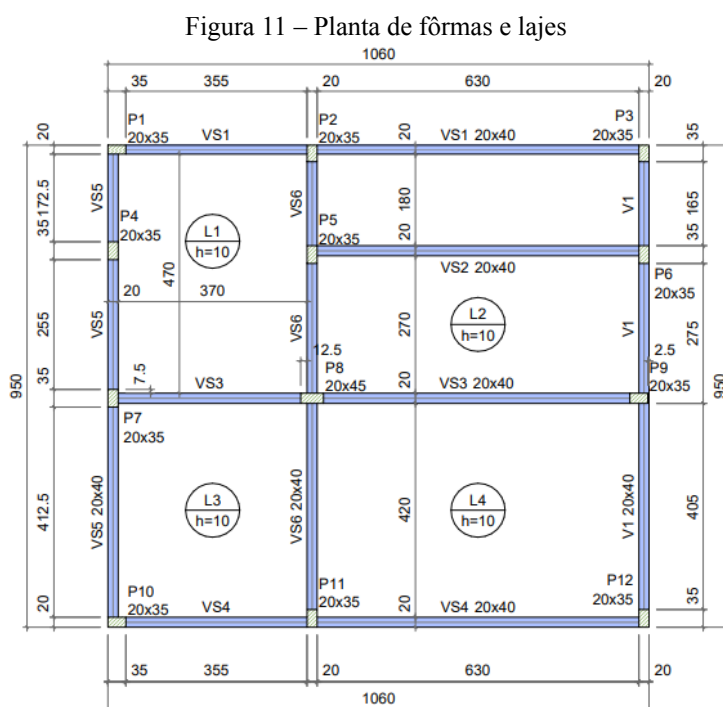
No dimensionamento de lajes, consideram-se as lajes como vigas de faixa unitária e dessa maneira, Clímaco (2008), explica que somente há sentido para fins de

dimensionamento, que o dimensionamento seja feito nos domínios 2, 3 e 4, onde há flexão normal, pura e simples. Em seu item 14.6.3, a NBR 6118 (ABNT, 2014), afirma que a capacidade de rotação dos elementos estruturais está atrelada ao posicionamento da linha neutra, pontuando que quanto menor for a posição da linha neutra, maior é a capacidade do elemento rotacionar. Portanto, a norma estabelece, com o intuito de preservar o comportamento dúctil de vigas e lajes, os limites para posição da linha neutra, sendo  $x/d \leq 0,45$  para concreto de  $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$  e  $x/d \leq 0,35$  para concretos com  $f_{ck} > 50\text{MPa}$  e  $f_{ck} \leq 90\text{MPa}$ .

## 2.4 Etapas do projeto estrutural

### 2.4.1 Concepção estrutural

A concepção estrutural é uma das etapas mais importantes para o dimensionamento do projeto estrutural, onde são definidos os elementos a serem utilizados e suas disposições. Em primeiro momento, ao receber um projeto arquitetônico, deve-se buscar a compatibilização do mesmo com a estrutura, realizando a locação de pilares e vigas. É requisito de um bom projeto estrutural atender ao projeto arquitetônico, afinal, sempre haverá uma solução a ser disposta. Ao serem lançados os pilares e vigas, são delimitadas as regiões onde estarão dispostas as lajes, obtendo dessa maneira uma planta de forma (Figura 11).



**Fonte:** Autoria própria (2021).

Tendo definido a posição das peças estruturais e conseqüentemente a definição das lajes, ainda na concepção estrutural, a fim de atender aos requisitos de segurança e vida útil do projeto é necessário se conhecer a região de localização da edificação para definir a Classe de Agressividade Ambiental (CAA) a qual a estrutura estará submetida.

#### 2.4.1.1 Classe de Agressividade Ambiental (CAA) e critérios de qualidade

As edificações em concreto armado devem possuir uma vida útil que garanta durabilidade ao projeto, para isso deve ser levado em consideração condições que afetem a qualidade das estruturas, como as intempéries que possam acometer o concreto e o aço, promovendo patologias ao decorrer do tempo. A NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), dispõe em seu item 6 algumas diretrizes para durabilidade e vida útil das estruturas de concreto, exigências essas que visam conservar durante sua vida útil a segurança, estabilidade e aptidão em serviço. De acordo com item 6.4.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), a agressividade do meio ambiente refere-se as ações físicas e químicas que atuam na estrutura de concreto. A norma supracitada ainda preconiza em seu item 6.4.2 quem em projetos de estrutura, a agressividade ambiental deve ser considerada e classificada conforme a tabela 6.1 da mesma. A Tabela 1 apresenta as classes de agressividade ambientais dispostas na referida tabela da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 1 – Classes de Agressividade ambiental

<b>Classe de agressividade ambiental</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
<b>I</b>	FRACA	RURAL	INSIGNIFICANT E
		SUBMERSA	
<b>II</b>	MODERADA	URBANA	PEQUENO
<b>III</b>	FORTE	MARINHA	GRANDE
		INDUSTRIAL	
<b>IV</b>	MUITO FORTE	INDUSTRIAL	ELEVADO
		RESPINGOS DE MARÉ	

**Fonte:** Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Ao determinar a CAA da localidade do projeto, pode-se determinar por exemplo o tipo de cimento a ser utilizado na localidade, além de outros critérios que visam proteger a estrutura dos ataques promovidos pelos agentes químicos e físicos. É de suma importância que a consideração quanto a classe de agressividade esteja prevista em projeto para execução, para que dessa forma, o concreto utilizado atenda as referências de qualidade.

As peças de concreto armado devem seguir aos requisitos mínimos de relação água/cimento, classe de concreto e cobrimento nominal. Para isso, deve-se fazer correspondência da CAA obtida e determinada na Tabela 1, com as tabelas 7.1 e 7.2, da NBR 6118 (ABNT, 2014). A Tabela 2 apresenta a relação de água cimento ( $a/c$ ) e classe de concreto ( $f_{ck}$ ) a ser determinada após a classificação da classe de agressividade em questão. Com a determinação da classe de concreto, obtém-se a resistência característica à compressão do concreto, o  $f_{ck}$ .

Tabela 2 – Fator água/cimento correspondente

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	CP	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	CP	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Após a determinação da resistência característica do concreto, resta a definição do cobrimento nominal a ser respeitado na execução da peça, com o intuito de promover o cobrimento correto da armadura, de modo a criar uma barreira de proteção na armadura e para isso, a Tabela 3 relaciona a CAA com o cobrimento nominal em mm, para componentes como lajes, pilares, vigas e elementos de fundação.

Tabela 3 – Cobrimento nominal

Tipos de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50

<b>Concreto Protendido</b>	<b>Laje</b>	25	30	40	50
	<b>Viga/pilar</b>	30	35	45	55

Fonte: Adaptada da Tabela 7.2 da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).

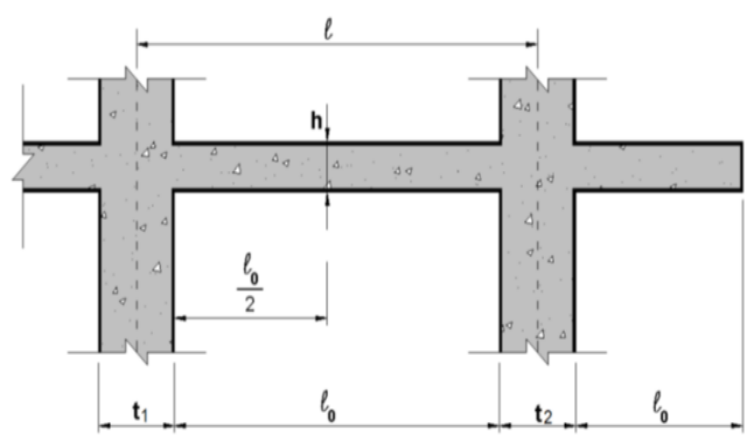
#### 2.4.1.2 Vão efetivo

O vão efetivo de uma laje é a distância entre seus eixos de apoio (vigas). Em seu item 14.7.2.2, a NBR 6118:2014 fala sobre vão efetivos de lajes ou placas, afirmando que em situações em que os apoios são suficientemente rígidos, o vão efetivo pode ser calculado pela Equação (1).

$$le = l_0 + a_1 + a_2 \quad (1)$$

A Figura 12 apresenta a situação de cálculo para um vão efetivo, utilizando a Equação (1).

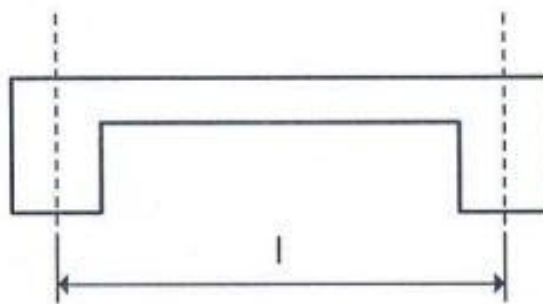
Figura 12 – Cálculo do vão efetivo segundo NBR 6118:2014



Fonte: Barreto (2019).

O valor de  $a_1$  se configura como sendo menor valor entre as relações  $(t_1/2$  e  $0,3h)$  e o  $a_2$ , é também o menor valor entre as relações  $(t_2/2$  e  $0,3h)$ .  $l_0$  é a distância entre as faces internas. Para situações em que as vigas de apoio não são muito grandes, Araújo (2010), afirma que a diferença entre os eixos e os limites citados em norma são pequenos, sendo assim, é usual a utilização do vão efetivo como sendo a distância entre os eixos, conforme é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Vão efetivo usualmente adotado



**Fonte:** Araújo (2010).

Com os vãos definidos a partir da concepção estrutural, é possível determinar as dimensões efetivas em questão, na direção  $x$  e na direção  $y$  e assim, determinar a classificação quanto à armação das lajes em uma ou duas direções.

#### 2.4.1.3 Classificação

A classificação de uma laje é fundamental para o dimensionamento, pois a partir da classificação será possível determinar em quantas direções a laje será armada. Em lajes quadradas, com duas dimensões similares, os momentos a serem considerados são importantes nos dois vãos e devem, por tanto, serem calculados, já em lajes retangulares, onde há um vão bem maior que o outro, o momento considerado para fins de cálculo é apenas em um dos vãos.

Segundo Araújo (2010), para lajes retangulares no centro dos dois vão  $l_x$  e  $l_y$ , as flechas são iguais e as curvaturas são diferentes devido aos vãos. Araújo (2010), cita ainda, que a curvatura no menor vão ( $l_x$ ) é maior que a curvatura do maior vão ( $l_y$ ) e como o momento fletor é diretamente proporcional a curvatura, conclui-se que o momento em  $l_x$  é maior que o momento em  $l_y$ . Com a finalidade da análise estrutural das ações, o momento considerado é o maior momento, e como fora citado, no menor vão se encontram os maiores momentos, enquanto na direção do maior vão os momentos são menores.

Tendo em vista o exposto, as lajes com dimensões mais próximas de um quadrado são denominadas de lajes armadas em cruz, visto que, estão com armaduras dispostas em duas direções e as lajes retangulares são chamadas apenas de lajes armadas em uma direção. Nas lajes armadas em apenas uma direção, a armadura calculada é apenas no menor vão e para a outra direção é adotada uma armadura mínima, diferentemente do que acontece nas lajes em cruz, onde devido aos momentos elevados nos dois vãos, as duas armaduras devem ser calculadas, tanto para o vão teórico de  $l_x$  como para o de  $l_y$ .

Para classificação das lajes, deve-se utilizar a relação entre  $l_y$  (maior vão, em metros) sobre  $l_x$  (menor vão, em metros), como apresentado na Equação (2), onde através da relação entre os vãos teóricos, é possível classificar a laje como laje em cruz (armada em duas direções) ou laje armada em uma direção.

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

Onde:

$\lambda \leq 2$  : laje armada em uma direção;

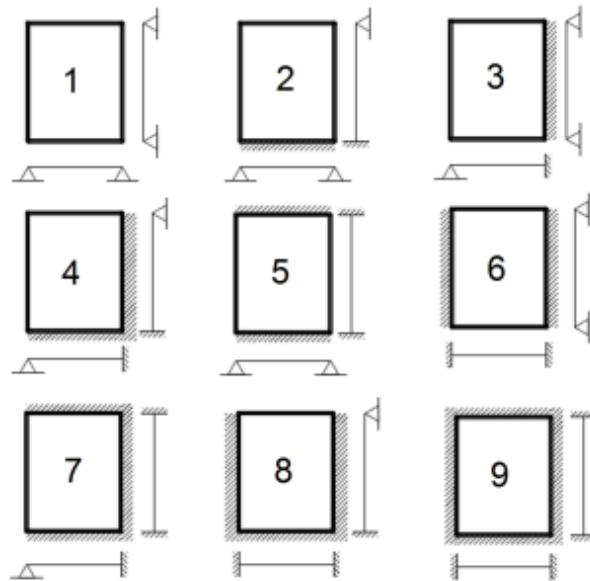
$\lambda > 2$  : laje armada em duas direções.

#### 2.4.1.4 Vinculação

Dentro da análise estrutural, Araújo (2010), classifica o cálculo das solicitações de uma laje como um processo árduo, afirmando ainda que para isso, são utilizados softwares rebuscados que aplicam métodos numéricos para a definição desses esforços, porém esses softwares também possuem suas limitações, tendo em vista a adoção de modelos teóricos em seus cálculos. Devido a essa dificuldade, Araújo (2010), cita que as lajes são tratadas, para finalidade de cálculo, como elementos isolados, tendo em vista a dificuldade do cálculo de lajes contínuas.

As lajes são consideradas como elementos de placa sujeitos à flexão biaxial e para Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o cálculo de placas consegue fornecer quadros para a determinação de momentos fletores máximos e flechas a partir da geometria e das vinculações das lajes com as demais. Portanto, a consideração das condições de contorno e vinculação são importantes para fins de cálculo e análise estrutural e dessa forma a Figura 14 apresenta as condições de vinculação das lajes, baseadas nas soluções desenvolvidas por Bares (1972).

Figura 14 – Condições de vinculação para lajes

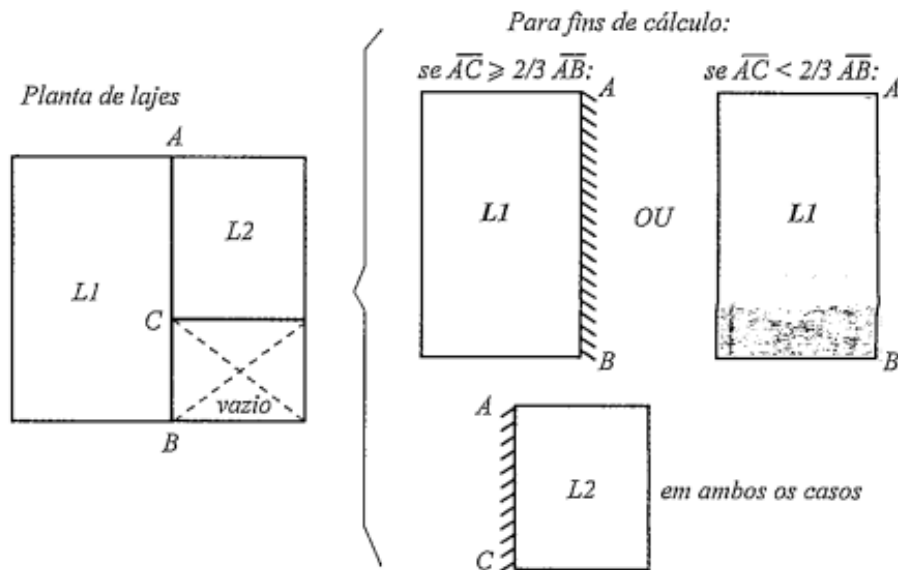


**Fonte:** Bezerra (2017).

As linhas sem hachuras significam afirmar que a laje está apoiada em outra, enquanto a hachura indica o engaste. A partir da identificação do caso em questão utilizando a Figura 14, é possível identificar a interação de uma laje com as outras, determinando sua vinculação. Em resumo, as lajes maiores se encontram apoiadas nas menores, ao mesmo tempo em que as lajes menores e menos rígidas, estão engastadas nas maiores. Clímaco (2008), afirma que em lajes em que não há continuidade em toda a borda entre as lajes, só será considerado engaste se houver  $2/3$  ou mais de continuidade em seu comprimento, não atendendo a essa proporção, deve-se considerar a vinculação como apoio simples.

Figura 15 – Condições de vinculação

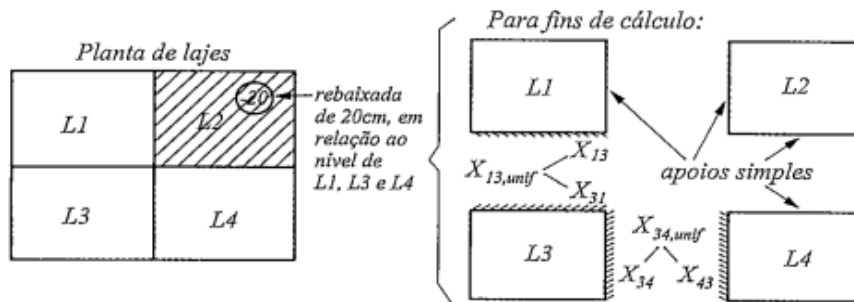




Fonte: Clímaco (2008).

Clímaco (2008), considera ainda, que em lajes com níveis diferentes, não se deve considerar a existência de continuidade, mas sim de apoio simples entres as lajes.

Figura 16 – Condições de vinculação para lajes com níveis diferentes



Fonte: Clímaco (2008).

De posse dos vãos efetivos, da classificação quanto a armadura em uma ou duas direções e a vinculação da laje, a próxima etapa é a de pré-dimensionamento, para determinar as primeiras dimensões do elemento.

#### 2.4.1.5 Módulo de elasticidade

A NBR 6118 (ABNT, 2014), apresenta em seu item 8.2.8, em sua Tabela 8.1, valores estimados para o módulo de deformação tangente inicial ( $E_{ci}$ ) e para o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ). Os valores são apresentados na Tabela e são função da resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ).

Tabela 4 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto

<b>Classe de resistência</b>	<b>C20</b>	<b>C25</b>	<b>C30</b>	<b>C35</b>	<b>C40</b>	<b>C45</b>	<b>C50</b>	<b>C60</b>	<b>C70</b>	<b>C80</b>	<b>C90</b>
<b>E<sub>ci</sub> (GPa)</b>	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
<b>E<sub>cs</sub> (GPa)</b>	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47

Fonte: Adaptado da Tabela 8.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

#### 2.4.1.6 Aço de armadura passiva

A NBR 6118 (ABNT, 2014), cita que nas estruturas de concreto armado o aço a ser utilizado deve seguir as recomendações da NBR 7480/2007, utilizando os aços das categorias CA-25, CA-50 e CA-60 com suas respectivas resistências características.

Tabela 5 – Resistência característica de escoamento do aço

<b>Categoria</b>	<b>Resistência característica de escoamento (MPa)</b>
CA-25	250
CA-50	500
CA-60	600

Fonte: Adaptado da Tabela B3 da NBR 7480 (ABNT, 2007).

#### 2.4.1.7 Classes de concreto

As classes de concreto que se aplicam à NBR 6118 (ABNT, 2014), estão citadas e compreendidas na NBR 8953/2015, e são apresentadas na Tabela 6, com suas resistências características à compressão em MPa.

Tabela 6 – Classes de resistência do grupo I

<b>Grupo I de resistência</b>	<b>Resistência característica à compressão (MPa)</b>
C20	20
C25	25
C30	35
C40	40

Fonte: Adaptado da Tabela 1 da NBR 8953 (ABNT, 1992).

#### 2.4.2 Pré-dimensionamento

Para definição das ações das cargas a qual a laje estará sujeita, é necessário a consideração da altura  $h$  da laje, para definição da primeira parcela considerada nos cálculos de ações permanentes (peso próprio). Como será visto posteriormente, o cálculo do peso próprio é função da altura da laje, sendo assim, é necessário a definição da espessura no início do projeto, para efeitos de estudo de pré-dimensionamento. Posteriormente, com a determinação das cargas se necessário for, para atendimentos dos estados de utilização, pode ser feita a correção da altura pré-dimensionada fixada nas etapas iniciais.

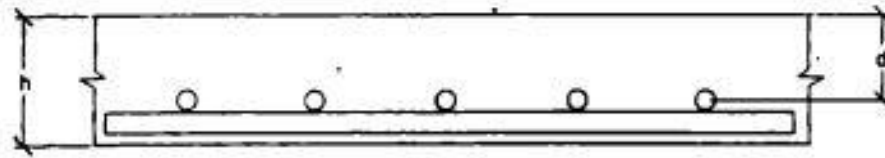
A NBR 6118 (ABNT, 2014), apresenta dimensões mínimas de espessuras a serem utilizadas em lajes maciças, conforme é apresentado:

- a. 7 cm para cobertura não em balanço;
- b. 8 cm para laje de piso não em balanço;
- c. 10 cm para lajes em balanço;
- d. 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30kN;
- e. 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30kN;
- f. 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com no mínimo  $l/42$  para lajes de piso biapoiadas e  $l/50$  para lajes de piso contínuas;

g. 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

Para Carvalho e Figueiredo Filho (2014), a altura  $h$  de uma laje maciça pode ser definida como a soma da altura útil estimada com o cobrimento e as bitolas transversais e longitudinais, a depender da armação disposta na laje. A Figura 17, exemplifica a altura útil e total de uma laje. Para Clímaco (2008), a altura útil de uma laje é a distância da fibra mais comprimida ao centro de gravidade da armadura principal.

Figura 17 – Altura útil e total



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

Para lajes onde a relação  $\frac{l_y}{l_x} > 2$ , se configurando, portanto, como uma laje de geometria retangular armada em apenas uma de suas direções, no cálculo de sua altura não será somada a parcela de bitola transversal, conforme apresenta a Equação (3), onde  $d$  é altura estimada,  $c$  é o cobrimento conforme Tabela 3 do item 2.4.1.1, e  $\phi l$  a bitola da armadura longitudinal.

$$h = d + c + \frac{\phi l}{2} \quad (3)$$

Diferentemente das lajes armadas em duas direções ( $\frac{l_y}{l_x} \leq 2$ ), onde as duas parcelas são devidamente somadas, conforme a Equação (4), onde é somado o valor da armadura transversal ( $\phi t$ ).

$$h = d + c + \phi t + \frac{\phi l}{2} \quad (4)$$

A altura útil estimada  $d$ , apresentada nas equações anteriores, pode ser calculada para lajes com bordas apoiadas ou engastadas a partir da equação apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Altura estimada

$$\text{destimado} = \frac{(2,5 - 0,1n) \times l^*}{100}$$

onde,

$n$  – número de bordas engastadas

$$l^* \leq \begin{cases} l_x \\ 0,7l_y \end{cases}$$

Fonte: Autor (2021).

De posse dos resultados de pré-dimensionamento, é possível obter a altura para fins de cálculo das ações atuantes, visto que, conforme fora dito anteriormente, o peso próprio é a primeira parcela das ações a serem consideradas, sendo assim, os valores das dimensões devem ser conhecidos.

#### 2.4.3 Cálculos das ações atuantes

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), na análise de uma estrutura devem ser consideradas todas as ações que tenham influência e possam gerar efeitos para a segurança da estrutura e os atendimentos dos estados limites aplicados. As ações consideradas na NBR 6118 (ABNT, 2014) são divididas em permanentes, variáveis e excepcionais. Segundo afirma Araújo (2010), as cargas permanentes acontecem de maneira constante, variando pouco durante toda a vida útil da edificação, enquanto as cargas acidentais variam e de maneira significativa, durante esta vida útil. Para a NBR 6118 (ABNT, 2014), também são consideradas ações permanentes aquelas que no decorrer do tempo aumentam, tendendo a um valor-limite constante. A norma afirma ainda que os valores das ações permanentes devem ser os mais desfavoráveis em relação a segurança.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), para carga por metro quadrado de uma laje, devem ser levadas em consideração as seguintes ações: peso próprio da estrutura; carga acidental, com seus valores contidos na ABNT NBR 6120:2019; peso do revestimento inferior; peso do contrapiso; peso dos pisos ou revestimentos. Para consideração do cálculo das cargas, a NBR 6120 (ABNT, 2019), faz as devidas considerações sobre cargas para cálculos de estruturas de edificações, fixando condições exigidas para determinação dos valores das cargas que devem ser consideradas no projeto. Para a NBR 6120 (ABNT, 2019),

as cargas permanentes ( $g$ ) consideram o peso próprio da estrutura e o peso de todos os elementos construtivos fixos e permanentes, enquanto as cargas acidentais ( $q$ ) abrangem as cargas que atuam de acordo com o uso da edificação (pessoas, móveis, veículos etc.).

#### 2.4.3.1 Ações permanentes

Para o cálculo das cargas permanentes ( $g$ ), são considerados os valores apresentados na NBR 6120 (ABNT, 2019), para determinar os pesos específicos utilizados para cada material. Dessa forma, em conjunto com a altura determinada conforme o item 2.4.2, pode-se determinar a primeira carga atuante na edificação, o peso próprio da estrutura.

Conforme Araújo (2010), o peso próprio de uma laje é dado através de um elemento de área unitária, sendo o volume para  $1 \text{ m}^2$  de laje igual a  $h \text{ m}^3$ . O peso próprio da laje ( $g_1$ ) é definido como o produto do peso específico do concreto armado pela altura  $h$  da laje. O peso específico do concreto armado é definido na Tabela 1 de peso específico aparente dos materiais de construção da NBR 6120 e é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Peso específico aparentes dos materiais de construção

Material		Peso específico aparente $\gamma_{ap}$ $\text{kN/m}^3$
3 Argamassas e concretos	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cal	12 a 18 (15)
	Argamassa de cimento e areia	19 a 23 (21)
	Argamassa de gesso	12 a 18 (15)
	Argamassa autonivelante	24
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25

Fonte: Adaptado da NBR 6120 (ABNT, 2019).

Sendo assim, conforme a Tabela 7, o peso específico do concreto armado é de  $25 \text{ kN/m}^3$ , portanto, o peso próprio da laje ( $g_1$ ) é dado pela Equação (5).

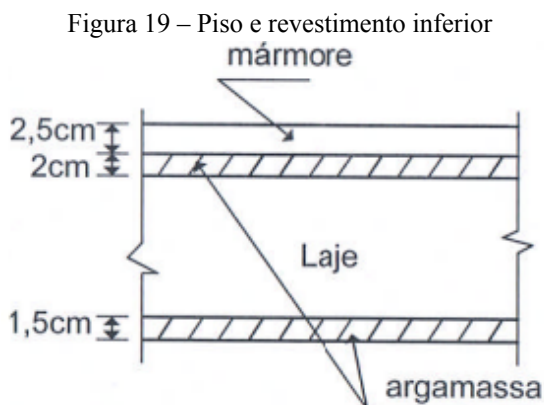
$$g_1 = \gamma_{ca} \times h \quad (5)$$

Onde:

$\gamma_{ca}$  : peso específico do concreto armado [ $\text{kN/m}^3$ ];

$h$  : altura da laje em metros [m].

Para cálculo do peso do revestimento ( $g_2$ ), deve-se considerar o material de revestimento do piso, a argamassa de revestimento e o revestimento inferior da laje



Fonte: Araújo (2010).

Por exemplo, adotando-se como material a placa de mármore, obtém-se da Tabela 8, valor de 28 kN/m<sup>3</sup>.

Tabela 8 – Peso específico aparente das rochas

Material	Peso específico aparente $\gamma_{ap}$ kN/m <sup>3</sup>	
<b>1 Rochas Naturais</b>	<b>Arenito</b>	21 a 27 (24)
	<b>Ardósia</b>	28
	<b>Basalto, diorito, gabro</b>	27 a 31 (29)
	<b>Calcário denso</b>	20 a 29 (24,5)
	<b>Gnaise</b>	30
	<b>Granito, sienito, pórfiro</b>	27 a 30 (28,5)
	<b>Lava basáltica</b>	24
	<b>Mármore e calcário</b>	28
	<b>Outros calcários</b>	20
	<b>Taquilito</b>	26

Fonte: Adaptado da NBR 6120 (ABNT, 2019).

Dessa forma, considerando também a espessura do piso, pode-se calcular o efeito de carga provocado para esse tipo de piso.

$$g_{2.1} = \gamma_{piso} \times h_{piso} \quad (6)$$

onde:

$\gamma_{piso}$  : peso específico do piso tipo placa de mármore;

$h_{\text{piso}}$  : espessura da placa em metros.

Para o revestimento de argamassa, basta verificar a Tabela 7 e identificar o peso específico da argamassa de cimento e areia ( $21 \text{ kN/m}^3$ ) e aplicar na Equação (7).

$$g_{2.2} = \gamma_{\text{argamassa}} \times h_{\text{argamassa}} \quad (7)$$

Por fim, para cálculo do revestimento inferior, considera-se também um revestimento de argamassa e sua respectiva espessura. Aplicando a Equação (8) obtém-se:

$$g_{2.3} = \gamma_{\text{revinf}} \times h_{\text{revinf}} \quad (8)$$

Concluindo, para o cálculo total das ações de revestimento ( $g_2$ ), devem ser somados  $g_{2.1}$  (peso do piso de placas de mármore),  $g_{2.2}$  (peso da argamassa de revestimento) e  $g_{2.3}$  (peso do reboco inferior), para determinar a carga total considerada nas ações provenientes do peso do piso.

Da mesma forma, para definição das ações de revestimento, utilizando a Tabela 9 (Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais), considerando uma espessura total em centímetros para o piso, a norma fornece um peso de revestimento ( $g_2$ ).

Tabela 9 – Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais

Material	Espessura cm	Peso kN/m <sup>2</sup>
Impermeabilização com a manta asfáltica simples (apenas manta com 15 % de sobreposição e pintura asfáltica, sem camada de regularização nem proteção mecânica)	0,3	0,08
	0,4	0,1
	0,5	0,11
Piso elevado interno com placas de aço, sem revestimento (até 30cm de altura)	-	0,5
Piso elevado interno com placas de polipropileno, sem revestimento (até 30cm de altura)	-	0,15
Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais ( $\gamma_{\text{ap}} = 20 \text{ kN/m}^3$ )	5	1
	7	1,4
Revestimentos de pisos de edifícios industriais ( $\gamma_{\text{ap}} = 34 \text{ kN/m}^3$ )	5	1,7
	7	2,4
Impermeabilizações em coberturas com manta asfáltica e proteção mecânica, sem revestimento ( $\gamma_{\text{ap}} = 18 \text{ kN/m}^3$ )	10	1,8
	15	2,7



**Fonte:** Adaptado da NBR 6120 (ABNT, 2019).

Para efeitos de cálculo, a NBR 6120 (ABNT, 2019), fornece valores de cargas para determinados tipos de forro (Tabela 10). Sendo assim, é possível determinar o peso do forro ( $g_3$ ).

Tabela 10 – Forros, dutos e sprinkler

<b>Material</b>	<b>Peso kN/m<sup>2</sup></b>
<b>Forro de fibra mineral, inclui estrutura de suporte</b>	0,1
<b>Forro de gesso acartonado, inclui estrutura de suporte</b>	0,25
<b>Forro de gesso em placas, inclui estrutura de suporte</b>	0,15
<b>Forro de PVC, inclui estrutura de suporte</b>	0,1
<b>Forro de placas de alumínio, inclui estrutura de suporte</b>	0,1
<b>Dutos de ventilação, sem isolamento térmico</b>	0,2
<b>Dutos de ar-condicionado, com isolamento térmico</b>	0,3
<b>Rede de distribuição de chuveiros automáticos (sprinkler) com diâmetro nominal de até 65 mm</b>	0,1
<b>Rede de distribuição de chuveiros automáticos (sprinkler) com diâmetro nominal de até 80 mm</b>	0,15

**Fonte:** Adaptado da NBR 6120 (ABNT, 2019).

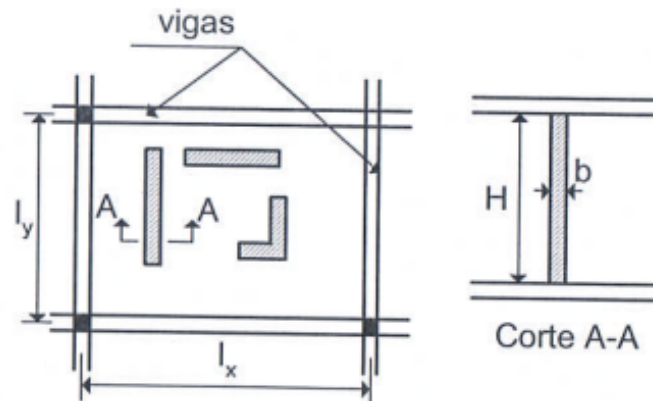
Para cálculo das cargas de alvenaria, Araújo (2010), afirma que o peso específico da alvenaria varia, a depender do tipo de tijolo a ser utilizado, bem como da espessura do reboco e da argamassa de revestimento. Em projeto, para alvenaria de tijolo cerâmico furado, adota-se o valor de 13 kN/m<sup>3</sup>, enquanto para alvenaria de tijolo cerâmico maciço, o valor adotado é de 18 kN/m<sup>3</sup>.

As lajes são elementos que recebem esforços diretos e nem sempre os projetos terão situações em que as alvenarias estejam todas alinhadas com as vigas, sendo necessário considerar o esforço direto na laje proveniente da alvenaria. A consideração da carga depende ainda da disposição da armadura da laje.

### Laje armada em duas direções

Para Araújo (2010), no caso de uma alvenaria que não estiver locada na região de centro, ou se existirem várias alvenarias dispostas na laje, o peso total a ser considerado pode ser distribuído de maneira uniforme pela área da laje, conforme é exposto na Figura 20.

Figura 20 – Alvenarias dispostas em lajes armadas em duas direções



Fonte: Araújo (2010).

Diante o exposto, para a situação citada, o cálculo da carga se dá pela Equação (9).

$$g_{alv} = \frac{P_{alv} \times l_{alv} \times h_{alv}}{l_x \times l_y} \quad (9)$$

onde:

$g_{alv}$  = carga permanente da alvenaria, em kN/m<sup>2</sup>;

$\gamma_{alv}$  = peso específico da alvenaria, em kN/m<sup>3</sup>;

$b_{alv}$  = espessura da alvenaria, em metros;

$H_{alv}$  = altura da alvenaria, em metros;

$l_{alv}$  = comprimento total da alvenaria, em metros;

$l_x$  = menor vão teórico da laje, em metros;

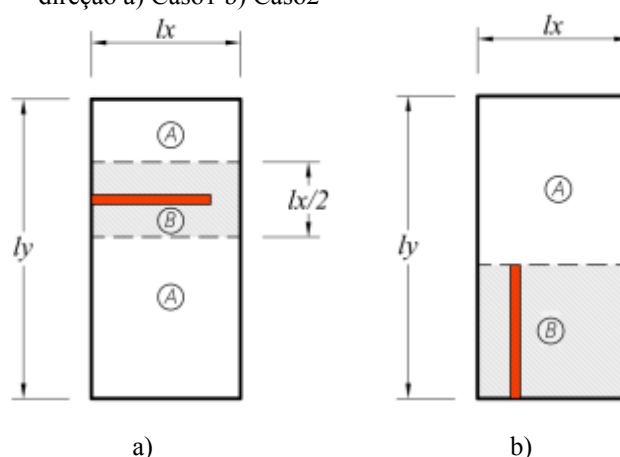
$l_y$  = maior vão teórico da laje, em metros.

Araújo (2010), ainda informa que na ocasião em que houver uma parede no centro de uma laje, este procedimento adotado pode se tornar inviável quanto à segurança.

### Laje armada em uma direção

Existem dois casos distintos para lajes armadas em uma direção. Nesta situação, a parede pode estar paralela ao menor vão (Caso1) ou ainda, a parede pode estar perpendicular ao menor vão (Caso 2). Clímaco (2008), cita que para o Caso 1, é necessário considerar a carga da alvenaria como uma carga distribuída na região de influência, enquanto para o autor, no Caso 2 a carga é considerada concentrada em uma faixa de largura unitária. A apresenta a disposição das alvenarias conforme os casos 1 e 2 (Figura 21).

Figura 21 – Alvenarias dispostas em lajes armadas em uma direção a) Caso1 b) Caso2



**Fonte:** Adaptada de Clímaco (2008).

O cálculo das ações do Caso1 e Caso 2 é dado pelas Equações (10) e (11) respectivamente.

$$g_{alv} = \frac{P_{alv} \times l_{alv} \times h_{alv}}{l_x \times l_y} \quad (10)$$

onde:

$g_{alv}$  = carga permanente da alvenaria, em kN/m<sup>2</sup>;

$\gamma_{alv}$  = peso específico da alvenaria, em kN/m<sup>3</sup>;

$b_{alv}$  = espessura da alvenaria, em metros;

$H_{alv}$  = altura da alvenaria, em metros;

$l_{alv}$  = comprimento total da alvenaria, em metros;

$l_x$  = menor vão teórico da laje, em metros.

$$g_{alv} = \gamma_{alv} \times b_{alv} \times H_{alv} \quad (11)$$

onde:

$\gamma_{alv}$  = peso específico da alvenaria, em kN/m<sup>3</sup>;

$b_{alv}$  = espessura da alvenaria, em metros;

$H_{alv}$  = altura da alvenaria, em metros.

#### 2.4.3.2 Ações variáveis

As ações variáveis, segundo a NBR 8681 (ABNT, 2003), são definidas como valores que variam de maneira significativa durante a vida útil da construção. As cargas variáveis são constituídas por cargas acidentais que estão condicionadas ao seu uso. A NBR 6120 (ABNT, 2019), traz em sua Tabela 11 valores característicos para cargas variáveis, estabelecendo que as estruturas projetadas devem suportar essas cargas dispostas em sua tabela. A Tabela 11 apresenta alguns valores mínimos para cargas acidentais retirados da NBR 6120 (ABNT, 2019).

Tabela 11 – Valores característicos nominais das cargas variáveis

<b>Local</b>	<b>Carga uniformemente distribuída kN/m<sup>2</sup></b>
<b>Dormitórios, sala, copa, cozinha, sanitários</b>	1,5
<b>Despensa, área de serviço e lavanderia</b>	2
<b>Escadas</b>	2,5
<b>Forros (sem acesso a pessoas)</b>	0,5
<b>Terraços</b>	2

Fonte: Adaptado da Tabela 10 da NBR 6120 (2019).

#### 2.4.4 Combinação de ações

No dimensionamento de uma estrutura, é necessário obter as solicitações existentes em decorrência das ações atuantes, para que, dessa forma seja possível realizar a

análise estrutural do projeto. O processo de análise dos esforços fletores e cortantes é feito então mediante as combinações de ações, para conseqüentemente, ser realizado o dimensionamento. Neste caso, o dimensionamento é feito no ELU com as combinações de estado limite último e posteriormente, é feito a verificação das flechas no ELS, com as combinações de estado limite de serviço.

Para Carvalho e Filho (2014), as combinações devem ser feitas para determinar as condições mais desfavoráveis de uma a estrutura, a fim de se verificar o atendimento aos estados limites ELU e ELS. O autor supracitado, informa ainda que nas combinações, as ações permanentes devem sempre ser consideradas totalmente, enquanto nas ações variáveis se consideram apenas as parcelas mais desfavoráveis. Como fora dito, no ELU, estado onde a peça estrutural não garante mais funcionalidade segura sem evitar ruína, as combinações de ação são denominadas de combinações última. Em seu item 11.8.2, a NBR 6118 (ABNT, 2014), classifica as combinações últimas em normal, especial ou de construção e excepcional.

Nas combinações últimas normais, Carvalho e Filho (2014), citam que das ações variáveis, uma é considerada principal, sendo seu valor característico  $F_k$ , enquanto as demais (secundárias) atuam com seus valores reduzidos de combinação  $F_k \psi_o$ . Já nas combinações últimas especiais ou de construção, a NBR 8681 (ABNT, 2003), pondera que as ações variáveis quando existentes, a ação variável especial deve ser considerada com seu valor representativo, enquanto para as demais ações devem-se considerar valores correspondentes a uma probabilidade não desprezível de ação concomitante com a ação especial. A norma ainda cita que para combinações últimas excepcionais, deve se seguir o mesmo raciocínio das combinações especiais, com a ação especial sendo considerada com seu valor representativo, mas com a diferença de que a probabilidade considerada para ação simultânea das demais ações com a ação excepcional, é uma probabilidade grande. As combinações últimas normais são as mais utilizadas no dimensionamento no ELU e a Tabela 12 apresenta os coeficientes de ponderação  $\gamma_c$  para o concreto e  $\gamma_s$  para o aço, de acordo com combinação do estado limite último, inclusive a combinação última normal.

Tabela 12 – Coeficientes de ponderação das resistências no estado limite último

<b>Combinações</b>	<b><math>\gamma_c</math></b>	<b><math>\gamma_s</math></b>
<b>Normais</b>	1,4	1,15
<b>Especiais ou de construção</b>	1,2	1,15
<b>Excepcionais</b>	1,2	1

**Fonte:** Adaptado da tabela 12.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014)

Dessa forma, tendo em vista as ações atuantes permanentes citadas no item 2.4.3.1 e as ações variáveis citadas no item posterior (2.4.3.2), a combinação de ações para o estado limite último normal é dado pela Equação (12).

$$CELU = \gamma_c \times (g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + q_1) \quad (12)$$

onde:

$g_1$  = carga devido a atuação do peso próprio, em kN/m<sup>2</sup>;

$g_2$  = carga devido a atuação do revestimento, em kN/m<sup>2</sup>;

$g_3$  = carga devido a atuação do forro, em kN/m<sup>2</sup>;

$g_4$  = carga devido a atuação da alvenaria, em kN/m<sup>2</sup>;

$q_1$  = carga devido a atuação da carga variável, em kN/m<sup>2</sup>;

$\gamma_c$  = coeficiente de ponderação da resistência do concreto, constante.

As combinações do ELS, verificam a funcionalidade estética da peça considerando a deformação da peça através do cálculo de sua flecha. A NBR 6118 (ABNT, 2014), classifica as combinações de serviço de acordo com sua permanência da estrutura, dividindo-as em combinações de serviço quase permanente, frequentes e raras. As combinações de serviço quase permanentes, podem atuar durante grande parte da vida útil da estrutura e nessa combinação todas as ações variáveis ( $q$ ) são consideradas com seus valores quase permanentes, tendo seus valores característicos multiplicados pelo fator de redução quase permanente ( $\psi_2$ ). A NBR 6118 (ABNT, 2014), pondera que as combinações frequentes se repetem muitas vezes durante a vida útil da estrutura e nessa combinação, a ação variável principal tem seu valor multiplicado pelo coeficiente de redução de combinação frequente ( $\psi_1$ ), enquanto as demais ações são consideradas como quase permanentes. As combinações de serviço raras acometem apenas algumas vezes a estrutura e segundo Araújo (2010), afirma em sua obra, é somente de interesse para estruturas de concreto armado as combinações quase permanentes e frequentes. Mas de qualquer forma, a NBR 6118 (ABNT, 2014), explica que na combinação de serviço rara, a ação de caráter principal admitida com seu próprio valor característico, enquanto as demais são consideradas como frequentes.

Para avaliação da peça em serviço, deve-se atentar para a comprovação de que não há a ocorrência dos estados limites de serviço ou utilização, evitando a ocorrência de deformações excessivas e fissuras inaceitáveis. Portanto, os estados limites a serem considerados na verificação da peça em serviço, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), são: estado-limite de formação de fissuras ELS-F, estado-limite de abertura das fissuras ELS-W, estado-limite de deformações excessivas ELS-DEF e estado-limite de vibrações excessivas ELS-VE. A Tabela 13 é uma adaptação da tabela 11.2 da NBR 6118/2014 e apresenta os coeficientes de redução citados para as combinações.

Tabela 13 – Coeficientes para redução das ações variáveis

Ações		$\gamma$		
		$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Cargas acidentais de edifícios	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 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
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

Fonte: Adaptado da tabela 11.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014)

A Equação (13) apresenta a combinação de ações no ELS, que a depender do coeficiente para redução de ações variáveis, pode ser uma combinação quase frequente ( $\Psi_2$ ) ou uma combinação frequente ( $\Psi_1$ ).

$$CELS = (g_1 + g_2 + g_3 + g_4) + \Psi_n \times q_1 \quad (13)$$

onde:

$g_1$  = carga devido a atuação do peso próprio, em kN/m<sup>2</sup>;

$g_2$  = carga devido a atuação do revestimento, em kN/m<sup>2</sup>;

$g_3$  = carga devido a atuação do forro, em kN/m<sup>2</sup>;

$g_4$  = carga devido a atuação da alvenaria, em kN/m<sup>2</sup>;

$q_1$  = carga devido a atuação da carga variável, em kN/m<sup>2</sup>;

$\psi_n$  = coeficiente de redução para ações variáveis (Tabela 13).

#### 2.4.5 Análise estrutural

A fim de se obterem os esforços internos para dimensionamento da estrutura, o modelo estrutural é submetido à etapa de análise estrutural, para que, mediante a utilização das cargas obtidas através das combinações de ações, sejam determinados os momentos fletores e as reações da laje na viga. Essa etapa é importante para o dimensionamento no ELU e verificação no ELS, como consta na NBR 6118:2019.

A análise parte da classificação da armação da laje, com fora visto anteriormente, as lajes podem ser armadas em uma ou duas direções e para definição da armação, deve ser utilizada a relação entre os vãos teóricos (Equação (2)). Lembrando que, para esta relação, quando o valor de  $\lambda$  for menor que ou igual a 2, a laje será, portanto, armada em duas direções e quando o valor de  $\lambda$  for maior que 2, a laje deverá ser armada no seu menor vão, onde se encontrarão os momentos mais relevantes.

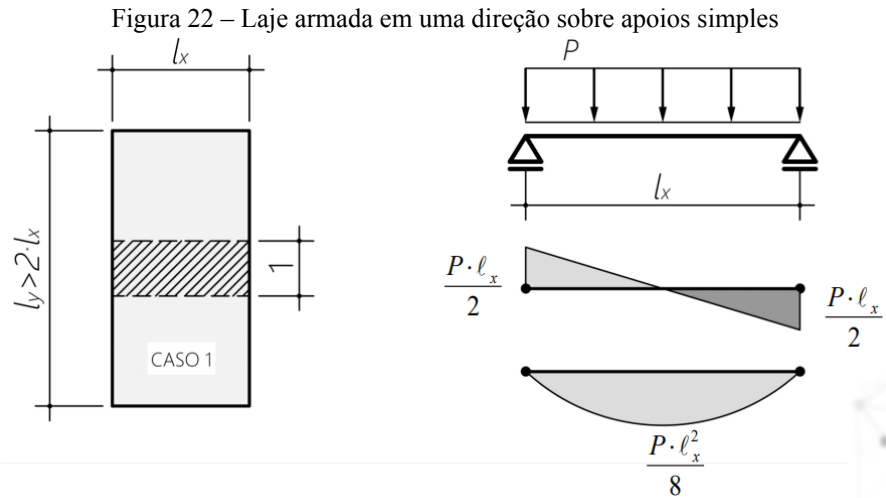
##### 2.4.5.1 Análise estrutural de lajes armadas em uma direção

Na laje armada em uma direção, para análise estrutural, a mesma pode ser considerada como sendo uma viga de faixa unitária. Araújo (2010), afirma que essa simplificação em considerar uma faixa de largura unitária para o cálculo de uma laje armada em uma direção está a favor da segurança e o momento fletor obtido é como o do cálculo de uma viga, também de faixa unitária. Como os momentos fletores preponderantes estão no menor vão, os momentos do vão secundários serão desprezados.

Além da armação, deve ser considerado também o caso de vinculação do elemento de acordo com as variações possíveis dos vínculos (Figura 14). Diante o exposto, são apresentados os Casos 1, 2, 3 e 4; onde são apresentadas as equações para o cálculo de

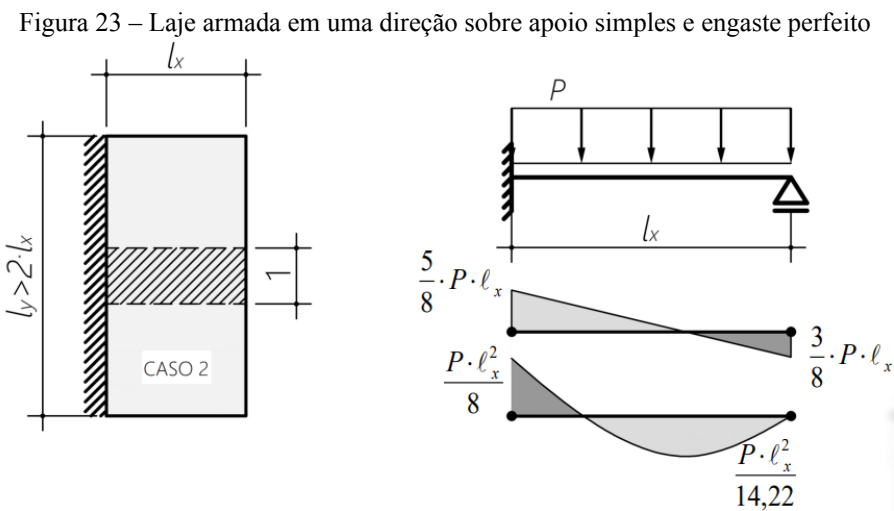


momentos fletores, esforços cortantes e flechas máximas (Tabela 14). O Caso 1 trata-se de uma laje armada em uma direção biapoiada em apoios simples (Figura 22).



Fonte: Barreto (2019).

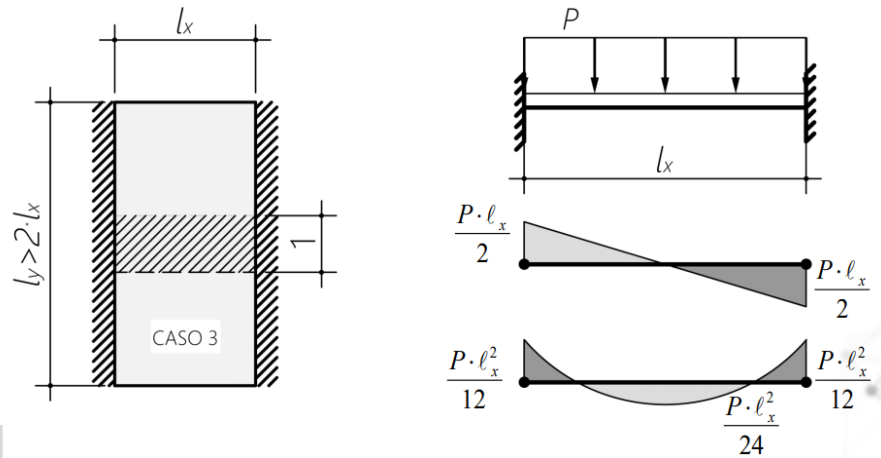
No Caso 2, a laje se encontra apoiada e engastada, com momento negativo na região de engaste e o momento positivo no vão da laje (Figura 23).



Fonte: Barreto (2019).

No Caso 3, a laje encontra-se engastada dos dois lados, de forma que se tenham momentos negativos iguais nas duas bordas e momento positivo no meio do vão (Figura 24).

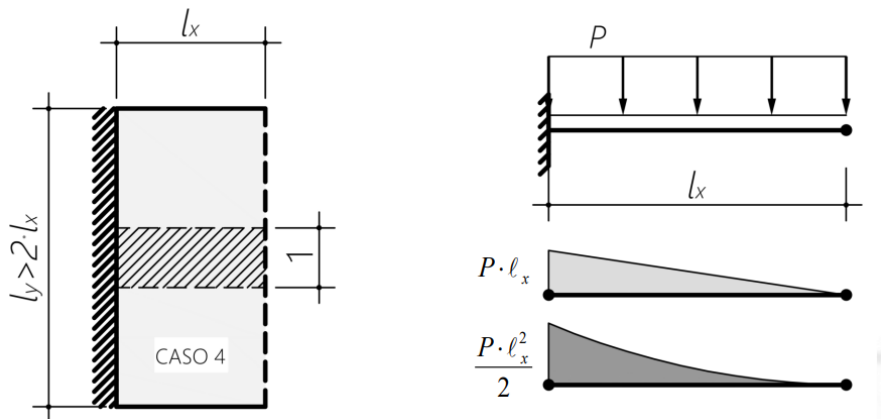
Figura 24 – Laje armada em uma direção sobre apoios com engastamento perfeito



Fonte: Barreto (2019).

Por fim, no Caso 4 a laje se encontra em balanço (Figura 25).

Figura 25 – Laje armada em uma direção em balanço.



Fonte: Barreto (2019).

As expressões para cálculos dos esforços representados nas figuras são dadas na Tabela 14, juntamente com as expressões para cálculo das flechas máximas.

Tabela 14 – Equações para análise estrutural de laje armada em uma direção

Caso	Momento fletor		Reação da viga na laje		Flecha máxima
	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	
	$m_x$	$m_{x'}$	$q_x$	$q_{x'}$	
					$\delta$

1		-			
2					
3					
4	-			-	

Fonte: Autoria própria (2021).

onde:

$mx$  = momento fletor máximo positivo, em kNm;

$mx'$  = momento fletor máximo negativo, em kNm;

$qx$  = reação positiva da viga na laje, em kN;

$qx'$  = reação negativa da viga na laje, em kN;

$\delta$  = flecha máxima, em metros;

$P$  = carga, em kN/m<sup>2</sup>;

$l_x$  = menor vão teórico da laje, em metros;

$E$  = módulo de elasticidade, em kN/m<sup>2</sup>;

$I$  = momento de inércia, m<sup>4</sup>

#### 2.4.5.2 Análise estrutural de lajes armadas em cruz

Para análise dos esforços de uma laje armada em duas direções, Araújo (2010), afirma que o cálculo é um problema consideravelmente complexo por conta de as lajes serem elementos de placa sujeitos à flexão biaxial. Existem alguns métodos adotados para o cálculo e dentre eles, está a teoria de flexão das placas. Araújo (2010), cita que para esta teoria o material é considerado como um material elástico e a solução do problema se dá através da resolução de uma equação diferencial de quarta ordem.

Segundo Carvalho e Filho (2014), o método elástico, clássico ou linear, também designado por teoria das placas ou teoria de Kirchhoff, é fundamentado em equações de equilíbrio de um elemento infinitesimal de placa delgada e nas relações de compatibilidade de deformação. Carvalho e Filho (2014), elencam ainda algumas hipóteses de cálculo do método:

- a) É considerado que as placas têm em sua constituição material homogêneo, elástico, isotrópico, linear fisicamente e com pequenos deslocamentos;

- b) A seção plana permanece plana após a deformação;
- c) Na ação das placas nas vigas ocorrem somente forças verticais, não existindo momento de torção;
- d) A ações das placas nas vigas são distribuídas de maneira uniforme, sem transmissão direta para os pilares;
- e) As vigas de contorno não sofrem deslocamento na direção vertical;
- f) A rotação das placas é livre no apoio simples ou totalmente impedida no engaste.

Diante do exposto, a equação diferencial fundamental das placas delgadas submetidas as uma carga  $p(x, y)$  é:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{-p(x,y)}{D} \quad (14)$$

onde:

$w$  = deslocamento vertical;

$x, y$  = coordenadas de um ponto genérico da placa;

$D$  = rigidez à flexão da placa;

$p$  = carga atuante.

Como fora dito anteriormente no tópico 2.4.1.4 (Vinculação), para a teoria da elasticidade existem quadros práticos para determinação dos esforços, levando em conta a geometria (Equação(2) e as vinculações (Figura 14), analisando as placas como elementos isolados, discretizando o pavimento, conforme citam Carvalho e Figueiredo Filho (2014). Conforme o estabelecido pela NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), o coeficiente de Poisson utilizado para análise linear de estruturas de placa com ou sem redistribuição é de 0,2. Portanto, de maneira a simplificar o processo, serão utilizados os quadros desenvolvidos por Bares (1972), com as devidas adaptações do coeficiente de Poisson.

Com a utilização dos quadros dos anexos A, B e C, podem-se determinar os coeficientes tabelados por Bares (1972), para o cálculo de momentos fletores em ambas as direções das lajes. Os momentos fletores máximos positivos serão designados pela letra  $m$  e os negativos pela letra  $m'$ . Dessa forma os momentos máximos positivos, por unidade de comprimento, em  $x$  e  $y$  são fornecidos pelas Equações (15) e (16).

$$m_x = \mu_x \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} \quad (15)$$

$$m_y = \mu_y \cdot \frac{p \cdot l_y^2}{100} \quad (16)$$

onde:

$m_x$  = momento máximo positivo na direção x, em kNm;

$m_y$  = momento máximo positivo na direção y, em kNm;

$\mu_x$  = coeficiente fornecido pelo quadro (ANEXOS A, B e C);

$\mu_y$  = coeficiente fornecido pelo quadro (ANEXOS A, B e C);

$p$  = carga atuante, em kN/m<sup>2</sup>;

$l_x$  = menor vão teórico da laje, em metros;

$l_y$  = menor vão teórico da laje, em metros.

Já os momentos máximos negativos, por unidade de comprimento, em x e y são fornecidos pelas Equações (17) e (18).

$$m'_x = \mu'_x \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} \quad (17)$$

$$m'_y = \mu'_y \cdot \frac{p \cdot l_y^2}{100} \quad (18)$$

onde:

$m'_x$  = momento máximo negativo na direção x, em kNm;

$m'_y$  = momento máximo negativo na direção y, em kNm;

$\mu'_x$  = coeficiente fornecido pelo quadro (ANEXOS A, B e C);

$\mu'_y$  = coeficiente fornecido pelo quadro (ANEXOS A, B e C);

$p$  = carga atuante, em kN/m<sup>2</sup>;

$l_x$  = menor vão teórico da laje, em metros;

$l_y$  = menor vão teórico da laje, em metros.

Segundo Carvalho e Filho (2014), para lajes com carregamento uniforme e com as devidas condições de contorno e geometria, a flecha de deslocamento transversal máximo da placa é fornecido pela Equação (19). Com os valores tabelados por Bares (ANEXO D), também é possível definir o coeficiente  $\alpha$  utilizado para calcular a flecha elástica.

$$\delta = \frac{p.l_x^4}{E.h^3} \frac{\alpha}{100} \quad (19)$$

onde:

$\delta$  = flecha elástica, em metros;

$\alpha$  = coeficiente fornecido pela tabela de Bares (ANEXO D);

$E$  = módulo de deformabilidade do concreto;

$h$  = altura ou espessura da placa, em metros;

$p$  = carga atuante, em kN/m<sup>2</sup>;

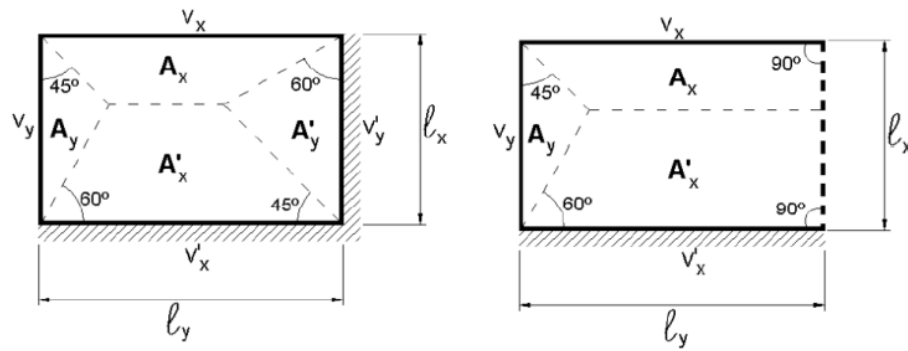
$l_x$  = menor vão teórico da laje, em metros.

De maneira simples, é considerado que a ação das lajes maciças nas vigas é feita de maneira uniforme e a NBR 6118 (ABNT, 2014), em seu item 14.7.6.1, mostra que o cálculo dessas reações é feito mediante a duas aproximações:

- a) as cargas correspondem, às cargas atuantes nas regiões de charneiras plásticas, sendo que, essas reações podem ser de maneira aproximada consideradas uniformemente distribuídas em seus apoios.
- b) As charneiras plásticas são obtidas mediante à análise plástica, entretanto, NBR 6118, afirma que no caso em que não há a análise plástica, essas charneiras podem ser aproximadas por retas inclinadas a partir dos vértices, com ângulos determinados.

Clímaco (2008), cita que deste modo, a laje é dividida em áreas de influência geradas a partir das retas traçadas nos vértices da laje, conforme cita o item b). São utilizados ângulos de 45° para dois apoios do mesmo tipo, ângulos de 60° a partir do apoio engastado se o outro for simplesmente apoiado e 90° a partir do apoio quando o bordo vizinho for livre. A Figura 26 evidencia a divisão da laje em áreas de influência.

Figura 26 – Reação da laje nas vigas



Fonte: Bezerra (2017).

Desse modo, considerando as condições de vinculação e a razão entre os vãos teóricos, as reações nas direções x e y nas vigas com bordas simplesmente apoiadas são calculadas por meio das Equações (20) e (21).

$$q_x = k_x \cdot \frac{p \cdot l_x}{10} \quad (20)$$

$$q_y = k_y \cdot \frac{p \cdot l_x}{10} \quad (21)$$

onde:

$q_x$  = reação nos apoios simples perpendiculares à direção de  $l_x$ , em kN/m;

$q_y$  = reação nos apoios simples perpendiculares à direção de  $l_y$ , em kN/m;

$k_x$  = coeficiente tabelado (ANEXOS E, F e G);

$k_y$  = coeficiente tabelado (ANEXOS E, F e G);

$p$  = carga atuante, em kN/m<sup>2</sup>;

$l_x$  = menor vão teórico da laje, em metros.

As reações nas direções x e y nas vigas em bordas engastadas são calculadas por meios das Equações (22) e (23).

$$q'_x = k'_x \cdot \frac{p \cdot l_x}{10} \quad (22)$$

$$q'_y = k'_y \cdot \frac{p \cdot l_x}{10} \quad (23)$$

onde:

$q'_x$  = reação nos apoios engastados perpendiculares à direção de  $l_x$ , em kN/m;

$q'_y$  = reação nos apoios engastados perpendiculares à direção de  $l_y$ , em kN/m;

$k'_x$  = coeficiente tabelado (ANEXOS E, F e G);

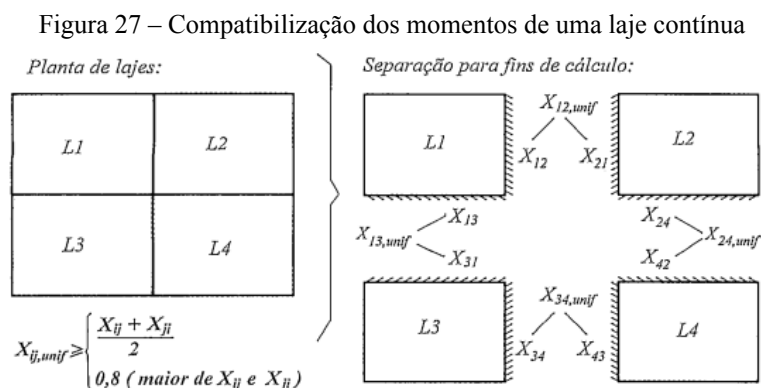
$k'_y$  = coeficiente tabelado (ANEXOS E, F e G);

$p$  = carga atuante, em kN/m<sup>2</sup>;

$l_x$  = menor vão teórico da laje, em metros.

### 2.4.5.3 Compatibilização dos momentos fletores

Com o cálculo dos elementos isolados, deve-se considerar apenas um valor para o momento negativo do bordo comum entre lajes contínuas. No bordo comum, para lajes contínuas, com dois momentos negativos distintos, a NBR 6118 (ABNT, 2014), permite que seja feito a compatibilidade dos momentos negativos, considerando como o único valor para o momento sendo usualmente 80% do maior valor entre os dois momentos. Ainda, para lajes contínuas, onde a diferença entre os vãos for considerável, os momentos positivos também devem ser compatibilizados. Clímaco (2008), afirma que a correção dos momentos positivos pode indicar uma diferença o tanto quanto significativa quando a diferença entre os vãos é maior que 25% (Figura 27).



Fonte: Clímaco (2008).



#### 2.4.6 Dimensionamento à flexão no ELU

O dimensionamento para uma peça em concreto armado fornece uma área de aço necessária para resistir aos esforços solicitantes de flexão simples, no ELU, com o intuito de evitar a ruína da peça. Para o dimensionamento, se considera uma situação desfavorável, considerando um estado onde a peça estaria na iminência de perder sua funcionalidade estrutural – ELU. Sendo assim, as solicitações são majoradas enquanto as resistências são minoradas e dessa forma Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que esse método de cálculo na ruptura dos estados limites (ELU), garante segurança a estrutura, já que as solicitações de cálculo devidamente majoradas são menores que solicitações que colocariam a estrutura em seu estado limite, se os materiais tivessem suas resistências minoradas. As armaduras para flexão simples são calculadas como uma viga com faixa unitária de um metro  $bw = 1$ .

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que o dimensionamento no ELU impõe a peça a alcançar as deformações específicas limites de seus materiais, dessa forma, a estrutura pode alcançar seu estado limite com o esmagamento do concreto comprimido ou o escoamento excessivo do aço tracionado. Os autores ainda afirmam que no estado limite, o momento fletor atuante que a peça consegue resistir é  $\gamma$  maior que o momento que realmente chegará a atuar.

Em seu item 17.2.2, a NBR 6118 (ABNT, 2014), estabelece hipóteses básicas para o dimensionamento na análise dos esforços resistentes a qual a seção está submetida, seja de um pilar ou viga. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), as hipóteses básicas para dimensionamento são:

**a) As seções planas permanecem planas:**

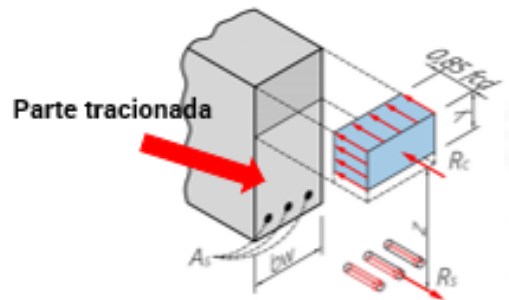
Clímaco (2008), afirma que nessa hipótese de Bernoulli, a seção mesmo com as deformações desde o início do carregamento até as deformações que precedem a ruptura da peça, permanece plana, desprezando que a peça venha a sofrer empenamentos em sua seção.

**b) Deformações no aço e no concreto são iguais:**

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), citam que para esse caso das peças de concreto armado, considera-se que as deformações são iguais devido a solidariedade que existe entre os dois materiais, de maneira que exista uma aderência perfeita entre aço e concreto, ou seja, não existindo escorregamento da barra de aço.

**c) No ELU, a resistência do concreto à tração é desprezada:**

Figura 28 – Região tracionada do concreto

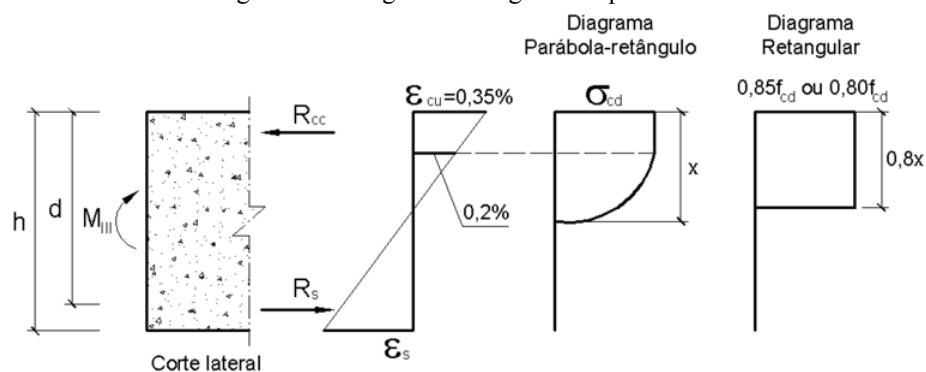


Fonte: Bezerra (2017).

**d) Para efeitos de cálculo, é permitido a utilização de um diagrama retangular de distribuição das tensões no concreto:**

A distribuição das tensões no concreto é feita adotando o diagrama parábola-retângulo (Figura 4), porém, é permitido que se utilize o diagrama retangular mais simples (Figura 29). A NBR 6118 (ABNT, 2014), conclui que as diferenças de resultados obtidos desses dois diagramas são pequenas, portanto, são aceitas.

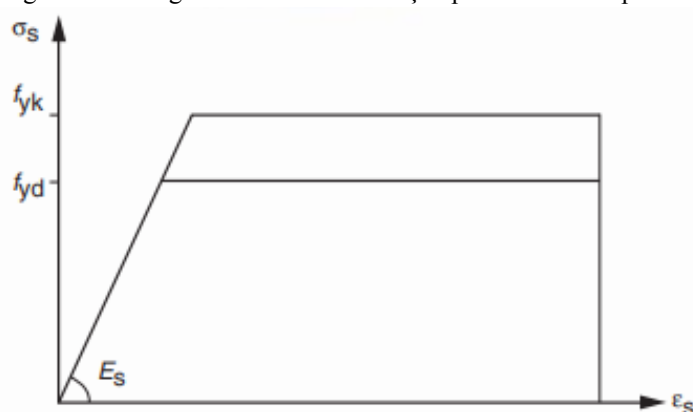
Figura 29 – Diagrama retangular simplificado



Fonte: Bezerra (2017).

- e) A tensão das armaduras deve ser obtida a partir dos diagramas tensão-deformação (Figura 30):

Figura 30 – Diagrama tensão-deformação para armaduras passivas



Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

- f) A peça estará caracterizada em seu estado limite último quando se enquadrar em um dos domínios de deformação da Figura 10:

Clímaco (2008), afirma que para evitar deformações plásticas excessivas, o alongamento máximo da armadura é de 10‰. O autor afirma ainda, que para o concreto o encurtamento máximo é de 2‰ (compressão simples) e 3,5‰ (flexão simples).

#### 2.4.6.1 Cálculo da armadura simples

Portanto, tendo em vista as hipóteses de cálculo citadas, é possível dimensionar a peça fletida em seu estado limite (ELU). Para Nascimento (2020), o dimensionamento deve garantir que uma seção, de altura mínima, consiga suportar o momento resistente máximo e, para isso a autora afirma que basta igualar o momento resistente máximo ao maior momento de cálculo, para determinar a espessura que atenda ao ELU. Para determinação da altura mínima, se faz o uso da Equação (24), se atentando ao limite  $x/d = 0,45$  de relação da linha neutra com a altura útil, estabelecido na NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$d_{min} = 2 \times \sqrt{\frac{M_{sd}}{b_w f_{cd}}} \quad (24)$$

onde:

$d_{min}$  = altura útil mínima da laje, em metros;

$M_{sd}$  = momento solicitante de cálculo, em kNm;

$b_w$  = largura da laje por faixa unitária;

$f_{cd}$  = resistência de cálculo do concreto, em kN/m<sup>2</sup>.

De posse da altura estimada (Figura 18), é possível determinar a altura útil utilizada para determinar a espessura da laje por meio das Equações (3) e (4).

Com o conhecimento dos dados estabelecidos nos tópicos anteriores, de Concepção estrutural (2.4.1), Pré-dimensionamento (2.4.2) e Análise estrutural (2.4.5), é possível determinar a resistências de cálculo do concreto ( $f_{cd}$ ) e do aço ( $f_{yd}$ ), a altura útil ( $d$ ), o momento solicitante de cálculo ( $M_{sd}$ ), a largura da laje ( $b_w$ ) e assim calcular a área necessária para suportar os esforços solicitantes. Reiterando o dimensionamento no ELU, as resistências características dos materiais devem ser minoradas para obter as resistências de cálculo e o momento máximo característico obtido na análise da estrutura, é majorado. Lembrando também, que os cálculos consideram uma largura de faixa unitária de um metro para a laje.

Diante o exposto é possível, por meio das equações adimensionais, equações essas que segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), são convenientes de se trabalhar pela facilidade da utilização de diversas unidades, calcular a armadura simples ( $A_s$ ). O primeiro adimensional a ser calculado é o coeficiente de momento de cálculo  $k_{MD}$  (Equação (25)).

$$k_{MD} = \frac{M_{sd}}{b_w \times d^2 \times f_{cd}} \quad (25)$$

onde:

$k_{MD}$  = coeficiente de momento de cálculo;

$M_{sd}$  = momento solicitante de cálculo, em kNcm;

$b_w$  = largura da laje, centímetros;

$d$  = altura útil mínima da laje, em centímetros;

$f_{cd}$  = resistência de cálculo do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>.

Para garantir as condições de ductilidade, é necessário identificar em qual domínio de deformação está caracterizada a seção. A NBR 6118 (ABNT, 2014), suprimiu o

domínio 4 e parte do domínio 3, estabelecendo a relação de  $x/d=0,45$  como limite para dimensionamento. Portanto, o cálculo de  $k_x$ , Equação (26), coeficiente que relaciona as deformações com a altura da linha neutra, consegue determinar em qual domínio encontra-se a seção. O limite de deformação entre os domínios 2 e 3 ( $k_{x23}$ ) é de 0,259; o limite preconizado na norma ( $k_{xlim}$ ) é de 0,45 e o limite entre os domínios 3 e 4 ( $k_{x34}$ ) é de 0,628. Conforme fora dito no tópico de comportamento das peças fletidas, o domínio 4 deve ser evitado, por apresentar características de uma seção superarmada de ruptura frágil.

$$k_x = 1,25 - 1,9174 \times \sqrt{0,425 - k_{MD}} \quad (26)$$

onde:

$k_x$  = coeficiente adimensional de relação da deformação com a linha neutra;

$k_{MD}$  = coeficiente adimensional de momento de cálculo.

Para cálculo do braço de alavanca, deve-se calcular o coeficiente  $k_z$ , por meio da Equação (27).

$$k_z = 1 - 0,4k_x \quad (27)$$

onde:

$k_z$  = coeficiente adimensional de braço de alavanca;

$k_x$  = coeficiente adimensional de relação da deformação com a linha neutra.

De posse dos coeficientes adimensionais, pode-se determinar a armadura simples para a seção transversal. O cálculo da armadura (Equação(28) fornece uma área de aço em centímetros quadrados para cada faixa de metro da laje, ou seja, cada faixa de metro da laje dimensionada deverá dispor de uma armadura de bitola comercial que supra a área calculada.

$$A_s = \frac{M_{sd}}{k_z \times d \times f_{yd}} \quad (28)$$

onde:

$A_s$  = área de aço, em  $\text{cm}^2/\text{m}$ ;

$M_{sd}$  = momento solicitante de cálculo, em  $\text{kNm}$ ;

$k_z$  = coeficiente adimensional de braço de alavanca;

$d$  = altura útil da laje, em centímetros;

$f_{yd}$  = resistência de cálculo do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

#### 2.4.7 Dimensionamento ao cisalhamento no ELU

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que diferentemente das vigas, as lajes se comportam de maneira diferente aos esforços de cisalhamento, de maneira em que geralmente somente o concreto é necessário para resistir aos esforços. Então, o uso de armaduras para combate ao cisalhamento pode ser dispensado para as lajes maciças. A recomendação normatizada pela NBR 6118 (ABNT, 2014) é o de se verificar o efeito cortante para avaliar a dispensa ou não de armadura para este caso.

A NBR 6118 (ABNT, 2014), afirma que para lajes maciças em concreto armado, a armadura para resistir aos esforços de tração advindos da força cortante, somente será necessária se a força cortante de cálculo ( $V_{Sd}$ ) for maior que a força cortante resistente de cálculo ( $V_{Rd1}$ ). Ou seja, a armadura pode ser prescindida quando a força cortante de cálculo for menor ou igual à resistência de projeto ao cisalhamento ( $V_{Rd1}$ ), conforme a Equação (29).

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (29)$$

Sendo que, a resistência ao cisalhamento é dada pela Equação (30).

$$V_{Rd1} = \tau_{Rd} \times k \times (1,2 + 40 \times \rho_1) \times b_w \times d \quad (30)$$

onde:

$\tau_{Rd} = 0,0375 \times f_{ck}^{2/3}$  = tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento, com  $f_{ck}$  em MPa;

$k = 1,6 - d \geq 1$  = coeficiente igual a 1 para elementos em 50% da armadura inferior não chega até o apoio, e igual a  $|1,6 - d|$ , não menor que 1, para os demais casos;

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \times d} \leq 0,02;$$

$A_{s1}$  = armadura efetiva de tração, em cm<sup>2</sup>;

$b_w$  = largura mínima da seção ao longo da altura útil  $d$ ;

$d$  = altura útil da seção.

#### 2.4.8 Verificação no ELS

Clímaco (2008), define os estados limites como estados relacionados à durabilidade, boa utilização da estrutura, funcionalidade e estética. Diferentemente do ELU, no ELS, a estrutura não apresenta características de iminência da ruína. A verificação no estado limite de serviço diz respeito à utilização da peça durante sua vida útil, visando evitar um estado em que a peça apresente deformações que afetem a estética e causem sensação de insegurança para as pessoas ou um estado em que apresente fissuras que possam comprometer a durabilidade.

Clímaco (2008), cita como requisitos para a segurança de uma estrutura, que durante a vida útil, a estrutura apresente características fidedignas ao projeto, com um custo econômico de execução e manutenção, que também apresente aparência estética aceitável, com o intuito de não causar falsas sensações de insegurança para aqueles que não entendem sobre estruturas e que quando utilizada de maneira indevida, a estrutura apresente sinais visíveis de deformações e fissuras. Portanto, Clímaco (2008), conclui que os fatores de segurança estão associados também ao comportamento da estrutura durante sua utilização em serviço e por isso devem ser verificados os estados limites de serviço, mesmo que o ELS não represente um risco iminente à ruptura.

Dessa forma, a verificação do ELS consiste em comprovar a não ocorrência dos estados limites de serviço ou utilização, sendo esses estados, o estado de deformações excessivas e o estado de fissuração inaceitável, buscando limitar a abertura das fissuras na peça e as deformações. Para este trabalho, foram analisados apenas os estados de deformações excessivas inicialmente, conhecendo as características dos estádios, deve-se atentar se há fissuração nas peças. Clímaco (2008), afirma que sob solicitações normais, a peças de concreto armado trabalham parcialmente no Estádio I, onde a peça não apresenta fissuração e no Estádio II, estágio que tem início com o surgimento de fissuras, portanto, neste estágio a peça encontra-se fissurada. No item 17.3.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), apresenta a Equação (31) para cálculo do momento de fissuração. Comparando o momento de fissuração com o momento atuante, é possível determinar a fissuração na peça.

$$M_r = \frac{\alpha \times f_{ct} \times I_l}{Y_t} \quad (31)$$

onde:

$M_r$  = momento de fissuração

$\alpha = 1,2$  para seções em forma de “T” ou duplo “T”;

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

$f_{ct}$  = resistência à tração do concreto;

$I_l$  = momento de inércia da seção bruta de concreto;

$Y_t$  = distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), para a determinação do momento de fissuração, deve se utilizar a resistência à tração direta do concreto ( $f_{ct}$ ) de acordo com o estado verificado. Para o estado limite de formação de fissuras, o  $f_{ctk,inf}$  (Equação (32) deve ser utilizado, enquanto para o estado limite de deformação excessiva utiliza-se o  $f_{ct,m}$  (Equação (33)

$$f_{ct,inf} = 0,21 \times f_{ck}^{2/3} \quad (32)$$

$$f_{ct,m} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} \quad (33)$$

onde:

$f_{ct,inf}$  = resistência à tração direta do concreto para ELS-DEF;

$f_{ct,m}$  = resistência à tração direta do concreto para ELS-W;

$f_{ck}$  = resistência à compressão característica do concreto, em MPa.

#### 2.4.8.1 Verificação do estado limite de deformação excessiva (ELS-DEF)

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), para verificação das deformações excessivas, devem ser analisadas as combinações de ações, as características geométricas das seções, os efeitos de fissuração e fluência do concreto e as flechas limites. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), os deslocamentos limites são valores práticos utilizados para verificação das deformações da peça. A Tabela 15 é uma adaptação da Tabela 13.3 (Limites para deslocamentos) da ABNT NBR 6118 (2014) e apresenta os valores limites para



deslocamentos visíveis (combinação de ações quase permanente) e vibrações excessivas (combinação devido a cargas acidentais).

Tabela 15 – Deslocamentos limites

<b>Tipo de efeito</b>	<b>Razão da limitação</b>	<b>Exemplo</b>	<b>Deslocamento a considerar</b>	<b>Deslocamento limite</b>
<b>Aceitabilidade e sensorial</b>	Visual	Deslocamento visíveis em elementos estruturais	Total	L/250
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	L/350

Fonte: Adaptado da Tabela 13.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), levando em conta que também há deslocamento nas vigas de apoio, se um ponto da laje atinge o deslocamento máximo, essa flecha deve ser inferior a 2/3 do que é prescrito na norma. Pois, segundo o autor supracitado, admite-se que o deslocamento se dê com 2/3 ocorrendo na laje e 1/3 ocorrendo nas vigas de apoio da laje.

As flechas das lajes armadas em uma direção, serão calculadas conforme as equações apresentadas na Tabela 14, levando em consideração as vinculações citadas na própria tabela. Para lajes em cruz, armadas nas duas direções, o cálculo da flecha é feito conforme a Equação (19). Vale ressaltar, que a Equação (19), também pode ser utilizada no cálculo de lajes armadas em uma direção, visto que, o ANEXO D, que fornece o coeficiente  $\alpha$  mediante vinculação e razão entre os vãos teóricos (Equação (2)), também fornece coeficientes para lajes armadas em uma direção ( $\lambda > 2$ ).

O cálculo das flechas imediatas não considera o efeito de fluência do concreto. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), a fluência é um fenômeno que acomete as peças solicitadas por tensão constante, causando deformações que surgem ao decorrer do tempo. Além da fluência, Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que a retração, fenômeno de variação de volume no concreto, principalmente pela saída de água do concreto através dos poros, também pode contribuir para as deformações da estrutura, entretanto, a retração representa uma parcela pequena dessas deformações e por isso é desprezada a maioria dos cálculos.

Para cálculo do deslocamento, considerando os efeitos de fluência em que a peça está sujeita ao decorrer do tempo, a NBR 6118 (ABNT, 2014), estabelece que a flecha

adicional diferida por efeitos da fluência pode ser calculada (item 17.3.2.1.2) de maneira aproximada pela Equação (34).

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_o)}{1 + 50 \times \rho'} \quad (34)$$

onde:

$$\rho' = \frac{A'_s}{b_w \times d};$$

$A'_s$  = área da armadura de compressão no trecho considerado;

$\xi$  = coeficiente de função do tempo, conforme Tabela 16;

$d$  = altura útil da laje;

$t$  = tempo, em meses, no qual se deseja descobrir a flecha diferida;

$t_o$  = tempo, em meses, relativo à data de aplicação da carga de longa duração.

Tabela 16 – Valores do coeficiente  $\xi$  em função do tempo

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

Fonte: Adaptado da Tabela 17.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Portanto, Carvalho e Figueiredo Filho (2014), citam que o valor da flecha diferida total no tempo infinito é dado pela Equação (35). Os autores ainda ressaltam da importância da consideração do efeito de fluência nas deformações, pois a flecha diferida total, pode chegar ao triplo do valor da flecha imediata, por isso a fluência não deve ser desprezada.

$$\delta_{t,\infty} = \delta_{t,0} \times (1 + \alpha_f) \quad (35)$$

onde:

$\delta_{t,\infty}$  = flecha no tempo infinito;

$\delta_{t,0}$  = flecha imediata;

$\alpha_f$  = flecha adicional diferida, conforme Equação (34);

#### 2.4.9 Detalhamento de projeto

O detalhamento é uma etapa importante no projeto estrutural. Além do dimensionamento, é importante que sejam detalhadas as armaduras e suas disposições para garantir a execução de maneira prática, atendendo os requisitos normativos que garantem características essenciais à qualidade, durabilidade e proteção dos elementos estruturais. Após o dimensionamento à flexão simples, é obtido uma área de aço em  $\text{cm}^2$  necessária para resistir aos esforços por faixa de metro, ou seja, a cada 1 metro, deve se dispor uma quantidade  $n$  de bitolas que atendam a essa área de aço necessária, com seu devido espaçamento. Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que o primeiro passo para o detalhamento é a escolha da quantidade de barras longitudinais para determinada bitola comercial que atendam à área de aço calculada.

A escolha da bitola de aço utilizada para definir a quantidade de barras de aço é papel do projetista. O número  $n$  de barras de aço utilizadas por metro de laje é obtido conforme Equação (36), dividindo a área de aço calculada pela área de aço da bitola escolhida.

$$n = \frac{A_s}{A_{s\phi}} \quad (36)$$

onde:

$A_s$  = área de aço calculada conforme Equação (28), em  $\text{cm}^2/\text{m}$ ;

$A_{s\phi}$  = área de aço da bitola, em  $\text{cm}^2$ .

A Tabela 17 apresenta a área de aço ( $A_{s\phi}$ ) de algumas bitolas.

Tabela 17 – Área de aço de bitolas comerciais

Bitola $\phi$	Diâmetro	Área da bitola $\phi$
mm	cm	$\text{cm}^2$
5	0,50	0,20
6.3	0,63	0,31
8.0	0,80	0,50
10.0	1,00	0,80
12.5	1,25	1,25
16.0	1,60	2,00

20,0	2,00	3,15
------	------	------

Fonte: Aatoria própria (2021).

As armaduras estão divididas em armaduras principais (positiva e negativa), armaduras secundárias ou de distribuição e as armaduras especiais. Portanto, a NBR 6118 (ABNT, 2014), estabelece para essas armaduras valores máximos e mínimos de armadura e espaçamento. Tendo em vista os objetivos deste trabalho de apenas analisar parametricamente o desempenho das lajes no dimensionamento, não há o intuito de detalhar as lajes analisadas, sendo assim, somente serão apresentadas as considerações acerca dos valores mínimos e máximos de armadura.

#### 2.4.9.1 Armadura mínima

Em seu item 19.3.3.2, a NBR 6118 (ABNT, 2014), cita que para melhoria do comportamento dúctil da seção à flexão e controle da fissuração são necessários valores mínimos de armadura. Esses valores citados pela norma estão dispostos em sua Tabela 19.1 (Valores mínimos para armaduras passivas aderentes). Portanto, deve-se calcular a taxa de aço ( $\rho_s$ ) conforme Equação (37), para verificar se a taxa de aço calculada atende aos valores mínimos citados na norma, sendo  $A_s$  a área de aço calculada no dimensionamento no estado limite último,  $b_w$  a faixa de metro da laje e  $h$  sua espessura.

$$\rho_s = \frac{A_s}{b_w \times h} \quad (37)$$

Segundo NBR 6118 (ABNT, 2014), os valores mínimos de armadura principais negativas e positivas atendem as seguintes relações:

Armaduras negativas:  $\rho_s \geq \rho_{min}$ ;

Armaduras negativas de bordas sem continuidade:  $\rho_s \geq 0,67 \times \rho_{min}$ ;

Armaduras positivas de lajes armadas em duas direções:  $\rho_s \geq 0,67 \times \rho_{min}$

Armadura positiva (principal) de laje armada em uma direção:  $\rho_s \geq \rho_{min}$

Armadura positiva (secundária) de laje armada em uma direção:  $\rho_s \geq \rho_{min}$

Para cálculo da taxa de aço mínima ( $\rho_{min}$ ), é necessário que se determine a área de aço mínima tracionada, visto que a taxa de aço mínima é dada em função área de aço mínima. Essa área de aço tracionada é dimensionada a partir do momento mínimo e para que não seja necessário sempre calcular o momento mínimo, a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta a Tabela 17.3, onde são fornecidos alguns dos valores para a taxa de aço mínima em função da seção (retangular), o tipo de aço e a resistência do concreto. A Tabela 18 é uma adaptação da tabela 17.3 e apresenta alguns dos valores citados na norma.

Tabela 18 – Taxas mínimas de armaduras de flexão

Forma da seção	Valores de $\rho_{min}$ (As,min/Ac)						
	20	25	30	35	40	45	50
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208

Fonte: Adaptado da Tabela 17.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

As armaduras secundárias são utilizadas para combater efeitos da retração, controlar fissuras e distribuir melhor as cargas pontuais. A NBR 6118 (ABNT, 2014), prevê que a laje tenha como armadura secundária 20% da armadura principal, com uma armadura mínima de 0,9 cm<sup>2</sup>/m ou 50% da armadura mínima principal. E para as lajes armadas em duas direções, a norma supracitada, afirma que a armadura de distribuição deve ser de 20% da armadura principal. A Tabela 19 apresenta um resumo das armaduras mínimas citadas na NBR 6118/2014 e neste tópico.

Tabela 19 – 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	$\rho_s \geq 0,67 \times \rho_{min}$
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \times \rho_{min}$
Armaduras positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s \geq 0,20 \times A_{sprinc}$

	$A_s \geq 0,9 \text{ cm}^2/m$ $\rho_s \geq 0,5 \times \rho_{min}$
--	---

Fonte: Adaptado da Tabela 19.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

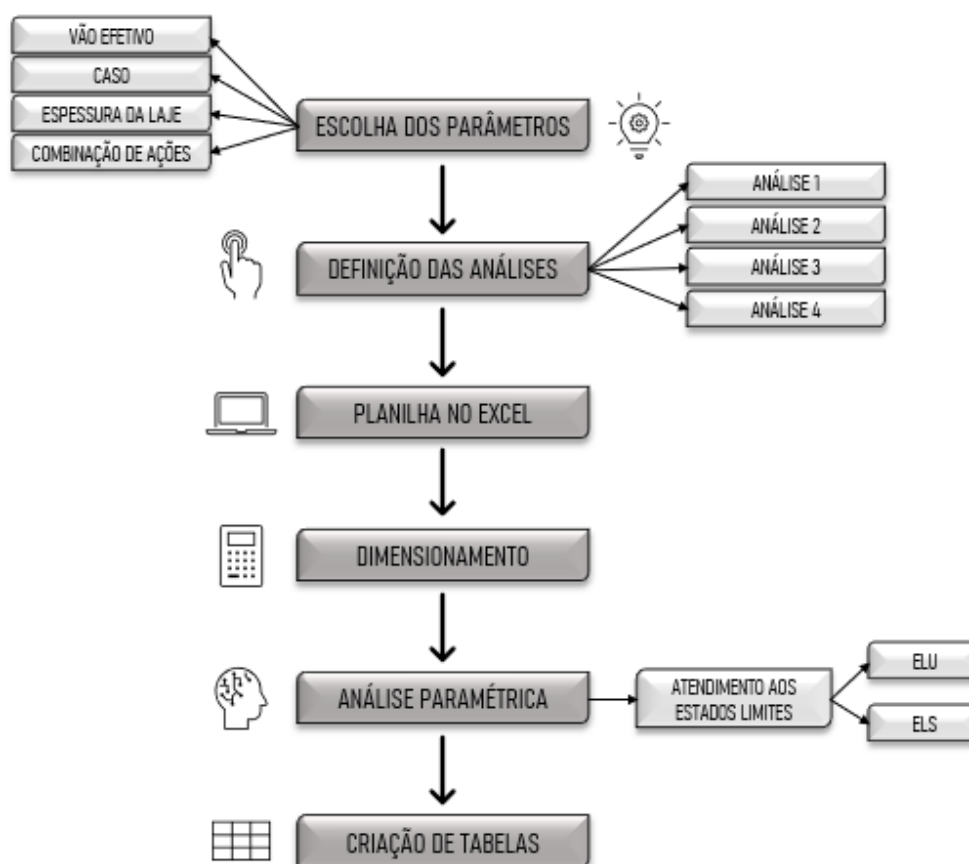
#### 2.4.9.2 Armadura máxima

A NBR 6118 (ABNT, 2014), prepondera que a armadura longitudinal utilizada não deve ter sua área maior que 4% da área de concreto da seção transversal. Portanto a soma das armaduras de tração e compressão ( $A_s + A'_s$ ) não deve ser maior que  $0,04 \times A_c$ .

### 3 METODOLOGIA

O objetivo desse trabalho é realizar a análise paramétrica no dimensionamento de lajes maciças em concreto armado, utilizando a plataforma do *Microsoft Excel*® (*Excel*) para criação de uma planilha de dimensionamento, onde a partir da variação de parâmetros serão obtidos os resultados para análise. Neste capítulo serão apresentadas as etapas que conduziram o trabalho. A pesquisa traz uma abordagem quantitativa, de natureza descritiva. Quanto aos procedimentos técnicos, foi feita uma revisão bibliográfica, a fim de se obter um embasamento teórico sobre o assunto. A escolha pela ferramenta do *Excel*, se deu pela praticidade no desenvolvimento de planilhas de dimensionamento seguindo o roteiro de cálculo das equações apresentadas no referencial teórico desse trabalho, buscando seguir as recomendações dos limites estabelecidos pela NBR 6118/2014 para atendimento dos estados limites de segurança e utilização em serviço. A Figura 31 apresenta o fluxograma dos métodos utilizados neste trabalho.

Figura 31 – Fluxograma de metodologia



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.1 Concepção de projeto

Uma das primeiras etapas de um projeto como citado no tópico 2.4.1, é a concepção estrutural. Nessa etapa são definidos os materiais, dados importantes para atendimento de critérios de qualidade e durabilidade e características geométricas e de vinculação. Portanto, para esse trabalho, os dados obtidos nessa etapa são os valores de entrada para o dimensionamento da laje.

Os valores citados como dados de projeto (Tabela 20) são valores característicos para resistência dos materiais, módulo de elasticidade para verificação de estado limite de serviço e valores de critérios que visam seguir o que estabelece a NBR 6118 (ABNT, 2014), para garantir a proteção das armaduras quanto à iminência de ataques dos agentes físicos do meio ambiente, de acordo com determinadas classes de agressividade citadas na norma. Portanto, esses valores serão considerados para atendimento da norma citada, e para fins de cálculo, sendo dados necessários para início do dimensionamento.



Tabela 20 – Dados de entrada do projeto

<b>Dados de projeto</b>				
<b>CAA (Classe de agressividade ambiental)</b>	I	II	III	IV
<b>Classe do concreto</b>	C20	C25	C30	C40
<b>Resistência característica à compressão</b>	20 MPa	25 MPa	30 MPa	40 MPa
<b>Cobrimento nominal mínimo para laje</b>	20 mm	25 mm	35 mm	45 mm
<b>Módulo de elasticidade secante (<math>E_{cs}</math>)</b>	24 Gpa			
<b>Categoria do aço</b>	CA-50			
<b>Resistência característica de escoamento</b>	500 MPa			

Fonte: Autoria própria (2021).

Para definir a dimensão dos vãos efetivos, basta utilizar a expressão da Equação (1) ou a definição usualmente adotada da Figura 13 e assim classificar a laje como armadas em uma ou duas direções, por meio da utilização da relação apresentada na Equação (2). Para classificação quanto às condições de contorno, basta identificar o caso conforme os casos apresentados na Figura 14, fazendo a consideração das condições para apoio e engaste citados no tópico 2.4.1.4.

### 3.2 Parâmetros de projeto

Na realização da análise paramétrica, foi realizado primeiramente a escolha dos parâmetros e posteriormente foi feita a divisão em parâmetros fixos e variáveis a serem estudados no processo de dimensionamento das lajes maciças, para que possam ser analisados os resultados obtidos a partir da variação desses parâmetros adotados, de forma que possam ser verificados e estabelecidos limites que garantam o atendimento às diretrizes preconizadas na NBR 6118/2014 sobre estados limites (ELU e ELS). A etapa de escolha ocorre com a definição dos parâmetros influentes no comportamento da peça que possam definir ou limitar a utilização do tipo de laje, como por exemplo, a altura necessária da laje ou o vão a ser vencido

Em primeiro momento, serão escolhidas cinco variáveis a serem analisadas. Os parâmetros adotados são valores obtidos através da concepção e pré-dimensionamento, seguindo valores usuais e mínimos citados na NBR 6118/2014 para lajes maciças em concreto armado. A Tabela 21 apresenta esses parâmetros escolhidos para análise. A partir da escolha desses parâmetros, serão feitas 4 análises paramétricas, onde, para cada análise serão adotados 3 parâmetros fixos e 1 variável.

Tabela 21 – Parâmetros de projeto

Parâmetro de projeto	
1	Vão efetivo
2	Espessura
3	Carga proveniente das ações atuantes
4	Condições de contorno

Fonte: Autoria própria (2021).

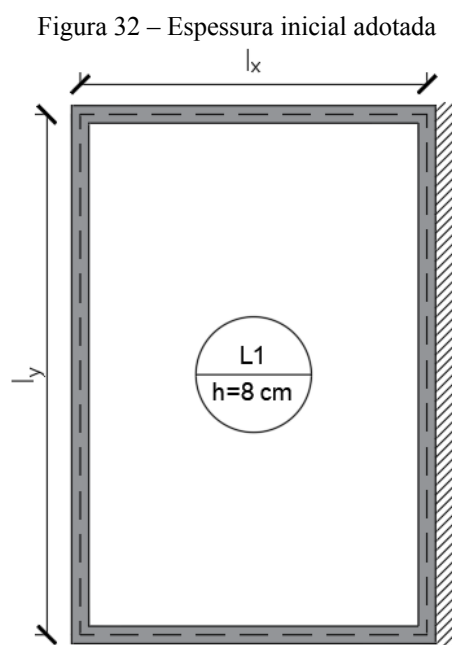
### 3.2.1 Vão efetivo

Com base no roteiro de projeto apresentado no referencial teórico, é possível identificar que nas etapas iniciais de um projeto é importante a definição da geometria e vinculação da laje. Como já citado nesse trabalho, o vão de menor direção de uma laje apresenta os momentos fletores mais significativos e por isso, o menor vão teórico  $l_x$  é estabelecido como primeiro parâmetro na análise paramétrica. O vão da laje é um parâmetro importante, pois a cada nova variação, são definidos novos vãos, que possuem características geométricas distintas que influenciam tanto na tomada de decisão do tipo de laje quanto no dimensionamento. Reiterando que o vão definido já considera seu valor efetivo (Figura 13). Usualmente, considerando armaduras passivas, as lajes maciças não são consideradas soluções viáveis quando o problema requer o vencimento de um grande vão e a análise desse valor de  $l_x$  poderá limitar até onde uma laje conseguirá vencer determinado vão. A variação dos vãos analisados ocorre a cada 50 cm e para o valor de  $l_y$ , será estabelecido uma proporcionalidade que garanta que o valor do menor vão teórico sempre seja o de  $l_x$ , ou seja, mesmo que o vão esteja variando em  $l_x$  a cada 50 centímetros, o valor de  $l_y$  também variará para que seja obedecida a relação em que  $l_x$  é menor que  $l_y$ .

### 3.2.2 Espessura

A espessura  $h$  da laje é o segundo parâmetro selecionado. A altura utilizada é obtida na etapa de pré-dimensionamento, conforme Equações (3) e (4), a depender da classificação da laje e segue os valores citados na NBR 6118 (ABNT, 2014), que estabelece

como dimensão mínima para lajes maciças os valores entre 7 cm, e 14 cm de espessura máxima. Para este trabalho, será considerado como espessura mínima o valor de 8 cm, valor especificado na NBR 6118 (ABNT, 2014) como o valor para laje de piso sem balanço, e como valor máximo, o valor de 15 cm, citado na norma como valor para lajes com protensão. A Figura 32 apresenta um modelo genérico de laje com altura mínima adotada para análise.



**Fonte:** Autoria própria (2022).

A adoção de uma altura inicial para todas as análises não implica dizer que todas as lajes dimensionadas atendam os estados limites com essa espessura, portanto, no caso do não atendimento, a altura inicial poderá ser alterada.

### 3.2.3 Combinação de ações

Como citado no referencial teórico desse trabalho, o pré-dimensionamento da espessura da laje é importante para definição da primeira carga (peso próprio) a ser considerada na combinação de ações. Portanto, para todas as análises a altura inicial a ser adotada define o valor da carga proveniente do peso próprio da estrutura, sendo assim, a carga atuante é o terceiro parâmetro selecionado. A partir das considerações dos efeitos das ações atuantes na laje, serão definidas as combinações de ações que serão utilizadas. Para todas as análises, serão considerados os mesmos valores para cada parcela de carga atuante (Tabela 22).

Tabela 22 – Cargas atuantes na análise

<b>peso próprio</b>	<b><math>g_1</math></b>	25 kN/m <sup>3</sup>
<b>revestimento</b>	<b><math>g_2</math></b>	1,4 kN/m <sup>2</sup>
<b>forro</b>	<b><math>g_3</math></b>	0,25 kN/m <sup>2</sup>
<b>alvenaria</b>	<b><math>g_4</math></b>	-
<b>variável</b>	<b><math>q_1</math></b>	1,5 kN/m <sup>2</sup>

Fonte: Autoria própria (2022).

As combinações de ações podem ser obtidas por meio das expressões das Equações (12) e (13), considerando para efeitos de combinação os efeitos das ações permanentes citadas no tópico 2.4.3.1 e as ações variáveis citadas no tópico 2.4.3.2. Lembrando que a parcela proveniente das ações permanentes dependerá do peso próprio da estrutura, portanto, para cada análise, as combinações dependerão da altura inicial adotada.

### 3.2.4 Condições de contorno e vinculação da laje

O quarto parâmetro escolhido são as condições de contorno (Figura 14), que influenciam em etapas como o pré-dimensionamento (Figura 18), análise estrutural e verificações no ELS. Para os nove casos de vinculações citados, serão consideradas as condições de apoio e engastes especificadas no tópico 2.4.1.4, levando em conta as condições citadas na Figura 15 e Figura 16. Neste trabalho, com exceção da Análise onde o parâmetro variável são os próprios casos de vinculação, adotou-se o mesmo modelo de laje genérica com o caso 3 de vinculação.

## 3.3 Análises

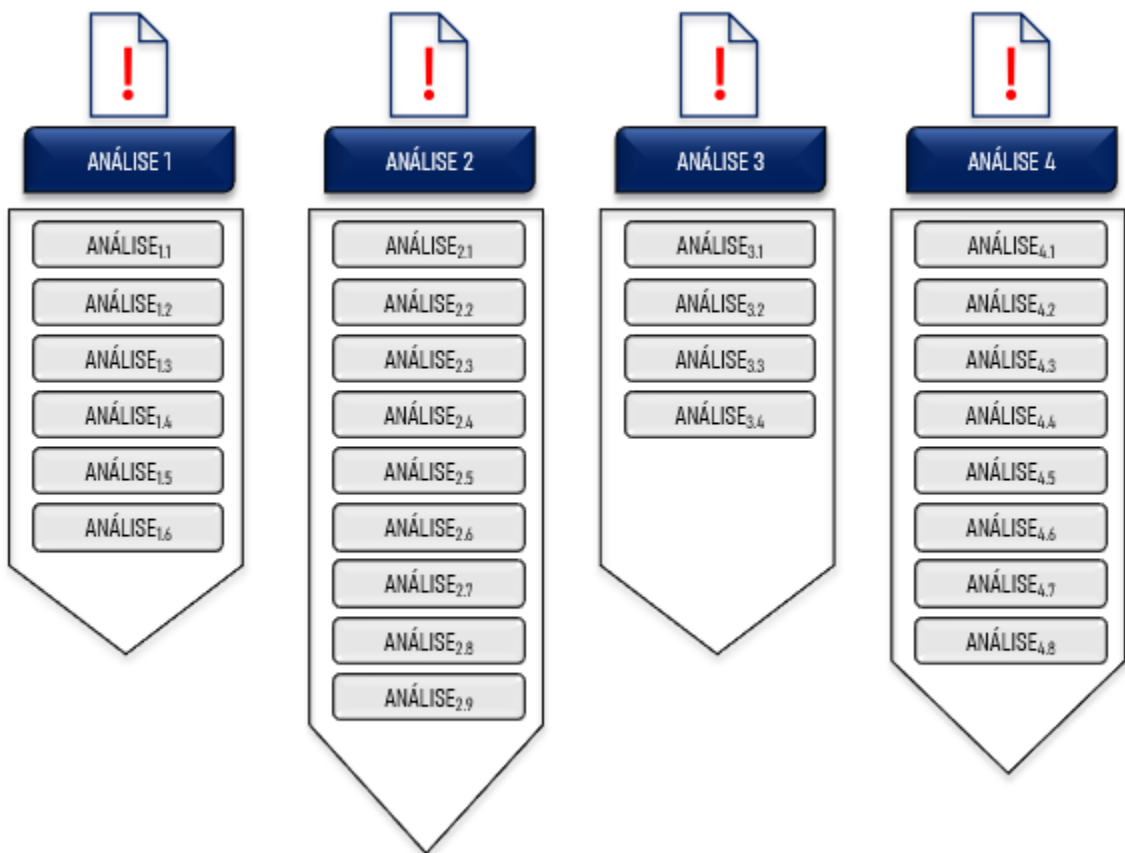
Neste tópico são apresentadas as análises de acordo com a divisão dos parâmetros em fixos e variáveis. Todas as análises apresentadas seguem o mesmo processo, em que a partir dos dados de entrada definidos previamente, é realizado o dimensionamento de uma laje genérica inicial e partir da variação em função do vão e dos parâmetros selecionados, novas lajes são dimensionadas. Ou seja, o intuito da análise é dimensionar lajes em determinadas condições, partindo de uma laje inicial pré-estabelecida, levando a mesma ao seu limite, até

onde os estados limites não sejam mais satisfeitos. Para isso, menor vão da laje seguirá um padrão onde a variação ocorre a cada 50 centímetros e segue uma proporcionalidade no maior vão teórico. Os vãos obedecerão a relação de proporcionalidade definida para a análise, para garantir o respeito da relação em que  $l_x \leq l_y$  e para definir o parâmetro adimensional lambda ( $\lambda$ ), para que por meio dele, sejam retirados os valores dos ANEXOS A, B, C, D, E, F e G, utilizados para cálculos das reações da laje nas vigas, cálculo dos momentos fletores máximos de projeto e cálculo das flechas imediatas.

A altura inicial pré-dimensionada, dependerá do atendimento aos estados limites, ou seja, caso a altura mínima de 8 cm não atenda aos limites, a próxima altura inicial será a de 9 cm e assim sucessivamente. Para cada dimensionamento, o parâmetro adimensional lambda ( $\lambda$ ) é definido de acordo com a proporcionalidade entre os vãos, a partir da relação entre o maior e o menor vão teórico. As combinações nos estados limites último e de serviços, dependem da parcela permanente do peso próprio, definido pela altura, sendo assim, para cada nova altura analisada, as combinações sofrerão alterações.

A partir dessas variações, cada análise foi subdividida para coleta dos dados de acordo com seus dados iniciais de entrada. Por exemplo, no caso da Análise 1, onde 6 proporcionalidades são avaliadas, houve 6 subdivisões, então todas as análises seguem o mesmo princípio de variação dos seus dados, porém cada uma delas possui valores diferentes de entrada. A Figura 33 exemplifica as subdivisões feitas para coleta.

Figura 33 – Subdivisões para análise



**Fonte:** Autoria própria (2022).

### 3.3.1 Análise 1

Na Análise 1, os parâmetros fixos escolhidos foram, a espessura da laje, a carga proveniente das ações, as vinculações entre as lajes e a classe do concreto ( $f_{ck}$ ) e o parâmetro variável escolhido foi o vão da laje. Portanto, a partir da variação do vão da laje, serão analisados os resultados para o dimensionamento sob influência dessa característica, com o objetivo de identificar até onde a laje com as características fixadas atende aos estados limites.

Tabela 23 – Análise 1

A n á l i s e  1	Parâmetros	
	Fixo	Variável
	Espessura da laje	Vão da laje
	Carga proveniente das ações atuantes	
Condições de contorno		

**Fonte:** Autoria própria (2021).

A Análise 1 foi dividida em outras seis análises (Tabela 24), para analisar as características geométricas obtidas da relação entre os vãos analisados. As proporcionalidades analisadas foram obtidas por meio da fixação do valor inicial de  $l_x$  em todas as análises e modificação do valor de  $l_y$  de acordo com a proporcionalidade desejada. Sendo assim, as proporcionalidades obtidas foram de 1; 1,25; 1,75 e 2 (laje bidirecionais ou armadas em duas direções) e as proporcionalidades 2,25 e 2,50 (laje unidirecionais ou armadas em uma direção).

Tabela 24 – Dados de entrada para Análise 1

Análise	$l_x$	$l_y$	$\lambda$	$h$	caso	$f_{ck}$	$C_{ELU}$	$C_{ELS1}$	$C_{ELS2}$
	(m)	(m)	-	(cm)	-	(MPa)	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
1.1	2,00	2,00	1,00	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50
1.2	2,00	2,50	1,25	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50
1.3	2,00	3,50	1,75	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50
1.4	2,00	4,00	2,00	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50
1.5	2,00	4,50	2,25	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50
1.6	2,00	5,00	2,50	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50

**Fonte:** Autoria própria (2022).

Para as 6 análises, as espessuras iniciais de cálculo são de 8 centímetros e as condições de vinculação são de apoio e engaste no menor vão e biapoiado no maior vão, configurando o caso 3, conforme Figura 14. O  $f_{ck}$  é de 25 MPa e as cargas provenientes das ações atuantes são apresentadas na (Tabela 22). Através das cargas foram calculadas as combinações no estado limite último e estado limite de serviço. Para as demais análises, também serão utilizadas as mesmas cargas, com exceção da Análise 3, onde a carga proveniente da ação variável será objeto de análise, sendo, portanto, variada.

### 3.3.2 Análise 2

Na Análise 2 (Tabela 25), a partir da vinculação da laje com as demais (característica variável nessa análise) e sua consequente classificação em um dos casos citados no referencial teórico, será feito um dimensionamento variando cada caso de vinculação com os parâmetros fixados.

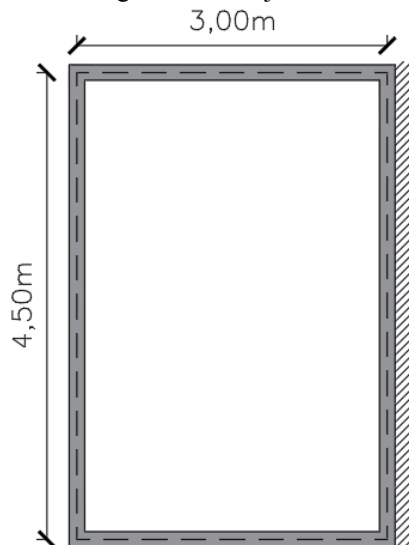
Tabela 25 – Análise 2

A n á l i s e 2	Parâmetros	
	Fixo	Variável
	Espessura da laje	Condições de contorno
	Carga proveniente das ações atuantes	
Vão da laje		

Fonte: A autoria própria (2021).

A laje escolhida para esse tipo de análise tem seus vãos iniciais fixados em 3,0 metros por 4,5 metros, sendo, portanto, uma laje armada em duas direções, seguindo uma proporcionalidade de 1,5, sendo seu parâmetro adimensional lambda, também de valor 1,50. Então, para cada 50 cm variados em  $l_x$  o valor seguinte de  $l_y$  será 1,5 vezes maior que o de  $l_x$ . O modelo genérico para a laje da Análise 2 é apresentado na Figura 34. Essa laje também será replicada para as demais análises por ser considerada uma laje de geometria e condições de vinculação comuns.

Figura 34 – Modelo genérico da laje das Análises 2, 3, 4 e 5



Fonte: A autoria própria (2021).



A Tabela 26 apresenta os dados de entrada para a Análise 2, onde as condições de contorno da laje são variadas. Para cada caso de vinculação da Figura 14, conforme o vão variar com sua determinada proporcionalidade, serão verificadas as espessuras que atendem aos estados limites daquele vão. Portanto, a análise 2 conta com 9 análises distintas, uma para cada caso de vinculação.

Tabela 26 – Dados da Análise 2

Análise	$l_x$	$l_y$	$\lambda$	$h$	caso	$f_{ck}$	$C_{ELU}$	$C_{ELS1}$	$C_{ELS2}$
	(m)	(m)	-	(cm)	-	(MPa)	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
2.1	3,00	4,50	1,50	8,00	1	25,00	7,21	4,10	1,50
2.2	3,00	4,50	1,50	8,00	2	25,00	7,21	4,10	1,50
2.3	3,00	4,50	1,50	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50
2.4	3,00	4,50	1,50	8,00	4	25,00	7,21	4,10	1,50
2.5	3,00	4,50	1,50	8,00	5	25,00	7,21	4,10	1,50
2.6	3,00	4,50	1,50	8,00	6	25,00	7,21	4,10	1,50
2.7	3,00	4,50	1,50	8,00	7	25,00	7,21	4,10	1,50
2.8	3,00	4,50	1,50	8,00	8	25,00	7,21	4,10	1,50
2.9	3,00	4,50	1,50	8,00	9	25,00	7,21	4,10	1,50

Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.3.3 Análise 3

Na Análise 3 (Tabela 27), o parâmetro variável é a carga proveniente das ações atuantes consideradas, para analisar a influência da combinação de ações no dimensionamento no ELU e verificação no ELS.

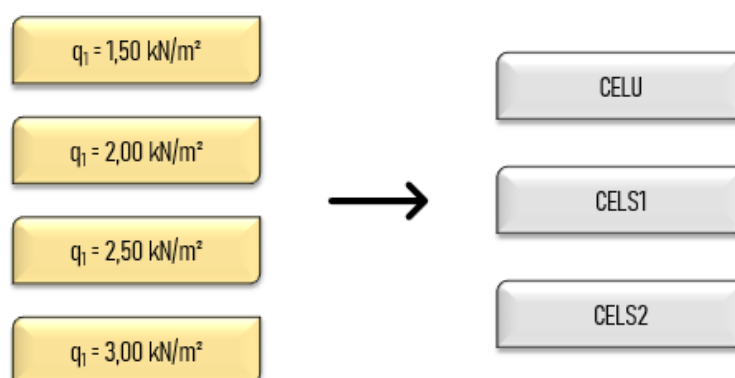
Tabela 27 – Análise 3

Análise 3	Parâmetros	
	Fixo	Variável
	Espessura da laje	Carga proveniente das ações atuantes
	Vão da laje	
Condições de contorno		

Fonte: Autoria própria (2021).

Nesta análise, as cargas provenientes das ações atuantes são as mesmas das demais análises, com exceção das ações variáveis, que variam (conforme mostra a Figura 35) implicando em novas combinações de ações, tanto no ELU como no ELS.

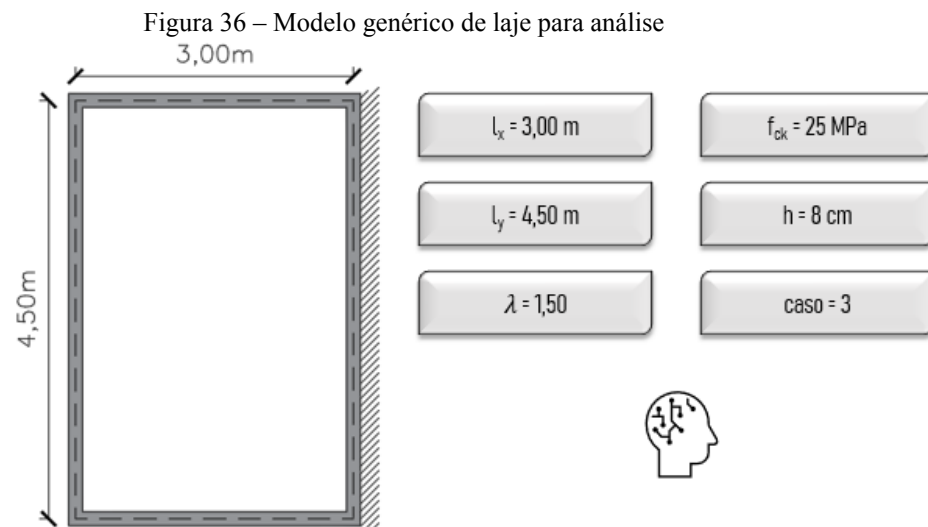
Figura 35 – Fluxograma das combinações de ações



**Fonte:** Autoria própria (2022).

A combinação no estado limite último ( $C_{ELU}$ ) é dada pela Equação (12) e as combinações  $C_{ELS1}$  e  $C_{ELS2}$  são as combinações devido às deformações excessivas (deslocamentos visíveis e vibrações excessivas), obtidas por meio da Equação (13). Para essas três equações, a mudança da carga variável para os valores de  $q_1$  (1,5 kN/m<sup>2</sup>; 2,00 kN/m<sup>2</sup>; 2,5 kN/m<sup>2</sup> e 3,00 kN/m<sup>2</sup>) modificará as cargas iniciais das quatro análises feitas dentro da Análise 3, formando novas combinações.

Para as demais análises, como fora dito anteriormente, os parâmetros geométricos e de vinculação são os mesmos estabelecidos conforme modelo genérico de laje apresentado na Figura 34. Na Figura 36 são exemplificados os parâmetros fixos nesta análise, as condições geométricas e de vinculação citadas, a resistência característica à compressão do concreto e altura mínima inicial de 8cm. Lembrando que, esta altura é o valor mínimo considerado para as análises paramétricas do trabalho em questão, no caso do não atendimento a um dos estados limites, a altura adotada será alterada para o próximo valor estabelecido na norma. Ou seja, o valor de 8cm é uma hipótese inicial para o dimensionamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

A Tabela 28 apresenta os dados para as quatro análises feitas mediante a variação das cargas provenientes das ações variáveis.

Tabela 28 – Dados da Análise 3

Análise	$l_x$	$l_y$	$\lambda$	$h$	caso	$f_{ck}$	$C_{ELU}$	$C_{ELS1}$	$C_{ELS2}$
	(m)	(m)	-	(cm)	-	(MPa)	( $\text{kN/m}^2$ )	( $\text{kN/m}^2$ )	( $\text{kN/m}^2$ )
3.1	3,00	4,50	1,50	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50
3.2	3,00	4,50	1,50	8,00	3	25,00	7,91	4,25	2,00
3.3	3,00	4,50	1,50	9,00	3	25,00	8,96	4,65	2,50
3.4	3,00	4,50	1,50	9,00	3	25,00	9,66	4,80	3,00

Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.3.4 Análise 4

O parâmetro variável da Análise 4 (Tabela 29), é a espessura da laje. De acordo com a variação, pode-se determinar, por exemplo, uma situação em que o peso próprio da estrutura proveniente das ações atuantes torne inviável a utilização da referida espessura. Portanto, os parâmetros fixos serão as combinações de ações, o vão da laje, as condições de contorno e o  $f_{ck}$ .

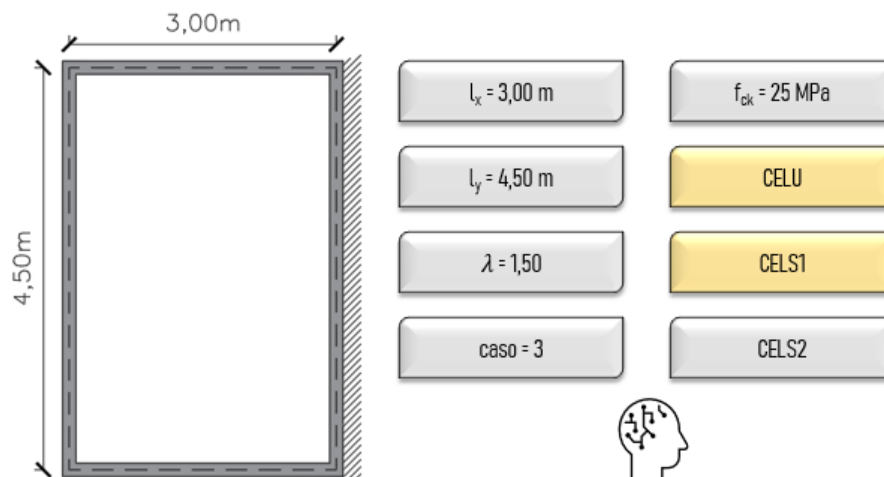
Tabela 29 – Análise 4

Análise 4	Parâmetros	
	Fixo	Variável
	Carga proveniente das ações atuantes	Espessura da laje
	Vão da laje	
Condições de contorno		

Fonte: Autoria própria (2021).

Nesta análise, para cada altura  $h$  dimensionada, haverá novas combinações de ações calculadas. Isso ocorre, pois, as combinações no ELU e no ELS (para deslocamentos visíveis) dependem diretamente da parcela de peso próprio definido em cada espessura. A Figura 37 apresenta os parâmetros fixos da análise.

Figura 37 - Parâmetros fixos na Análise 4



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Pode-se notar que as combinações na Figura 37 estão destacadas na cor amarela. Esse destaque indica que mesmo sendo parâmetros fixados, com a consequente variação de espessura, as duas combinações ( $C_{ELU}$  e  $C_{ELS1}$ ) receberão novos valores de entrada na análise. A  $C_{ELS2}$ , combinação no estado limite de serviço devido às ações variáveis não muda, visto que, a variação na altura não implica uma mudança nessa combinação, pois a combinação para verificação das vibrações excessivas leva em conta apenas a parcela  $q_1$  das ações, sem considerar a parcela proveniente do peso próprio da estrutura.

A Tabela 30 apresenta os dados de entrada para Análise paramétrica 4.

Tabela 30 – Dados da Análise 4

Análise	$I_x$	$I_y$	$\lambda$	$h$	caso	$f_{ck}$	$C_{ELU}$	$C_{ELS1}$	$C_{ELS2}$
	(m)	(m)	-	(cm)	-	(MPa)	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
4.1	3,00	4,50	1,50	8,00	3	25,00	7,21	4,10	1,50
4.2	3,00	4,50	1,50	9,00	3	25,00	7,56	4,35	1,50
4.3	3,00	4,50	1,50	10,00	3	25,00	7,91	4,60	1,50
4.4	3,00	4,50	1,50	11,00	3	25,00	8,26	4,85	1,50
4.5	3,00	4,50	1,50	12,00	3	25,00	8,61	5,10	1,50
4.6	3,00	4,50	1,50	13,00	3	25,00	8,96	5,35	1,50
4.7	3,00	4,50	1,50	14,00	3	25,00	9,31	5,60	1,50
4.8	3,00	4,50	1,50	15,00	3	25,00	9,66	5,85	1,50

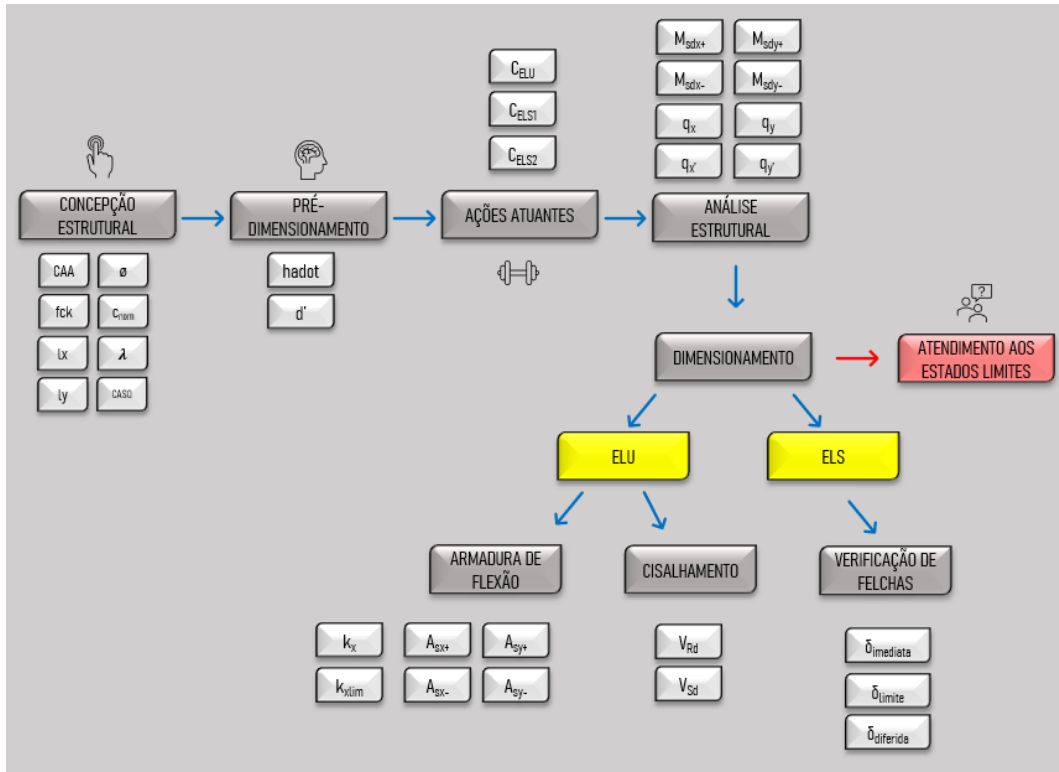
**Fonte:** Autoria própria (2022).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o dimensionamento de lajes maciças e a obtenção de resultados para análise, foi criada uma planilha de dimensionamento na plataforma do *Microsoft Excel*® (*Excel*). Seguindo o organograma apresentado na metodologia (Figura 31), após as definições das análises, a obtenção dos resultados depende do dimensionamento por meio da planilha. As etapas de cálculo da planilha seguem o roteiro apresentado no referencial teórico, com exceção da etapa de detalhamento, que não faz parte dos objetivos deste trabalho, e da verificação do estado limite de abertura de fissuras. Os estados limites analisados foram somente os de deformações excessivas.

Para melhor entendimento e discussão, em um primeiro momento, serão apresentados os resultados para a criação da planilha, bem como a apresentação dela, para posteriormente serem apresentados os resultados provenientes das análises citadas. A Figura 38 ilustra as etapas de dimensionamento da planilha e as variáveis envolvidas em cada etapa.

Figura 38 – Roteiro de dimensionamento da planilha



**Fonte:** Autoria própria (2022).

O atendimento aos estados limites, objetivo do dimensionamento e da análise, é verificado para o ELU na etapa de armadura de flexão, onde são dimensionadas as armaduras à flexão com verificação dos domínios de deformação, a fim de evitar que a linha neutra esteja fora dos limites estabelecidos pela norma, evitando por exemplo o dimensionamento de uma estrutura superarmada. Também no ELU, é verificado a dispensa da armadura para cortante no dimensionamento ao cisalhamento. O atendimento ao ELS é analisado na verificação das flechas diferidas em comparação com os limites de deformação. O subtópico 4.1 apresenta todas as etapas de cálculo da planilha.

#### 4.1 Planilha no Excel

Logo de início a interface da planilha apresenta o tópico número 1 (Figura 39), referente aos dados de entrada para concepção do projeto, como a Classe de Agressividade Ambiental, o  $f_{ck}$ , o cobrimento nominal e os valores para o vão da laje.

Figura 39 – Dados de entrada do dimensionamento

1 DADOS DE ENTRADA		
CAA	<input type="text"/>	
adotar $f_{ck}$ mínimo?	<input type="text"/>	
$f_{ckmin}$	-	MPa
$f_{ckadotado}$	<input type="text"/>	MPa
$C_{nom}$	-	cm
$\emptyset_{pos.}$	<input type="text"/>	mm
$\emptyset_{neg.}$	<input type="text"/>	mm
$b_w$	100	cm
$l_x$	<input type="text"/>	cm
$l_y$	<input type="text"/>	cm

Fonte: Autoria própria (2022).

Os espaços em branco são valores a serem inseridos pelo próprio usuário, os demais já são valores calculados automaticamente ou pré-definidos. Os valores inseridos tanto para  $l_x$  quanto para  $l_y$  devem considerar o vão teórico da laje medido de eixo a eixo. O valor de  $b_w$  (100 cm), considera o comprimento de 1 metro, visto que os esforços solicitantes e as armaduras calculadas consideram a faixa de um metro da laje.

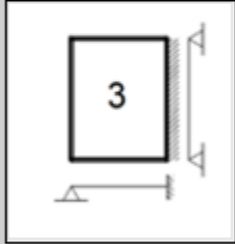
Ainda na etapa de concepção e dados de entrada para o projeto, é feita a classificação quanto a geometria da laje, para definir se ela é armada em uma ou duas direções e a classificação quanto aos vínculos da laje (Figura 40).

Figura 40 – Classificação da laje



CLASSIFICAÇÃO	
Condição de contorno	3
$I_x$	Apoio + Engaste
$I_y$	Biapoiado
$\lambda$	1,50

**LAJE ARMADA EM DUAS DIREÇÕES**



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Na etapa de pré-dimensionamento, é tomada uma altura hipotética ( $h$ ), com base em cálculos pré-estimados, para que seja adotada um valor que possa atender ou não ao dimensionamento. Mesmo que calculada, essa altura é um chute inicial para o dimensionamento, o não atendimento ao dimensionamento com a altura adotada implica na escolha de uma nova espessura.

Figura 41 – Pré-dimensionamento da laje

2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO	
n	-
d <sub>est</sub>	- cm
h	- cm
h <sub>dot</sub>	cm
d'	- cm

Fonte: Autoria própria (2022).

A variável  $h_{dot}$  é determinada pelo usuário, com base na altura pré-dimensionada  $h$ . Com a obtenção da altura, o próximo passo da planilha é o de determinação das ações atuantes na laje. A Figura 42 destina ao usuário determinar quais cargas a laje dimensionada está sujeita, para que sejam calculadas as combinações de ações no ELU e ELS.

Figura 42 – Ações atuantes na laje

3 AÇÕES ATUANTES	COMBINAÇÃO DE AÇÕES
<i>carga proveniente do peso próprio:</i>	G <sub>TOTAL</sub> 1,65 kN/m <sup>2</sup>
g <sub>1</sub> 25 kN/m <sup>3</sup>	Q <sub>TOTAL</sub> 1,5 kN/m <sup>2</sup>
<i>carga proveniente do revestimento:</i>	C <sub>ELU</sub> 4,41 kN/m <sup>2</sup>
g <sub>2</sub> 1,4 kN/m <sup>2</sup>	Ψ <sub>1</sub> 0,4
<i>carga proveniente do forro:</i>	Ψ <sub>2</sub> 0,3
g <sub>3</sub> 0,25 kN/m <sup>2</sup>	<i>combinação quase permanente:</i>
<i>carga proveniente de alvenaria:</i>	C <sub>ELS1</sub> 2,1 kN/m <sup>2</sup>
g <sub>4</sub> kN/m <sup>2</sup>	<i>devido a cargas acidentais:</i>
<i>ação variável:</i>	C <sub>ELS2</sub> 1,5 kN/m <sup>2</sup>
q <sub>1</sub> 1,5 kN/m <sup>2</sup>	<i>combinação frequente:</i>
	C <sub>ELS3</sub> 2,25 kN/m <sup>2</sup>

Fonte: Autoria própria (2022).

Os dados inseridos são das cargas consideradas no cálculo de todas as análises, com todos os valores retirados da NBR 6118 (ABNT, 2014) para o projeto genérico dimensionado. A etapa 4 do procedimento de cálculo da planilha é o de análise estrutural. Os valores para os momentos fletores e cortantes são obtidos por meio das Equações (15), (16), (17) e (18) e Equações (20), (21), (22) e (23) respectivamente. Lembrando que no cálculo das lajes maciças, são utilizadas as Tabelas de Bares, portanto, as condições de contorno e a geometria da laje são necessárias para o cálculo.

Figura 43 – Análise estrutural da laje

4 ANÁLISE ESTRUTURAL		
<i>momentos fletores máximos</i>		
$M_{sdx+}$	-	kNm/m
$M_{sdx-}$	-	kNm/m
$M_{sdy+}$	-	kNm/m
$M_{sdy-}$	-	kNm/m
<i>reações nas vigas de apoio</i>		
$q_x$	-	kN/m
$q'_x$	-	kN/m
$q_y$	-	kN/m
$q'_y$	-	kN/m

Fonte: Autoria própria (2022).

As duas últimas etapas no processo de cálculo da planilha dizem respeito aos estados limites. Na etapa 5 é realizado o dimensionamento da armadura para flexão no estado limite último, como também é realizada a verificação do cisalhamento. Dentro do dimensionamento da armadura necessária a flexão é verificada o domínio de deformação em que se encontra a estrutura, para verificar o atendimento ao ELU, como é exemplificado na etapa “DOMÍNIOS” (Figura 44).

Figura 44 – Dimensionamento da laje no ELU

5.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO		DOMÍNIOS		5.2 CISALHAMENTO NO ELU	
$A_{sx+}$	<input type="text" value="-"/> cm <sup>2</sup> /m	$kx < kx_{23} < kx_{lim} < kx_{34}$		$\tau_{Rd}$	<input type="text" value="-"/> kN/cm <sup>2</sup>
$A_{sx-}$	<input type="text" value="-"/> cm <sup>2</sup> /m	$kx$	<input type="text" value="0,000"/>	$k$	<input type="text" value="-"/> $\geq 1$
$A_{sy+}$	<input type="text" value="-"/> cm <sup>2</sup> /m	$kx_{23}$	<input type="text" value="0,259"/>	$\rho_1$	<input type="text" value="-"/> $\leq 0,02$
$A_{sy-}$	<input type="text" value="-"/> cm <sup>2</sup> /m	$kx_{lim}$	<input type="text" value="0,450"/>	$V_{Rd}$	<input type="text" value="-"/> kN/m
		$kx_{34}$	<input type="text" value="0,628"/>	$V_{Rd}$	<input type="text" value="≥"/> $V_{Sd}$
				-	<input type="text" value="≥"/> 0,00
				<b>DISPENSA ARMADURA</b>	

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se que  $kx$  está grifado pela cor verde, indicando que para as variáveis do dimensionamento, o valor da linha neutra está abaixo do limite, caso contrário, a cor vermelha indicará que  $kx$  está acima do limite da norma. O mesmo acontece para o cisalhamento, caso a estrutura não dispense armadura, a cor em vermelho seguido da frase em azul indicará que o cortante resistente de cálculo é menor que o cortante solicitante de cálculo.

A última etapa do dimensionamento é o cálculo e verificação das flechas ao atendimento do estado limite de serviço e para isso, são calculados três valores de flechas, um valor para flecha imediata (sem considerar o efeito de fluência do concreto), a flecha diferida (que considera o efeito da fluência) e a flecha limite de deformação. Para verificação do estado limite dos deslocamentos visíveis, é utilizada combinação de ações quase permanentes calculada no tópico 3 da planilha. Já para a verificação do estado limite das vibrações excessivas, é utilizada a combinação das cargas acidentais, também calculada no tópico 3.



A Figura 47 destaca em vermelho o local onde devem ser inseridos os dados referentes ao intervalo de variação e proporcionalidade. Na célula “E3” deve ser inserido o valor que variará no menor vão da laje, ou seja, esse valor define a cada quantos metros o usuário deseja dimensionar e verificar uma nova laje. Já na célula “E4”, deve ser inserido o fator em que os vãos da laje devem seguir a fim de garantir que dentro de uma proporcionalidade, os valores para  $l_x$  sejam menores que  $l_y$ .

Figura 47 – Dados de análise

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		DADOS DE ANÁLISE					ANALISAR	
3		VARIA A CADA						
4		PROPORCIONALIDADE					ZERAR	
5								
6		$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$
7		(m)	(m)	-	(cm)	( $kN/m^2$ )	-	(MPa)
8								
9								

Fonte: Autoria própria (2022).

Ainda na Figura 47, é possível identificar dois botões com as identificações de “Analisar” e “Zerar”, que têm como funções iniciar a parametrização automaticamente e zerar a parametrização após análise e coleta dos dados obtidos, respectivamente. Além disso, em cor mais destacada, estão alguns dos parâmetros fixos ou variáveis (a depender da análise definida).

Para melhor exemplificação dos cálculos, será adotado um exemplo genérico de demonstração das etapas automatizadas da planilha. A Figura 48 demonstra através de dados genéricos o funcionamento da planilha na etapa de cálculo dos momentos fletores da laje. No exemplo da Figura 48, somente o vão da laje está variando.

Figura 48 – Cálculo dos momentos fletores máximos na planilha

ANÁLISE		ANÁLISE 11				ANALISAR					
VARIA A CADA		0,5		m		ZERAR					
PROPORCIONALIDADE		1									
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_x$	$m_x'$	$m_y$	$m_y'$	
(m)	(m)	-	(cm)	( $kN/m^2$ )	-	(MPa)	$kNm/m$	$kNm/m$	$kNm/m$	$kNm/m$	
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	1,14	2,46	0,89	-	
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	1,78	3,84	1,38	-	
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	2,56	5,53	1,99	-	
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	3,48	7,53	2,71	-	
4,00	4,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	4,55	9,83	3,54	-	

Fonte: Autoria própria (2022).

A partir dos dados iniciais, a planilha calcula os momentos fletores máximos onde eles existirem, esses valores são obtidos em uma tabela dentro da planilha que calcula os momentos de acordo com os dados de cada laje (Figura 49).

Figura 49 – Tabela de momentos fletores

The image shows a spreadsheet interface with two buttons: 'ANALISAR' and 'ZERAR'. A red arrow points to the 'ZERAR' button. Below the buttons is a table with columns: 'caso', 'f<sub>ck</sub> (MPa)', 'm<sub>x</sub> (kNm/m)', 'm<sub>x'</sub> (kNm/m)', 'm<sub>y</sub> (kNm/m)', and 'm<sub>y'</sub> (kNm/m)'. The table contains five rows of data. A black arrow points from this table to a larger table below, which is titled 'CASO 3'. This larger table has columns: 'λ', 'p (kN/m²)', 'l<sub>x</sub> (m)', 'l<sub>y</sub> (m)', 'μ<sub>x</sub>', 'μ<sub>x'</sub>', 'μ<sub>y</sub>', 'μ<sub>y'</sub>', 'm<sub>x</sub> (kNm/m)', 'm<sub>x'</sub> (kNm/m)', 'm<sub>y</sub> (kNm/m)', and 'm<sub>y'</sub> (kNm/m)'. It contains six rows of data.

caso	f <sub>ck</sub> (MPa)	m <sub>x</sub> (kNm/m)	m <sub>x'</sub> (kNm/m)	m <sub>y</sub> (kNm/m)	m <sub>y'</sub> (kNm/m)
3,00	25,00	1,14	2,46	0,89	-
3,00	25,00	1,78	3,84	1,38	-
3,00	25,00	2,56	5,53	1,99	-
3,00	25,00	3,48	7,53	2,71	-
3,00	25,00	4,55	9,83	3,54	-

CASO 3												
λ	p (kN/m²)	l <sub>x</sub> (m)	l <sub>y</sub> (m)	μ <sub>x</sub>	μ <sub>x'</sub>	μ <sub>y</sub>	μ <sub>y'</sub>	m <sub>x</sub> (kNm/m)	m <sub>x'</sub> (kNm/m)	m <sub>y</sub> (kNm/m)	m <sub>y'</sub> (kNm/m)	
1,00	7,21	2,00	2,00	3,94	8,52	3,07	-	1,14	2,46	0,89	-	
1,00	7,21	2,50	2,50	3,94	8,52	3,07	-	1,78	3,84	1,38	-	
1,00	7,21	3,00	3,00	3,94	8,52	3,07	-	2,56	5,53	1,99	-	
1,00	7,21	3,50	3,50	3,94	8,52	3,07	-	3,48	7,53	2,71	-	
1,00	7,21	4,00	4,00	3,94	8,52	3,07	-	4,55	9,83	3,54	-	

Fonte: Autoria própria (2022).

Após análise estrutural, as próximas colunas da planilha apresentam os resultados para a etapa de dimensionamento da armadura simples para combater os esforços de flexão, sendo nesta etapa a verificação dos domínios para atendimento ao estado limite último. As colunas de bordas vermelhas da planilha da Figura 50 apresentam os resultados para verificação as linhas neutras. Pode-se observar também que o vão  $l_x$  (negativo), está destacado, indicando que essa laje não atende ao estado limite último para essas características e com uma espessura de 8 cm. Portanto, essa laje é redimensionada com uma nova espessura que atenda ao ELU e ELS.

Figura 50 – Verificação dos domínios de deformação

ANÁLISE ANÁLISE 1.1

VARIA A CADA 0,5 m

PROPORCIONALIDADE 1

ANALISAR

ZERAR

$l_x$ (m)	$l_y$ (m)	$\lambda$ -	h (cm)	$C_{ELU}$ (kN/m <sup>2</sup> )	caso -	$f_{ck}$ (MPa)	$l_x$ $K_x$	$l_x$ $K_x$	$A_{sx+}$ cm <sup>2</sup> /m	$A_{sx-}$ cm <sup>2</sup> /m	$l_y$ $K_x$	$l_y$ $K_x$	$A_{sx+}$ cm <sup>2</sup> /m	$A_{sx-}$ cm <sup>2</sup> /m
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,052	0,115	0,62	1,38	0,040	0,000	0,48	-
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,082	0,185	0,98	2,22	0,063	0,000	0,76	-
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,120	0,277	1,44	3,33	0,092	0,000	1,11	-
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,166	0,399	1,99	4,79	0,127	0,000	1,53	-
4,00	4,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,222	0,566	2,67	6,80	0,169	0,000	2,03	-

Fonte: Autoria própria (2022).

Na verificação do ELS, a parametrizações passam por duas etapas de cálculo. Na primeira etapa, para cada nova espessura ou alteração da carga variável, novas ações serão combinadas para cálculo das flechas imediatas e diferidas (com consideração do efeito de fluência do concreto). A flecha limite também é alterada a cada 0,5 metros (variação padrão neste trabalho para o menor vão teórico).

Figura 51 – Etapa de cálculo das flechas

**TABELA DE CÁLCULO DAS FLECHAS**

$\lambda$	QP		CA		E kN/m <sup>2</sup>	h m	CASO 3 $\alpha$	QUASE PERMANENTE L/250				CARGAS ACIDENTAIS L/350			
	$C_{ELS1}$ p kN/m <sup>2</sup>	$C_{ELS2}$ p kN/m <sup>2</sup>	$l_x$ m					af cm	$\delta_{med}$ cm	$\delta_{dif}$ cm	$\delta_{limite}$ cm	af cm	$\delta_{med}$ cm	$\delta_{dif}$ cm	$\delta_{limite}$ cm
1,00	4,10	1,50	2,00	24.000.000	0,08	3,20	1,46	0,0171	0,0420	0,80	1,46	0,0063	0,0154	0,57	
1,00	4,10	1,50	2,50	24.000.000	0,08	3,20	1,46	0,0417	0,1026	1,00	1,46	0,0153	0,0375	0,71	
1,00	4,10	1,50	3,00	24.000.000	0,08	3,20	1,46	0,0865	0,2128	1,20	1,46	0,0316	0,0778	0,86	
1,00	4,10	1,50	3,50	24.000.000	0,08	3,20	1,46	0,1602	0,3941	1,40	1,46	0,0586	0,1442	1,00	
1,00	4,35	1,50	4,00	24.000.000	0,09	3,20	1,46	0,2037	0,5010	1,60	1,46	0,0702	0,1728	1,14	
1,00	4,60	1,50	4,50	24.000.000	0,10	3,20	1,46	0,2515	0,6187	1,80	1,46	0,0820	0,2018	1,29	
1,00	4,60	1,50	5,00	24.000.000	0,10	3,20	1,46	0,3833	0,9430	2,00	1,46	0,1250	0,3075	1,43	

Fonte: Autoria própria (2022).

Os dados calculados na Figura 51, são linkados na tabela de análise paramétrica para verificação do atendimento ao ELS juntamente com os demais dados.

Figura 52 – Verificação do ELS



ANÁLISE		ANÁLISE 1.1	
VARIA A CADA		0,5 m	
PROPORCIONALIDADE		1	

l <sub>x</sub> (m)	l <sub>y</sub> (m)	λ	h (cm)	C <sub>ELU</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	caso	f <sub>ck</sub> (MPa)	DESLOCAMENTOS VISÍVEIS			VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
							C <sub>ELS1</sub> kN/m <sup>2</sup>	δdif (cm)	δlimite (cm) L/250	C <sub>ELS2</sub> kN/m <sup>2</sup>	δdif (cm)	δlimite (cm) L/350
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	4,10	0,0420	0,8000	1,50	0,0154	0,5714
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	4,10	0,1026	1,0000	1,50	0,0375	0,7143
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	4,10	0,2128	1,2000	1,50	0,0778	0,8571
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	4,10	0,3941	1,4000	1,50	0,1442	1,0000
4,00	4,00	1,00	9,00	7,56	3,00	25,00	4,35	0,5010	1,6000	1,50	0,1728	1,1429
4,50	4,50	1,00	10,00	7,91	3,00	25,00	4,60	0,6187	1,8000	1,50	0,2018	1,2857
5,00	5,00	1,00	10,00	7,91	3,00	25,00	4,60	0,9430	2,0000	1,50	0,3075	1,4286

Fonte: Autoria própria (2022).

Embora no exemplo genérico adotado, não seja possível demonstrar, pois o ELU é responsável por limitar o dimensionamento desse problema, a planilha segue o mesmo raciocínio da verificação do ELU (Figura 50), aonde a flecha diferida for maior que a flecha limite, haverá a alteração de altura para que a laje atenda aos estados limites.

Portanto, o resultado da tabela de análise paramétrica (Figura 53), é a verificação, de todas as lajes dimensionadas na análise, quanto ao atendimento do ELU e ELS, ou seja, para cada laje verificada, basta que pelo menos um dos limites não sejam atendidos para que a própria planilha estime uma nova altura compatível. Vale lembrar que essa análise também pode ser feita manualmente e no caso deste trabalho, todas as análises serão feitas dessa maneira, para que os resultados sejam mais “palpáveis”.

Figura 53 – Dados obtidos da parametrização completa

ANÁLISE		ANÁLISE 1.1	
VARIA A CADA		0,5 m	
PROPORCIONALIDADE		1	

l <sub>x</sub> (m)	l <sub>y</sub> (m)	λ	h (cm)	C <sub>ELU</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	caso	f <sub>ck</sub> (MPa)	K <sub>x</sub>	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>	K <sub>y</sub>	DESLOCAMENTOS VISÍVEIS			VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
											C <sub>ELS1</sub> kN/m <sup>2</sup>	δdif (cm)	δlimite (cm) L/250	C <sub>ELS2</sub> kN/m <sup>2</sup>	δdif (cm)	δlimite (cm) L/350
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,052	0,115	0,040	0,000	4,10	0,0420	0,8000	1,50	0,0154	0,5714
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,082	0,185	0,063	0,000	4,10	0,1026	1,0000	1,50	0,0375	0,7143
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,120	0,277	0,092	0,000	4,10	0,2128	1,2000	1,50	0,0778	0,8571
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	0,166	0,399	0,127	0,000	4,10	0,3941	1,4000	1,50	0,1442	1,0000
4,00	4,00	1,00	9,00	7,56	3,00	25,00	0,149	0,352	0,114	0,000	4,35	0,5010	1,6000	1,50	0,1728	1,1429
4,50	4,50	1,00	10,00	7,91	3,00	25,00	0,139	0,326	0,107	0,000	4,60	0,6187	1,8000	1,50	0,2018	1,2857
5,00	5,00	1,00	10,00	7,91	3,00	25,00	0,174	0,420	0,133	0,000	4,60	0,9430	2,0000	1,50	0,3075	1,4286
5,50	5,50	1,00	11,00	8,26	3,00	25,00	0,163	0,390	0,125	0,000	4,85	1,0937	2,2000	1,50	0,3383	1,5714
6,00	6,00	1,00	12,00	8,61	3,00	25,00	0,156	0,371	0,119	0,000	5,10	1,2546	2,4000	1,50	0,3690	1,7143
6,50	6,50	1,00	13,00	8,96	3,00	25,00	0,151	0,359	0,116	0,000	5,35	1,4258	2,6000	1,50	0,3998	1,8571
7,00	7,00	1,00	13,00	8,96	3,00	25,00	0,177	0,430	0,136	0,000	5,35	1,9177	2,8000	1,50	0,5377	2,0000
7,50	7,50	1,00	14,00	9,31	3,00	25,00	0,172	0,415	0,132	0,000	5,60	2,1180	3,0000	1,50	0,5673	2,1429
8,00	8,00	1,00	15,00	9,66	3,00	25,00	0,168	0,405	0,129	0,000	5,85	2,3287	3,2000	1,50	0,5971	2,2857

Fonte: Autoria própria (2022).

Seguindo as etapas determinadas para obtenção dos resultados, a etapa posterior à criação da planilha no *Microsoft Excel® (Excel)* e dimensionamento, é a etapa de análise

paramétrica das análises definidas neste trabalho. Portanto, o tópico a seguir apresentará os resultados para cada uma das análises feitas.

## 4.2 Análises

### 4.2.1 Análise 1

As lajes da Análise 1 contam com uma variação nos vãos para abrangerem um maior número de proporcionalidades. As lajes vão desde uma proporcionalidade de 1,00 - configurando para o parâmetro lambda, uma laje armada em duas direções – até a proporcionalidade de 2,50 – configurando lajes armadas em uma direção. O intuito dessa variação foi o de testar os principais valores para o parâmetro adimensional lambda ( $\lambda$ ), com exceção do valor de 1,50 (valor utilizado para das demais análises), indo desde lajes quadradas até as retangulares (Tabela 31), para que a partir desses valores sejam calculados os momentos fletores máximos, as flechas e reações.

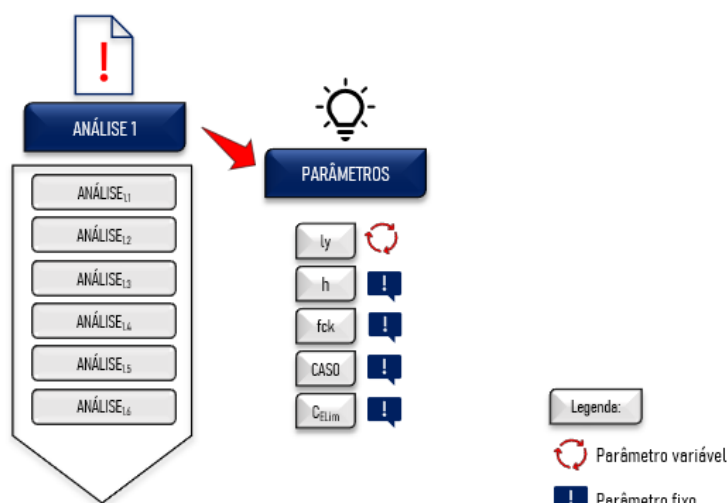
Tabela 31 – Valores para os coeficientes adimensionais conforme parâmetros adimensionais lambda

$\lambda$	Caso 3						
	Momento fletor			Flecha	Reações na viga		
	$\mu_x$	$\mu'_x$	$\mu_y$	$\alpha$	$k_x$	$k'_x$	$k_y$
1,00	3,94	8,52	3,07	3,2	2,32	4,02	1,83
1,25	5,03	10,22	2,51	4,18	2,59	4,48	1,83
1,75	6,24	11,92	1,74	5,26	2,89	5,01	1,83
2,00	6,51	12,34	1,48	5,66	2,99	5,18	1,83
$\infty$	7,61	12,76	1,48	3,38	3,66	6,25	1,83

Fonte: Autoria própria (2022).

O parâmetro principal de variação da Análise 1 é o maior vão teórico da laje ( $l_y$ ), portanto, em todas as 6 análises contidas na Análise 1,  $l_y$  inicia com valores distintos. A Figura 54 apresenta um esboço da análise, indicando quais parâmetros elencados como principais atuam.

Figura 54 – Subdivisões da Análise 1



Fonte: Autoria própria (2022).

Quanto à vinculação da laje, pôde-se observar que os valores para o momento fletor máximo sempre foram maiores na direção x negativa, o que se era esperado, por se tratar do caso 3 de vinculação, onde há um engaste no menor vão ( $l_x$ ) da laje. Quando observada a Análise 1.1, que considera lajes totalmente quadradas, de  $\lambda = 1$ , que vai desde um o vão de 2,00 X 200m até o vão de 8,00 X 8,00; predominantemente, a maioria das lajes verificadas apresenta uma espessura de 8 centímetros. Como citado, pela vinculação, os momentos fletores na região de engaste são maiores (Tabela 32) e no maior vão, não há momento fletor negativo, somente positivo.

Tabela 32 - Resultados parciais da Análise 1.1

$l_x$	$l_y$	$\lambda$	$h$	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_x$	$m_{x'}$	$m_y$
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	kNm/m	kNm/m
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	1,14	2,46	0,89
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	1,78	3,84	1,38
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	2,56	5,53	1,99
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	3,48	7,53	2,71
4,00	4,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	4,55	9,83	3,54

Fonte: Autoria própria (2022).

Em consequência dos maiores valores para  $m_{x'}$  (coluna nove da Tabela 32), os valores para  $k_x$  (coeficiente adimensional de relação da deformação com a linha neutra), que são diretamente proporcionais, também são maiores, portanto, verificou-se que ao dimensionar uma laje com vão 4,00x4,00m, não se obteve êxito ao atendimento do ELU,

conforme é exemplificado na Figura 55. Sendo assim, a partir desse vão a altura mínima da laje passa a ser de 9 cm, isso implica dizer que os mesmos vãos anteriores atendem aos estados limites com espessuras de 8 e 9 cm, entretanto, a partir do vão de 4,00x4,00m, os estados limites somente são atendidos com espessura de 9cm. Esse resultado é válido para as demais análises.

Figura 55 – Não atendimento ao ELU para Análise 1.1

$l_x$ m	$l_y$ m	$\lambda$ -	$h$ cm	$C_{ELU}$ kN/m <sup>2</sup>	caso -	$f_{ck}$ MPa	$m_x$ kNm/m	$l_x$ $K_x$
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	2,46	0,115
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	3,84	0,185
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	5,53	0,277
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	7,53	0,399
4,00	4,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	9,83	0,566

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se que o valor de  $k_x$  (destacado em vermelho na Figura 55) para o valor negativo no vão  $l_x$  é maior que o limite estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Prosseguindo na análise, verificou-se novamente a limitação do dimensionamento em decorrência do não atendimento do ELU (Figura 56), dessa vez para o vão de 4,50x4,50m com espessura de 9 cm.

Figura 56 – Limitação do vão pelo ELU na Análise 1.1

$l_x$ m	$l_y$ m	$\lambda$ -	$h$ cm	$C_{ELU}$ kN/m <sup>2</sup>	caso -	$f_{ck}$ MPa	$m_x$ kNm/m	$l_x$ $K_x$
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	2,46	0,115
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	3,84	0,185
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	5,53	0,277
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	7,53	0,399
4,00	4,00	1,00	9,00	7,56	3,00	25,00	10,31	0,352
4,50	4,50	1,00	9,00	7,56	3,00	25,00	13,04	0,471

Fonte: Autoria própria (2022).

Portanto, foi possível observar que para as condições proposta na Análise 1.1, o estado limite último foi quem sempre limitou o dimensionamento. Para todas as lajes, ocorre o dimensionamento no ELU e verificação no ELS, o fato de o ELU falhar enquanto o ELS sempre esteve dentro dos limites confirma esse resultado para a análise. A Figura 57 demonstra mais um dimensionamento em que o ELU falha enquanto o ELS se mantém dentro dos limites, tanto para deslocamentos visíveis quanto para vibrações excessivas.

Figura 57 – Análise dos Estados Limites da Análise 1.1

ANÁLISE		ANÁLISE 11		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS					VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
VARIA A CADA		0,5		m											
PROPORCIONALIDADE		1													
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_{x'}$	$l_x$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	$K_x$	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350	
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	2,46	0,115	4,10	0,0420	0,8000	1,50	0,0154	0,5714	
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	3,84	0,185	4,10	0,1026	1,0000	1,50	0,0375	0,7143	
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	5,53	0,277	4,10	0,2128	1,2000	1,50	0,0778	0,8571	
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3,00	25,00	7,53	0,399	4,10	0,3941	1,4000	1,50	0,1442	1,0000	
4,00	4,00	1,00	9,00	7,56	3,00	25,00	10,31	0,352	4,35	0,5010	1,6000	1,50	0,1728	1,1429	
4,50	4,50	1,00	10,00	7,91	3,00	25,00	13,65	0,326	4,60	0,6187	1,8000	1,50	0,2018	1,2857	
5,00	5,00	1,00	10,00	7,91	3,00	25,00	16,85	0,420	4,60	0,9430	2,0000	1,50	0,3075	1,4286	
5,50	5,50	1,00	10,00	7,91	3,00	25,00	20,39	0,539	4,60	1,3806	2,2000	1,50	0,4502	1,5714	

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se que as flechas diferidas são menores que as flechas limites, limites esses que seguem os valores da NBR 6118 (ABNT, 2014). Prosseguindo na análise, para a Análise 1.2, foi possível identificar que mais uma vez o ELU limitou o dimensionamento, conforme mostra Figura 58, aonde o vão de 5,50x6,88m não é atendido para o estado limite último, com uma espessura de 11 cm, reiterando a limitação da análise pelo ELU.

Figura 58 – ELU na Análise 1.2

ANÁLISE		ANÁLISE 12		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS					VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
VARIA A CADA		0,5		m											
PROPORCIONALIDADE		1,25													
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_{x'}$	$l_x$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	$K_x$	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350	
2,00	2,50	1,25	8,00	7,21	3,00	25,00	2,95	0,139	4,10	0,0549	0,8000	1,50	0,0201	0,5714	
2,50	3,13	1,25	8,00	7,21	3,00	25,00	4,61	0,225	4,10	0,1340	1,0000	1,50	0,0490	0,7143	
3,00	3,75	1,25	8,00	7,21	3,00	25,00	6,63	0,342	4,10	0,2779	1,2000	1,50	0,1017	0,8571	
3,50	4,38	1,25	9,00	7,56	3,00	25,00	9,46	0,318	4,35	0,3836	1,4000	1,50	0,1323	1,0000	
4,00	5,00	1,25	9,00	7,56	3,00	25,00	12,36	0,440	4,35	0,6545	1,6000	1,50	0,2257	1,1429	
4,50	5,63	1,25	10,00	7,91	3,00	25,00	16,37	0,405	4,60	0,8082	1,8000	1,50	0,2635	1,2857	
5,00	6,25	1,25	11,00	8,26	3,00	25,00	21,10	0,386	4,85	0,9758	2,0000	1,50	0,3018	1,4286	
5,50	6,88	1,25	11,00	8,26	3,00	25,00	25,54	0,491	4,85	1,4286	2,2000	1,50	0,4418	1,5714	

Fonte: Autoria própria (2022).

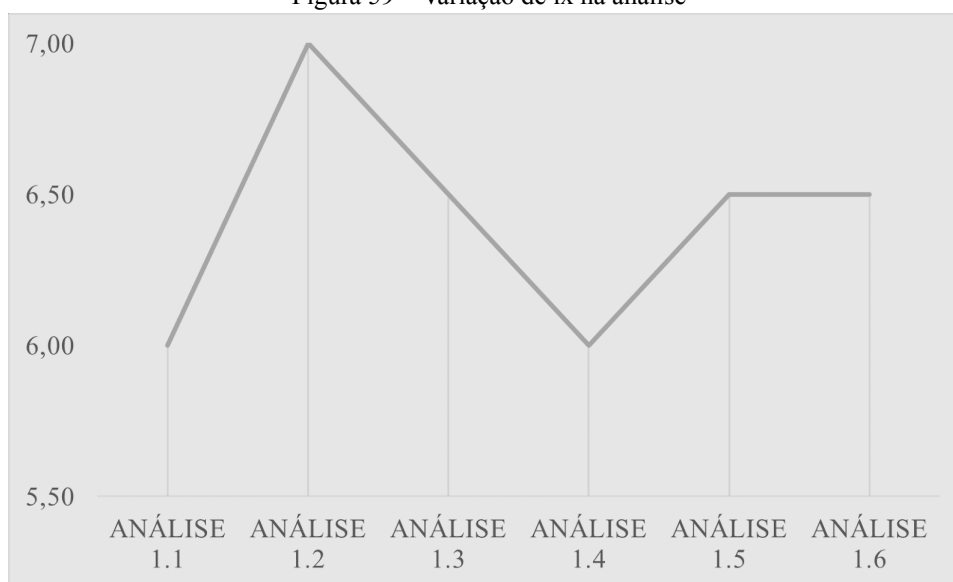
Sendo assim, dentro de todas as subdivisões criadas na Análise 1, as quatro primeiras análises (lajes bidirecionais) foram limitadas pelo ELU, já as duas últimas análises (laje unidirecionais) foram limitadas pelo ELS e ao final da análise, para altura máxima de 14 cm – valor preconizado na norma para lajes com armadura passiva – o vão máximo atingido em  $l_x$  foi o de 7,00 metros. Geralmente, a escolha por esse tipo de laje se dá quando o problema requer um vencimento de pequenos vãos, para valores maiores, são utilizados outros tipos de laje. Sendo assim, era esperado que o vão não chegasse a valores maiores e de fato não chegou. A Tabela 33 apresenta os valores das últimas lajes dimensionadas em cada subdivisão, quando considerada a altura de 14 cm.

Tabela 33 – Lajes limites da Análise 1

ANÁLISE	$l_x$	$l_y$	$\lambda$	$h$	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$
	m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa
1.1	6,00	6,00	1,00	14	9,31	3	25,00
1.2	7,00	8,75	1,25	14	9,31	3	25,00
1.3	6,50	11,38	1,75	14	9,31	3	25,00
1.4	6,00	12,00	2,00	14	9,31	3	25,00
1.5	6,50	14,63	2,25	14	9,31	3	25,00
1.6	6,50	16,25	2,50	14	9,31	3	25,00

Fonte: Autoria própria (2022).

O gráfico da Figura 59 expõe a variação para os valores do menor vão das lajes na situação de espessura limite.

Figura 59 – Variação de  $l_x$  na análise

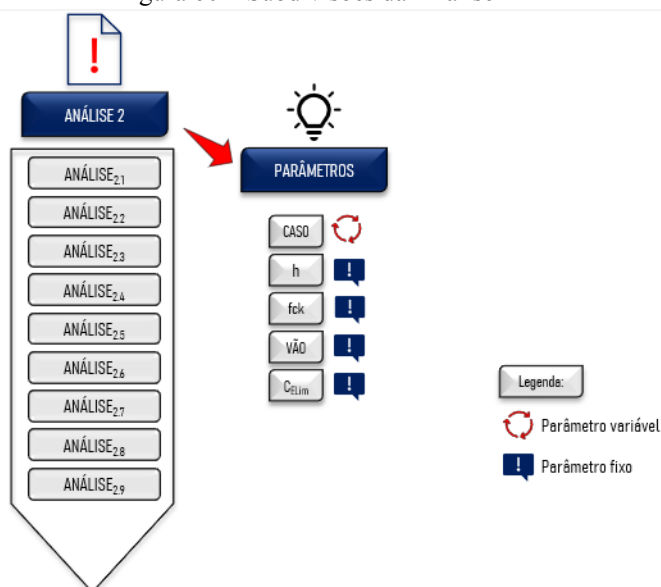
Fonte: Autoria própria (2022).

Por fim, os resultados da Análise 1 estão dispostos no APÊNDICE A, em uma tabela onde estão dispostos todos os resultados da análise filtrados por espessuras das lajes.

#### 4.2.2 Análise 2

Para uma laje inicial de 3,00x4,50m; com as condições de contorno variáveis, a Análise 2 objetiva analisar os resultados do dimensionamento de lajes maciças em concreto armado nessas variadas condições de contorno (Figura 14) em que uma laje pode-se encontrar. Portanto, a Análise 2 conta com nove casos avaliados.

Figura 60 – Subdivisões da Análise 2



**Fonte:** Autoria própria (2022).

As 9 análises compiladas dentro da Análise 2 implicam em condições distintas para análise estrutural e verificação de flechas, diferentemente da Análise 1, onde as condições de contorno não se alteravam e as condições distintas para análise estrutural e de

flechas eram impostas pelas mudanças no parâmetro adimensional lambda (devido a geometria).

A Análise 2.1 considera uma laje biapoiada na direção x e na direção y, onde existem apenas momentos fletores positivos. A altura mínima (8 cm) adotada obteve êxito para o ELU nas duas primeiras lajes dimensionadas, entretanto, na laje número 3 foi possível identificar o não atendimento tanto ao dimensionamento no ELU quanto a verificação no ELS para o Estado Limite de deslocamentos visíveis (Figura 61).

Figura 61 – Resultados parciais da Análise 2.1

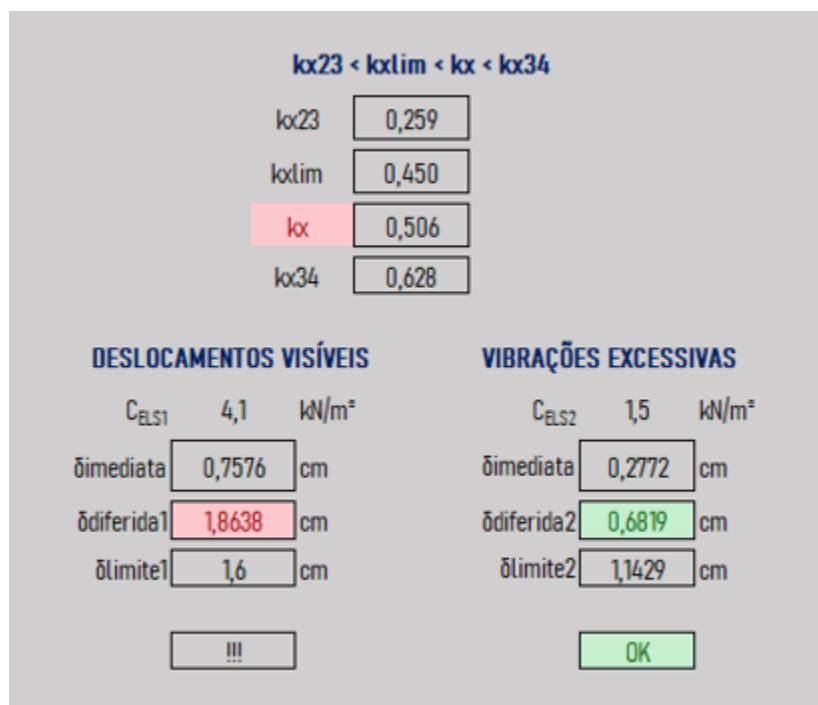
ANÁLISE		ANÁLISE 2.1		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS						
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_x$	$m_y$	$l_x$	$l_y$	$C_{ELS1}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	kNm/m	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	1,00	25,00	5,10	2,76	0,253	0,180	4,10	0,5897	12000	
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	1,00	25,00	6,94	3,75	0,361	0,180	4,10	1,0925	14000	
4,00	6,00	1,50	8,00	7,21	1,00	25,00	9,07	4,90	0,506	0,242	4,10	1,8638	16000	

Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 62 apresenta o relatório para o dimensionamento no ELU e verificação no ELS da terceira laje dimensionada. Nota-se que o valor de  $k_x$  é maior que o limite e esse limite é fixado de forma a garantir uma limitação que mantenha a peça longe do domínio 4, onde ocorreria uma ruptura frágil. Já no ELS, a verificação para vibrações excessivas obteve êxito, diferentemente da verificação para deslocamentos visíveis, pois a flecha diferida apresenta valor maior que a flecha limite.

Figura 62 – Relatório da laje 3





Fonte: Autoria própria (2022).

Prosseguindo na análise, identificou-se que a partir da laje em vão 4,50x6,75m o dimensionamento é limitado somente pelo estado limite de deslocamentos visíveis, ou seja, pelo ELS (Figura 63).

Figura 63 – Limitação do vão de 4,50x6,75m pelo ELS

ANÁLISE		ANÁLISE 2.1		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS					
VARIA A CADA		0,5		m									
PROPORCIONALIDADE		1,5											
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$l_x$	$l_y$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)		
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	$K_x$	$K_y$	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250		
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	1,00	25,00	0,253	0,130	4,10	0,5897	1,2000		
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	1,00	25,00	0,361	0,180	4,10	1,0925	1,4000		
4,00	6,00	1,50	9,00	7,56	1,00	25,00	0,320	0,161	4,35	1,3888	1,6000		
4,50	6,75	1,50	9,00	7,56	1,00	25,00	0,425	0,208	4,35	2,2246	1,8000		

Fonte: Autoria própria (2022).

A Tabela 34 apresenta os valores mínimos respectivos a cada vão da análise. Do vão inicial ao segundo vão, os valores mínimos para espessuras são de 8 cm, a partir do vão de 4,00x6,00m essa espessura mínima passa a ser de 9 cm até o vão seguinte que possui valor mínimo de 10 cm, enquanto os vãos de 5,00x7,50m; 5,50x8,25m e 6,00x9,00m possuem alturas de 12 cm; 13cm e 15 cm, respectivamente.

Tabela 34 – Espessuras mínimas para lajes da Análise 2.1

$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$l_x$	$l_y$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta lim$ (cm)
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	$K_x$	$K_y$	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250
3,00	4,50	1,50	8	7,21	1	25	0,253	0,130	4,10	0,59	1,20
3,50	5,25	1,50	8	7,21	1	25	0,361	0,180	4,10	1,09	1,40
4,00	6,00	1,50	9	7,56	1	25	0,320	0,161	4,35	1,39	1,60
4,50	6,75	1,50	10	7,91	1	25	0,296	0,150	4,60	1,71	1,80
5,00	7,50	1,50	12	8,61	1	25	0,222	0,115	5,10	1,68	2,00
5,50	8,25	1,50	13	8,96	1	25	0,223	0,115	5,35	2,03	2,20
6,00	9,00	1,50	15	9,66	1	25	0,191	0,099	5,85	2,04	2,40

Fonte: Autoria própria (2022).

A Análise 2.2, avalia as condições de vinculações do caso 2 – biapojada na direção x e apoiada e engastada na direção y. O momento negativo no vão  $l_y$  é o maior momento analisado na laje para este caso e o coeficiente adimensional de relação da deformação com a linha neutra ( $k_x$ ) é quem limita por meio do ELU o dimensionamento da laje até o vão de 4,50x6,75m, para esse vão, um valor inferior a 10 cm (h) não passa no ELU. Mais uma vez o estado limite de deslocamentos visíveis é preponderante na restrição da análise, dessa vez a partir do vão de 5,50x8,25m, onde a laje não atende nenhum dos Estados Limites (EL) (Figura 64). Essa restrição por ambos estados limites concomitantemente se

repete até o último vão da análise. Foi possível identificar que o ELS limitou mais rápido as espessuras dimensionadas.

Figura 64 – Limitação do vão de 5,50x8,25m pelo ELU e ELS

ANÁLISE		ANÁLISE 2.2		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS			VIBRAÇÕES EXCESSIVAS			
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_y$	$l_y$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	K <sub>x</sub>	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	2,00	25,00	7,29	0,383	4,10	0,4927	1,2000	1,50	0,1802	0,8571
3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	2,00	25,00	10,40	0,355	4,35	0,6801	1,4000	1,50	0,2345	1,0000
4,00	6,00	1,50	10,00	7,91	2,00	25,00	14,21	0,342	4,60	0,8944	1,6000	1,50	0,2917	1,1429
4,50	6,75	1,50	10,00	7,91	2,00	25,00	17,99	0,457	4,60	1,4327	1,8000	1,50	0,4672	1,2857
5,00	7,50	1,50	11,00	8,26	2,00	25,00	23,19	0,434	4,85	1,7298	2,0000	1,50	0,5350	1,4286
5,50	8,25	1,50	11,00	8,26	2,00	25,00	28,06	0,558	4,85	2,5325	2,2000	1,50	0,7833	1,5714

Fonte: Autoria própria (2022).

A Tabela 35 expõe os valores mínimos para os vão da Análise 2.2.

Tabela 35 – Espessuras mínimas para lajes da Análise 2.2

$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$l_x$	$l_y$		$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta lim$ (cm)
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	K <sub>x+</sub>	K <sub>x+</sub>	K <sub>x-</sub>	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250
3,00	4,50	1,50	8	7,21	2	25	0,208	0,127	0,383	4,10	0,49	1,20
3,50	5,25	1,50	9	7,56	2	25	0,194	0,119	0,355	4,35	0,68	1,40
4,00	6,00	1,50	10	7,91	2	25	0,187	0,115	0,342	4,60	0,89	1,60
4,50	6,75	1,50	11	8,26	2	25	0,184	0,113	0,335	4,85	1,13	1,80
5,00	7,50	1,50	11	8,26	2	25	0,232	0,141	0,434	4,85	1,73	2,00
5,50	8,25	1,50	12	8,61	2	25	0,226	0,138	0,420	5,10	2,05	2,20
6,00	9,00	1,50	13	8,96	2	25	0,223	0,136	0,413	5,35	2,40	2,40
6,50	9,75	1,50	15	9,66	2	25	0,188	0,115	0,343	5,85	2,35	2,60

Fonte: Autoria própria (2022).

Na Análise 2.3, para o vão de mesma geometria, as condições de contorno da laje são as do caso 3 (apoio + engaste no menor vão e biapoiado no maior vão). Para a análise 2.3, diferentemente das outras duas primeiras análises, apenas o ELU limita o dimensionamento da laje. O fato de a laje estar engastada em  $l_x$  é um facilitador para o atendimento ao ELS, pautando o resultado em que o ELU é quem problematiza a situação.

Figura 65 – Limitação do vão de 3,50x5,25m pelo ELU.

$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_x$	$m_x'$	$m_y$	$l_x$
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	kNm/m	kNm/m	K <sub>x</sub>
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	3,00	25,00	3,74	7,31	1,38	0,385
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	3,00	25,00	5,10	9,95	1,87	0,576
4,00	6,00	1,50	8,00	7,21	3,00	25,00	6,66	13,00	2,45	0,971

Fonte: Autoria própria (2022).

Para os três primeiros vãos da Análise 2.3, a altura mínima testada não passou no dimensionamento no estado limite último e as demais alturas dimensionadas também foram limitadas pelo ELU e seus resultados serão apresentados nos apêndices do trabalho. A Tabela 36 apresenta os resultados da Análise 2.3.

Tabela 36 – Espessuras mínimas para lajes da Análise 2.3

$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa
3,00	4,50	1,50	8	7,21	3	25
3,50	5,25	1,50	9	7,56	3	25
4,00	6,00	1,50	10	7,91	3	25
4,50	6,75	1,50	11	8,26	3	25
5,00	7,50	1,50	11	8,26	3	25
5,50	8,25	1,50	12	8,61	3	25
6,00	9,00	1,50	13	8,96	3	25
6,50	9,75	1,50	14	9,31	3	25
7,00	10,50	1,50	15	9,66	3	25

Fonte: Autoria própria (2022).

A partir do vão de 6,50x9,75m a altura necessária é de 14 cm, já para o vão de 7,00x10,50m a altura necessária é de 15 cm, quando se tratando de lajes maciças, para vãos maiores que 6 metros já era esperado que as alturas dimensionadas fossem de valores elevados. O fato é que para vencer vãos maiores que seis metros a altura requerida nesse tipo de laje, torna inviável a escolha da laje maciça como solução, pois o peso próprio da estrutura representa mais da metade da combinação de ações e dessa forma, grande parte da resistência é destinada a resistir o peso próprio da estrutura. A Tabela 37 traz em valores percentuais a

representatividade do peso próprio atuante da estrutura quando comparado à combinação de ações no ELU.

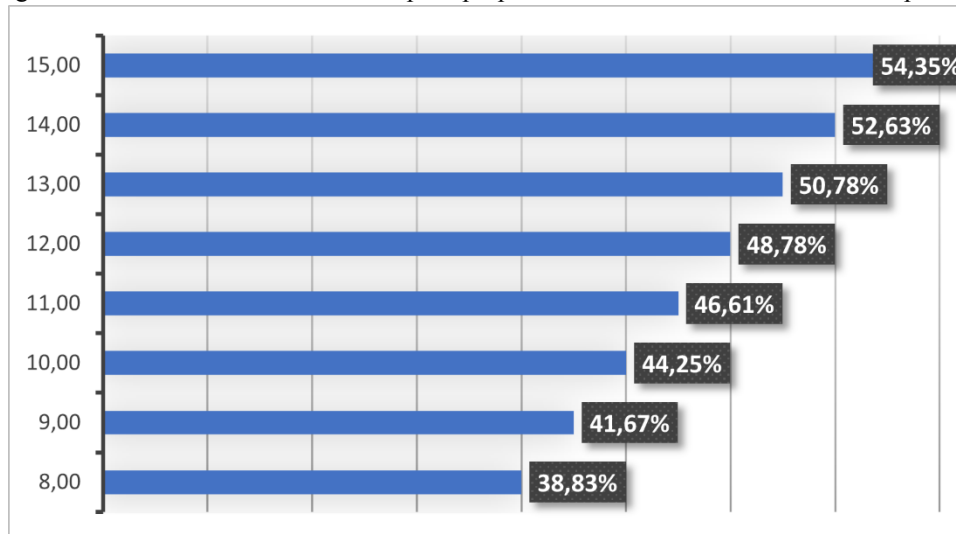
Tabela 37 – Percentual do peso próprio da estrutura para vãos maiores que 6 m na Análise 2.3

$l_x$	$l_y$	$h$	$C_{ELU}$	$g_1$	%
m	m	cm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	
3,00	4,50	8,00	7,21	2,80	38,83%
3,50	5,25	9,00	7,56	3,15	41,67%
4,00	6,00	10,00	7,91	3,50	44,25%
4,50	6,75	11,00	8,26	3,85	46,61%
5,50	8,25	12,00	8,61	4,20	48,78%
6,00	9,00	13,00	8,96	4,55	50,78%
6,50	9,75	14,00	9,31	4,90	52,63%
7,00	10,50	15,00	9,66	5,25	54,35%

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se que para vão maior que 6 metros esse percentual passa a ser maior que 50% da carga atuante na estrutura, ou seja, mesmo que atenda aos estados limites, analisando de maneira mais profunda o resultado, não vale a pena a escolha de uma laje maciça com essas características pois se torna inviável e antieconômico. Por exemplo, a laje de 7,00x10,50 com espessura de 15 cm tem com valor de  $d'$  11,30 cm e um valor para  $k_x$  de 0,412; dessa forma, o produto entre essas duas variáveis resulta em uma linha neutra de 4,65 cm, ou seja 4,65 centímetros da espessura da laje estão comprimidos destinados a combater o ELU, representando um desperdício de concreto, já que nas hipóteses básicas de dimensionamento despreza-se totalmente a resistência do concreto à tração, considerando que o restante da parcela de concreto tracionada só é importante nas condições de serviço da estrutura. Por fim a Figura 66 representa o aumento da influência do peso próprio da estrutura com o aumento da espessura da laje.

Figura 66 – Aumento da influência do peso próprio da estrutura com o aumento da espessura



Fonte: Autoria própria (2022).

É importante salientar através dos resultados da Figura 66 a limitação que a laje possui mesmo com o atendimento dos estados limites e essa situação ocorre em todas as análises a partir do momento em que o vão requer alturas maiores para a laje.

A Análise 2.4 também apresenta limitação majoritariamente pelo ELU, como ocorrido na Análise 2.3, o que é plausível, tendo em vista que a laje da análise 2.4 possui condições em seu contorno que a condicionam com dois engastes, tanto em x quanto em y, facilitando a verificação no ELS. Porém, quando visto os resultados da Análise 2.5, somente o ELU predomina como limitante (Figura 67) até o vão de 6,00x9,00m, vão aonde o ELS também passa a limitar o dimensionamento em conjunto com o ELU.

Figura 67 – Limitação do vão de 3,50x5,25m pelo ELU

ANÁLISE		ANÁLISE 2.5		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS			
$L_x$	$L_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_y$	$L_y$	$C_{ELS1}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	K <sub>x</sub>	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	5,00	25,00	6,81	0,353	4,35	0,4082	1,2000
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	5,00	25,00	9,27	0,521	4,10	0,7563	1,4000

Fonte: Autoria própria (2022).

No caso 5, só existe momento negativo no vão de  $l_y$  e é justamente onde ocorre a limitação pelo ELU até o vão de  $5,50 \times 8,25\text{m}$ , na Figura 67 são testadas as alturas mínimas, as demais alturas serão apresentadas nos apêndices do trabalho. A partir do vão de 6 metros (Figura 68), momento em que o vão passa a ter um valor usualmente grande para lajes maciças, ocorre uma limitação também pelo ELS para deslocamentos visíveis. As flechas são calculadas em função do menor vão da laje e, o ELS somente passar a falhar nessa verificação quando seu vão tender a valores iguais ou superiores a 6 metros.

Figura 68 – Vão em que o ELS começa a limitar o dimensionamento

ANÁLISE		ANÁLISE 2.5		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS				
VARIA A CADA		0,5 m										
PROPORCIONALIDADE		1,5										
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_y$	$l_y$	$C_{ELS1}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	K <sub>x</sub>	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	5,00	25,00	6,81	0,353	4,35	0,4082	1,2000	
3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	5,00	25,00	9,71	0,328	4,35	0,5635	1,4000	
4,00	6,00	1,50	10,00	7,91	5,00	25,00	13,28	0,315	4,60	0,7411	1,6000	
4,50	6,75	1,50	10,00	7,91	5,00	25,00	16,80	0,419	4,60	1,1871	1,8000	
5,00	7,50	1,50	11,00	8,26	5,00	25,00	21,66	0,398	4,85	1,4333	2,0000	
5,50	8,25	1,50	12,00	8,61	5,00	25,00	27,32	0,386	5,10	1,6997	2,2000	
6,00	9,00	1,50	12,00	8,61	5,00	25,00	32,51	0,481	5,10	2,4073	2,4000	

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se que a flecha diferida está no limite, com valor ligeiramente superior ao limite ( $L_x/250$ ), enquanto o coeficiente adimensional de representação da linha neutra, concomitantemente, também se apresenta com valor maior que o estabelecido para o limite. Mais uma vez o ELS de vibrações excessivas não foi um problema para o dimensionamento, já que o valor da carga acidental para esses casos analisados possui um valor baixo (Tabela 11), já que se é considerado uma carga eventual para edifícios residenciais. As demais subdivisões feitas para análise dentro da Análise 2 (Análises 2.6; 2.7; 2.8 e 2.9) apresentaram comportamentos semelhantes ao serem também limitadas somente pelo ELU e seus resultados serão apresentados nos apêndices finais.

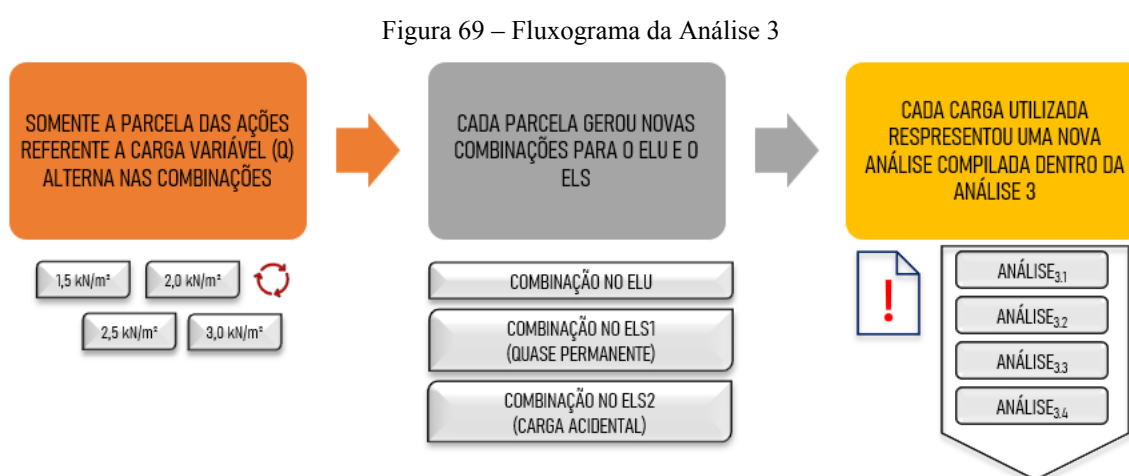
A Análise 2 contempla todos os casos de vinculação em que as lajes podem estar submetidas, o que possibilitou uma visão geral do comportamento das lajes, por exemplo, fora visto que para todos os casos, onde o estado limite de serviço esteve presente limitando o dimensionamento, ele esteve falhando juntamente com o ELU em vãos menores e a partir de vãos maiores o ELS predominou sozinho na limitação das lajes. Já em outros casos, principalmente em lajes consideradas engastadas, somente o ELU foi impactante no

dimensionamento. Quando somente o ELU predominou no dimensionamento, os vãos dimensionados foram maiores, quando os dois, tanto o ELU quanto o ELS, atuaram juntos, a partir dos vãos em que somente o ELS limitava, notou-se que houve uma limitação mais rápida dos vãos dimensionados.

Por fim, os resultados e conclusões da Análise 2 estão dispostos no APÊNDICE B, com todos os valores admissíveis para cada vão analisado.

#### 4.2.3 Análise 3

A Análise 3 é a análise de variação das combinações de ações, mas no caso, somente uma parcela das ações é variada, essa parcela é a ação variável. Em todas as análises foram consideradas as mesmas cargas para comporem a combinação do ELU e as combinações no ELS e com a alternância da carga variável, cada uma dessas combinações sofrerá impacto. No referencial teórico do trabalho, foi mostrado como considerar e calcular as ações atuante para peso próprio, revestimento e forro, as cargas provenientes de alvenaria também foram apresentadas, embora não tenham sido consideradas em nenhuma das análises. No caso da Análise 3 a parcela de carga variável segue os valores apresentados na Tabela 28 e a Figura 69 detalha como são definidas as análises mediante a alternância das cargas.



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Quanto a geometria e vinculação, a laje inicial da Análise 3 seguiu o modelo de laje genérica da Figura 34, uma laje armada em duas direções, com vãos de 3,00x4,50m; com apoio mais engaste em  $l_x$  e biapoiada em  $l_y$ . Na Análise 3.1 (carga acidental de 1,5 kN/m<sup>2</sup>), o



momento mais relevante é o único momento negativo que está presente no maior vão, portanto, ao analisar o respectivo coeficiente adimensional em  $l_y$ , notou-se que a limitação nessa análise se dá pelo ELU, quando para a altura mínima de 8 cm, a planilha identificou um valor de  $k_x$  maior que o limite já no segundo vão (Figura 70).

Figura 70 – Limitação do vão de 3,50x5,25m pelo ELU

ANÁLISE		ANÁLISE 3.1		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS					VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_{x'}$	$l_x$	$C_{ELS1}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)	$C_{ELS2}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)	
m	m	-	cm	$kN/m^2$	-	MPa	$kNm/m$	$K_x$	$kN/m^2$	cm	L/250	$kN/m^2$	cm	L/350	
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	3,00	25,00	7,31	0,385	4,10	0,3271	1,2000	1,50	0,1197	0,8571	
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	3,00	25,00	9,95	0,576	4,10	0,6060	1,4000	1,50	0,2217	1,0000	

Fonte: Autoria própria (2022).

Tanto para deslocamentos visíveis quanto vibrações excessivas, a verificação no ELS continua dentro da normalidade. Para vibrações excessivas, que depende somente da carga accidental, o valor de 1,50  $kN/m^2$  ainda é um valor baixo para que esse ELS falhe na verificação. Para uma nova espessura (9 cm), a limitação do vão também ocorreu de maneira rápida (Figura 71) e se deu também mediante o dimensionamento no ELU.

Figura 71 – Limitação do vão de 4,00x6,00m pelo ELU

ANÁLISE		ANÁLISE 3.1		ANALISAR		ZERAR											
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_{x'}$	$l_x$	$C_{ELS1}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)	$C_{ELS2}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)			
m	m	-	cm	$kN/m^2$	-	MPa	$kNm/m$	$K_x$	$kN/m^2$	cm	L/250	$kN/m^2$	cm	L/350			
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	3,00	25,00	7,31	0,385									
3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	3,00	25,00	10,44	0,357									
4,00	6,00	1,50	9,00	7,56	3,00	25,00	13,63	0,499									

Fonte: Autoria própria (2022).

Prosseguindo com a análise para vãos iguais ou maiores do que 6 metros com espessura mínima apontada pela planilha, a fim de analisar o impacto dos vãos maiores no dimensionamento e verificação dos estados limites, identificou-se que o ELS falha na verificação para esses vãos maiores em conjunto com o próprio ELU (Figura 72).

Figura 72 – Falhas no dimensionamento no ELU e verificação no ELS

ANÁLISE		ANÁLISE 3.1		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS				
VARIA A CADA		0,5		m								
PROPORCIONALIDADE		1,5										
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_x$	$l_x$	$C_{ELS1}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	K <sub>x</sub>	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	
6,00	9,00	1,50	12,00	8,61	3,00	25,00	34,93	0,530	5,10	1,9289	2,4000	
6,50	9,75	1,50	12,00	8,61	3,00	25,00	41,00	0,669	5,10	2,6569	2,6000	
7,00	10,50	1,50	12,00	8,61	3,00	25,00	47,55	0,874	5,10	3,5736	2,8000	

Fonte: Autoria própria (2022).

Em síntese, no geral, considerando os valores mínimos, o ELU dominou a limitação no dimensionamento até que a própria parametrização com variação a cada 50 cm proporcionasse vãos maiores onde o ELS começasse a não passar nas verificações das flechas. A Tabela 38 traz os valores para as lajes dimensionadas na Análise 3.1.

Tabela 38 – Valores mínimos dimensionados e verificados na Análise 3.1

$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	CEL U	CELS		caso	$f_{ck}$
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa
3,00	4,50	1,50	8	7,21	4,10	1,50	3	25
3,50	5,25	1,50	9	7,56	4,35	1,50	3	25
4,00	6,00	1,50	10	7,91	4,60	1,50	3	25
4,50	6,75	1,50	11	8,26	4,85	1,50	3	25
5,00	7,50	1,50	11	8,26	4,85	1,50	3	25
5,50	8,25	1,50	12	8,61	5,10	1,50	3	25
6,00	9,00	1,50	13	8,96	5,35	1,50	3	25
6,50	9,75	1,50	14	9,31	5,60	1,50	3	25
7,00	10,50	1,50	15	9,66	5,85	1,50	3	25

Fonte: Autoria própria (2022).

Na segunda análise (3.2), a carga acidental passou a ser de 2,0 kN/m<sup>2</sup> e além do ELU, foi possível identificar que a verificação para o estado limite de vibrações excessivas também passou a limitar o dimensionamento (Figura 73 Figura 73 – Estado limite de vibrações excessivas limitando o vão de 5,50x8,25m), essa situação também se repete para as demais análises parametrizadas dentro da Análise 3, o que se era esperado com o consequente

aumento da carga variável. A partir dos vãos com valores entre 5,00/5,50 metros notou-se a falha para vibrações excessivas. Além disso, foi possível inferir que à medida que as espessuras aumentaram, a limitação demorou mais a acontecer, ou seja, para espessuras menores em vãos maiores, o ELS por vibrações excessivas não foi atendido para as lajes dimensionadas, juntamente com o ELS de deslocamentos visíveis, mas na medida em que a espessura da laje aumentou, o vão tendeu a demorar mais a ser limitado gradativamente (Figura 74).

Figura 73 – Estado limite de vibrações excessivas limitando o vão de 5,50x8,25m

ANÁLISE		ANÁLISE 3.2				ANALISAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS			VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
VARIA A CADA		0,5		m		ZERAR		$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite (cm)$	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite (cm)$
PROPORCIONALIDADE		1,5						kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite (cm)$	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite (cm)$	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350	
3,00	4,50	1,50	8,00	7,91	3,00	25,00	4,25	0,3391	1,2000	2,00	0,1596	0,8571	
3,50	5,25	1,50	8,00	7,91	3,00	25,00	4,25	0,6282	1,4000	2,00	0,2956	1,0000	
4,00	6,00	1,50	8,00	7,91	3,00	25,00	4,25	1,0716	1,6000	2,00	0,5043	1,1429	
4,50	6,75	1,50	8,00	7,91	3,00	25,00	4,25	1,7166	1,8000	2,00	0,8078	1,2857	
5,00	7,50	1,50	8,00	7,91	3,00	25,00	4,25	2,6163	2,0000	2,00	1,2312	1,4286	
5,50	8,25	1,50	8,00	7,91	3,00	25,00	4,25	3,8305	2,2000	2,00	1,8026	1,5714	

Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 74 – ELS de vibrações excessivas limitando o dimensionamento

ANÁLISE		ANÁLISE 3.2				ANALISAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS			VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
VARIA A CADA		0,5		m		ZERAR		$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite (cm)$	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite (cm)$
PROPORCIONALIDADE		1,5						kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite (cm)$	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite (cm)$	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350	
3,00	4,50	1,50	9,00	8,26	3,00	25,00	4,25	0,2522	1,2000	2,00	0,1121	0,8571	
3,50	5,25	1,50	9,00	8,26	3,00	25,00	4,50	0,4671	1,4000	2,00	0,2076	1,0000	
4,00	6,00	1,50	9,00	8,26	3,00	25,00	4,50	0,7969	1,6000	2,00	0,3542	1,1429	
4,50	6,75	1,50	9,00	8,26	3,00	25,00	4,50	1,2765	1,8000	2,00	0,5673	1,2857	
5,00	7,50	1,50	9,00	8,26	3,00	25,00	4,50	1,9456	2,0000	2,00	0,8647	1,4286	
5,50	8,25	1,50	9,00	8,26	3,00	25,00	4,50	2,8486	2,2000	2,00	1,2660	1,5714	
6,00	9,00	1,50	9,00	8,26	3,00	25,00	4,50	4,0344	2,4000	2,00	1,7931	1,7143	

Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 74, a flecha diferida para deslocamentos visíveis é quase 1,7 vezes maior que a flecha limite, enquanto para vibrações excessivas esse valor é apenas ligeiramente maior, ou seja, considerando valores mínimos, o ELU é preponderante, já que o dimensionamento não atende os critérios de segurança da norma antes mesmo de ser impactado pelo ELS, seguido do ELS por deslocamentos visíveis e pelo ELS de vibrações excessivas. Em resumo, a Tabela 39 apresenta os valores obtidos mediante a Análise 3.2.

Tabela 39 – Valores mínimos da Análise 3.2

$l_x$	$l_y$	$\lambda$	$h$	CEL U	CELS		caso	fck
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa
3,00	4,50	1,50	8	7,91	4,25	2,00	3	25
3,50	5,25	1,50	9	8,26	4,50	2,00	3	25
4,00	6,00	1,50	10	8,61	4,75	2,00	3	25
4,50	6,75	1,50	11	8,96	5,00	2,00	3	25
5,00	7,50	1,50	12	9,31	5,25	2,00	3	25
5,50	8,25	1,50	13	9,66	5,50	2,00	3	25
6,00	9,00	1,50	14	10,01	5,75	2,00	3	25
6,50	9,75	1,50	15	10,36	6,00	2,00	3	25

Fonte: Autoria própria (2022).

Prosseguindo para a terceira análise, devido as condições definidas, a altura mínima (8 cm) adotada não foi capaz de atender o dimensionamento ao estado limite último (Figura 75), considerando as cargas atuantes definidas (Figura 76). A Análise 3.3 traz como carga accidental um valor de 2,5 kN/m<sup>2</sup> para os mesmos parâmetros fixados e uma altura mínima e inicial adotada de 9 cm.

Figura 75 – Domínios de deformação da Análise 3.3

$k_{x23} < k_{xlim} < k_x < k_{x34}$	
$k_{x23}$	0,259
$k_{xlim}$	0,450
$k_x$	0,482
$k_{x34}$	0,628

Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 76 – Cargas atuantes na Análise 3.3

**3 AÇÕES ATUANTES**

carga proveniente do peso próprio:  
 $g_1$   kN/m<sup>2</sup>

carga proveniente do revestimento:  
 $g_2$   kN/m<sup>2</sup>

carga proveniente do forro:  
 $g_3$   kN/m<sup>2</sup>

carga proveniente de alvenaria:  
 $g_4$   kN/m<sup>2</sup>

ação variável:  
 $q_1$   kN/m<sup>2</sup>

Fonte: Autoria própria (2022).

Partindo da altura inicial de 9 cm, a Análise 3.3 traz os mesmos resultados para limitação pelo ELU para seus valores mínimos (Figura 77).

Figura 77 – Limitação do vão de 4,00x6,00m pelo ELU

ANÁLISE

VARIA A CADA  m

PROPORCIONALIDADE

**ANALISAR**

**ZERAR**

$l_x$ m	$l_y$ m	$\lambda$ -	h cm	$C_{ELU}$ kN/m <sup>2</sup>	caso -	$f_{ck}$ MPa	$K_x$
3,00	4,50	1,50	9,00	8,96	3,00	25,00	0,303
3,50	5,25	1,50	9,00	8,96	3,00	25,00	0,440
4,00	6,00	1,50	9,00	8,96	3,00	25,00	0,635

Fonte: Autoria própria (2022).

Para a altura de 10 cm, a limitação pelo ELU volta a se repetir (Figura 78).

Figura 78 – Limitação do vão de 4,50x6,75m pelo ELU

ANÁLISE

VARIA A CADA  m

PROPORCIONALIDADE

**ANALISAR**

**ZERAR**

$l_x$ m	$l_y$ m	$\lambda$ -	h cm	$C_{ELU}$ kN/m <sup>2</sup>	caso -	$f_{ck}$ MPa	$K_x$
3,00	4,50	1,50	9,00	8,96	3,00	25,00	0,303
3,50	5,25	1,50	9,00	8,96	3,00	25,00	0,440
4,00	6,00	1,50	10,00	9,31	3,00	25,00	0,418
4,50	6,75	1,50	10,00	9,31	3,00	25,00	0,572
5,00	7,50	1,50	10,00	9,31	3,00	25,00	0,801

Fonte: Autoria própria (2022).

Dessa forma, os dados compilados na Análise 3.3 são apresentados na Tabela 40 em seus valores mínimos.

Tabela 40 – Valores mínimos parametrizados na Análise 3.3

<b>lx</b>	<b>ly</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>h</b>	<b>CEL U</b>	<b>CELS</b>		<b>caso</b>	<b>fck</b>
<b>m</b>	<b>m</b>	<b>-</b>	<b>cm</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>-</b>	<b>MPa</b>
3,00	4,50	1,50	9	8,96	4,40	2,50	3	25
3,50	5,25	1,50	9	8,96	4,65	2,50	3	25
4,00	6,00	1,50	10	9,31	4,90	2,50	3	25
4,50	6,75	1,50	11	9,66	5,15	2,50	3	25
5,00	7,50	1,50	12	10,01	5,40	2,50	3	25
5,50	8,25	1,50	13	10,36	5,65	2,50	3	25
6,00	9,00	1,50	14	10,71	5,90	2,50	3	25
6,50	9,75	1,50	15	11,06	6,15	2,50	3	25

Fonte: Autoria própria (2022).

Na Análise 3.4, os resultados seguiram os padrões das demais análises compiladas dentro da Análise 3, onde ocorre a limitação pelo ELU aos seus valores mínimos e quando levado ao extremo, onde a laje tende a falhar com a altura analisada para os demais estados limites além do crítico, o estado limite para vibrações excessivas costuma aparecer junto do estado limite de deslocamento visíveis na medida que o vão aumentar, reduzindo assim as espessuras que atendem os EL de cada laje analisada. Enfim, Tabela 41 traz os valores compilados na análise.

Tabela 41 – Valores parametrizados na última análise da Análise 3.4

<b>lx</b>	<b>ly</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>h</b>	<b>CEL U</b>	<b>CELS</b>		<b>caso</b>	<b>fck</b>
<b>m</b>	<b>m</b>	<b>-</b>	<b>cm</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>-</b>	<b>MPa</b>
3,00	4,50	1,50	9	9,66	4,55	3,00	3	25
3,50	5,25	1,50	10	10,01	5,05	3,00	3	25

4,00	6,00	1,50	11	10,36	5,30	3,00	3	25
4,50	6,75	1,50	11	10,36	5,30	3,00	3	25
5,00	7,50	1,50	12	10,71	5,55	3,00	3	25
5,50	8,25	1,50	13	11,06	5,80	3,00	3	25
6,00	9,00	1,50	14	11,41	6,05	3,00	3	25
6,50	9,75	1,50	15	11,76	6,30	3,00	3	25

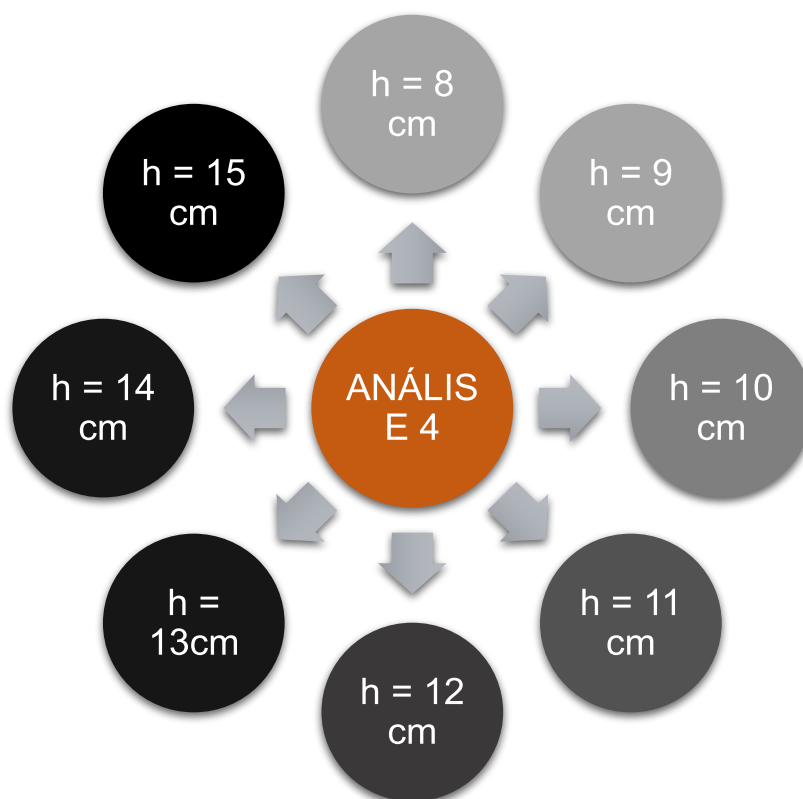
Fonte: Autoria própria (2022).

Concluindo a análise de variação das combinações de ação, os resultados e demais dados estão dispostos no APÊNDICE C, com todos os valores admissíveis para cada vão analisado.

#### 4.2.4 Análise 4

Em todas as análises a espessura é um dos parâmetros que teve seu valor variado quando a espessura mínima analisada não atendeu a pelo menos um dos critérios determinados por cada estado limite, seja de uma situação de ruptura ou do comportamento da peça em serviço. Os resultados da Análise 4 objetivaram compor em apenas uma análise resultados para essas variações de altura, com a diferença em que nessa análise, os demais parâmetros são fixos, diferentemente do que acontece em outras análises, ou seja, para os mesmos dados de caso de vinculação, geometria, combinações de cargas e resistência característica à compressão do concreto, foram analisadas todas as espessuras, totalizando 8 análises diferentes (Figura 79).

Figura 79 – Fluxograma da Análise 4



Fonte: Autoria própria (2022).

Para a Análise 4.1, a altura inicial adotada foi o valor mínimo considerado nessa análise que é 8 cm e já na segunda variação o valor de  $k_x$  negativo, onde existe o momento crítico da laje neste caso, apresentou valor superior ao limite do ELU (Figura 80), enquanto isso, as verificações feitas nas lajes para o estado limite de serviço permaneceram dentro dos limites aceitáveis e de fato, como foi abordado em outros resultados de análises anteriores, os ELS só costuma falhar nas verificações a partir de vãos com valores entre 5 e 6 metros.

Figura 80 – Limitação do vão de 3,50x5,25m pelo ELU

ANÁLISE		ANÁLISE 4.1		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS				VIBRAÇÕES EXCESSIVAS			
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	$h$	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_x$	$l_x$	$C_{EL,S1}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)	$C_{EL,S2}$	$\delta_{dif}$	$\delta_{limite}$ (cm)	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	$K_x$	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350	
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	3,00	25,00	7,31	0,385	4,10	0,3271	1,2000	1,50	0,1197	0,8571	
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	3,00	25,00	9,95	0,576	4,10	0,4060	1,4000	1,50	0,2217	1,0000	

Fonte: Autoria própria (2022).

A situação em que a linha neutra se apresenta fora dos limites preconizados pela norma volta a acontecer para a Análise 4.2 (Figura 81).

Figura 81 – Limitação do vão de 4,00x6,00m pelo ELU



ANÁLISE		ANÁLISE 4.2		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS					VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_x$	$l_x$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	K <sub>x</sub>	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350	
3,00	4,50	1,50	9,00	7,56	3,00	25,00	7,67	0,250	4,35	0,2437	1,2000	1,50	0,0841	0,8571	
3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	3,00	25,00	10,44	0,357	4,35	0,4516	1,4000	1,50	0,1557	1,0000	
4,00	6,00	1,50	9,00	7,56	3,00	25,00	13,63	0,499	4,35	0,7704	1,6000	1,50	0,2656	1,1429	

Fonte: Autoria própria (2022).

Novamente, é possível identificar para uma nova espessura, agora de 10 cm, na Análise 4.3, que o ELU volta a ser um empecilho no dimensionamento, agora para um vão maior (Figura 82)

Figura 82 – Limitação do vão de 4,50x6,75m pelo ELU

ANÁLISE		ANÁLISE 4.3		ANALISAR		ZERAR		DESLOCAMENTOS VISÍVEIS					VIBRAÇÕES EXCESSIVAS		
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	$f_{ck}$	$m_x$	$l_x$	$C_{ELS1}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	$C_{ELS2}$	$\delta dif$	$\delta limite$ (cm)	
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	K <sub>x</sub>	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/250	kN/m <sup>2</sup>	cm	L/350	
3,00	4,50	1,50	10,00	7,91	3,00	25,00	8,02	0,179	4,60	0,1879	1,2000	1,50	0,0613	0,8571	
3,50	5,25	1,50	10,00	7,91	3,00	25,00	10,92	0,252	4,60	0,3481	1,4000	1,50	0,1185	1,0000	
4,00	6,00	1,50	10,00	7,91	3,00	25,00	14,26	0,343	4,60	0,5939	1,6000	1,50	0,1937	1,1429	
4,50	6,75	1,50	10,00	7,91	3,00	25,00	18,05	0,459	4,60	0,9513	1,8000	1,50	0,3102	1,2857	

Fonte: Autoria própria (2022).

Dessa forma, analisou-se que existe uma relação diretamente proporcional, onde, na medida em que os vão aumenta em cada 50cm, a espessura necessária para atender aos limites de segurança também aumenta e que o ELU é preponderante na limitação do dimensionamento, pois a cada espessura mínima adotada, o ELU apresenta valores críticos no dimensionamento para lajes nessas condições de vinculação (caso) e geometria ( $\lambda$ ). A Tabela 42 exemplifica melhor essa relação proporcional onde as linhas vermelhas exclamam os resultados das lajes dimensionadas, apresentando vãos maiores que os limites de espessuras menores. Essa relação fica mais bem evidenciada nessa análise onde somente a altura varia.

Tabela 42 – Resultados gerais e parciais das Análises 4.1; 4.2; 4.3 e 4.4

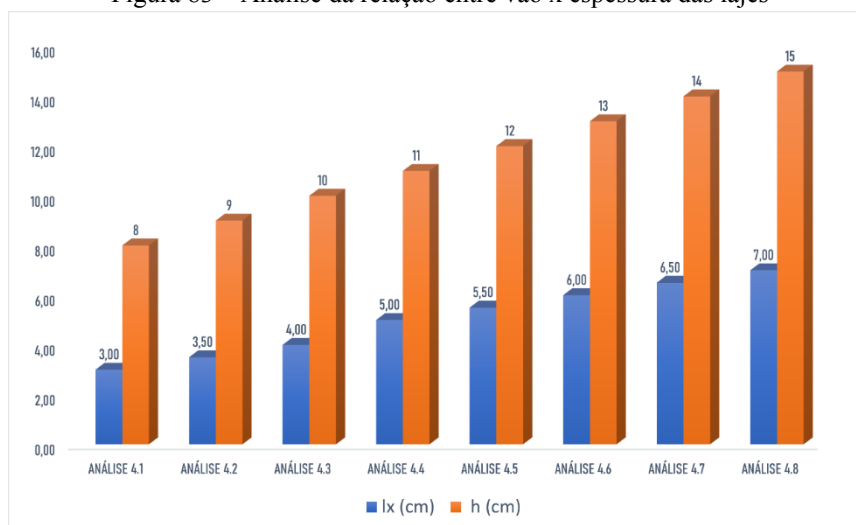
$l_x$	$l_y$	$\lambda$	h	CEL U	CELS		caso	$f_{ck}$
m	m	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sub>2</sub>	kN/m <sub>2</sub>	-	MPa
3,00	4,50	1,50	8	7,21	4,10	1,50	3	25
3,00	4,50	1,50	9	7,56	4,35	1,50	3	25
3,50	5,25	1,50	9	7,56	4,35	1,50	3	25

3,00	4,50	1,50	10	7,91	4,60	1,50	3	25
3,50	5,25	1,50	10	7,91	4,60	1,50	3	25
4,00	6,00	1,50	10	7,91	4,60	1,50	3	25
3,00	4,50	1,50	11	8,26	4,85	1,50	3	25
3,50	5,25	1,50	11	8,26	4,85	1,50	3	25
4,00	6,00	1,50	11	8,26	4,85	1,50	3	25
4,50	6,75	1,50	11	8,26	4,85	1,50	3	25
5,00	7,50	1,50	11	8,26	4,85	1,50	3	25

Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 83 mostra graficamente por meio de colunas, a relação em que altura (espessura da laje) e vão da laje (valores do menor vão efetivo) aumentam em seus respectivos valores limites de cada análise.

Figura 83 – Análise da relação entre vão x espessura das lajes



Fonte: Autoria própria (2022).

As colunas na cor azul remetem aos valores dos menores vão efetivos  $l_x$ , já as colunas laranja dizem respeito às espessuras dimensionadas e é possível dessa forma, visualizar o crescimento diretamente proporcional entre as duas grandezas.

Mais uma vez aproveitando que somente a altura varia nessa análise, foi possível extrair no ambiente de análise paramétrica da planilha valores referentes à linha neutra dos elementos dimensionados, para mais uma vez reiterar a inviabilidade por questões econômicas a utilização de lajes maciças com espessuras elevadas (Tabela 43).

Tabela 43 – Espessuras tracionadas e comprimidas para as lajes da análise

$l_x$	$l_y$	$h$	$d'$	$k_x$	comprimido	tracionado
					o	o

<b>m</b>	<b>m</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>-</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>
3,00	4,50	8	4,3	0,385	1,66	6,34
3,50	5,25	9	5,3	0,357	1,89	7,11
4,00	6,00	10	6,3	0,343	2,16	7,84
4,50	6,75	11	7,3	0,337	2,46	8,54
5,00	7,50	11	7,3	0,436	3,18	7,82
5,50	8,25	12	8,3	0,422	3,50	8,50
6,00	9,00	13	9,3	0,415	3,86	9,14
6,50	9,75	14	10,3	0,412	4,24	9,76
7,00	10,50	15	11,3	0,412	4,65	10,35

**Fonte:** Autoria própria (2022).

Analisando os valores para concreto tracionado, que é desprezado no dimensionamento de lajes (segundo as hipóteses básicas de pré-dimensionamento), nota-se que quanto maior a altura, maior a altura também de concreto tracionado que está sendo desperdiçado, contabilizando, por exemplo, 10,35 cm de concreto comprimido que além de notabilizarem um gasto desnecessário de concreto, ainda significam um peso maior para a estrutura. Conforme já analisado na Figura 66, esses valores simbolizam que grande parte da resistência está sendo destinada nessa situação para resistir o peso próprio da estrutura.

Ao finalizar a Análise 4, os dados coletados foram depositados no APÊNDICE D que estará presente para análise geral dos demais resultados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho trouxe uma abordagem sobre análise paramétrica de lajes maciças em concreto armado. Por meio da parametrização, buscou-se fazer o dimensionamento de lajes maciças mediante a variação de parâmetros de cálculo juntamente com o vão efetivo, com o intuito de se obter uma sensibilidade nas tomadas de decisão em um projeto de lajes desse tipo. Nesse caso, foi criada uma planilha eletrônica no Excel para dimensionar e analisar parametricamente as lajes do estudo, seguindo todos os critérios de durabilidade, resistência e segurança preconizados na NBR 6118 (ABNT, 2014) para o atendimento dos estados limites.

De acordo com os resultados obtidos, as lajes apresentaram comportamentos esperados quanto a variação de seus vãos. Para vãos menores as lajes maciças se comportaram bem, mas a partir do crescimento dos vãos advindos da parametrização, notou-se que em vãos maiores os estados limites limitaram mais rapidamente o dimensionamento. Além disso, a altura necessária para vencer grandes vãos demonstrou ser um fator limitante da laje para essa situação específica, em virtude de a laje apresentar elevado peso próprio e uma parcela grande de concreto tracionado desprezível e embora não seja um dos objetivos e nem foram feitos orçamentos, ficou claro que nessas situações era totalmente antieconômico aderir ao tipo de laje analisado.

Quanto ao dimensionamento no ELU e verificação no ELS, a maioria das lajes apresentou um comportamento similar, em que o ELU sempre ditou os valores mínimos para o dimensionamento, com exceção das lajes avaliadas na Análise 2, onde o ELS de deslocamentos visíveis também apresentava falha no dimensionamento. No caso de lajes com a presença de engastes, notou-se uma maior facilidade ao atendimento do ELS, o que explica a maioria das lajes analisadas terem o ELU como fator limitante no dimensionamento, visto que, a laje genérica adotada para grande parte das análises configura uma laje do caso 3, que possui um engaste em seu menor vão.

Para trabalhos futuros recomenda-se uma análise pautada também no ELS de abertura de fissuras, que não foi contemplado neste trabalho. Além disso, pode-se analisar também o impacto da variação do  $f_{ck}$  no dimensionamento desse tipo de laje.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3. ed. v. 2. Rio Grande: Dunas, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB-1: Projeto e execução de obras de concreto armado** — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1978.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto** — Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado — Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- BARRETO, Gledson Daniel de Sousa. **Aplicativo de windows para dimensionamento e detalhamento de lajes maciças contínuas e isoladas**. 2019.
- BEZERRA, Eric Mateus Fernandes. **Otimização multiobjetivo de lajes nervuradas em concreto armado**. 2017
- CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. São Paulo: Pini, v. 2, 2009
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014
- CLÍMACO, J. C. T. D. S. **Estruturas de Concreto Armado: Fundamentos de Projeto, Dimensionamento e Verificação**. 2ª. ed. Brasília: Univesidade de Brasília; Finatec, 2008. 410 p.
- NASCIMENTO, Cayssa Ágatha De Castro. **Análise comparativa entre o dimensionamento de lajes maciças de forma manual e com auxílio de software comercial**. 2020.
- SAMPAIO, P. **Análise Paramétrica e Comparativo do Custo e Esforços Entre os Modelos Estruturais Laje Lisa e Laje Maciça**, Rio Verde, Junho 2021. 60.



## ANEXOS / APÊNDICES

ANEXO A: Quadro de Bares para os coeficientes  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu'_x$ ,  $\mu'_y$  dos casos 1, 2 e 3.

$\lambda$	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu'_y$	$\mu_x$	$\mu'_x$	$\mu_y$
1,00	4,41	4,41	3,07	3,94	8,52	3,94	8,52	3,07
1,05	4,80	4,45	3,42	3,78	8,79	4,19	8,91	2,84
1,10	5,18	4,49	3,77	3,9	9,18	4,43	9,30	2,76
1,15	5,56	4,49	4,14	3,97	9,53	4,64	9,63	2,68
1,20	5,90	4,48	4,51	4,05	9,88	4,85	9,95	2,59
1,25	6,27	4,45	4,88	4,10	10,16	5,03	10,22	2,51
1,30	6,60	4,42	5,25	4,15	10,41	5,20	10,48	2,42
1,35	6,93	4,37	5,6	4,18	10,64	5,36	10,71	2,34
1,40	7,25	4,33	5,95	4,21	10,86	5,51	10,92	2,25
1,45	7,55	4,30	6,27	4,19	11,05	5,64	11,10	2,19
1,50	7,86	4,25	6,60	4,18	11,23	5,77	11,27	2,12
1,55	8,12	4,20	6,90	4,17	11,39	5,87	11,42	2,04
1,60	8,34	3,14	7,21	4,14	11,55	5,98	11,55	1,95
1,65	8,62	4,07	7,42	4,12	11,67	6,07	11,67	1,87
1,70	8,86	4,00	7,62	4,09	11,79	6,16	11,80	1,79
1,75	9,06	3,96	7,66	4,05	11,88	6,24	11,92	1,74
1,80	9,27	3,91	7,69	3,99	11,96	6,31	12,04	1,68
1,85	9,45	3,83	8,22	3,97	12,03	6,38	12,14	1,64
1,90	9,63	3,75	8,74	3,94	12,14	6,43	12,24	1,59
1,95	9,77	3,71	8,97	3,88	12,17	6,47	12,29	1,54
2,00	10,00	3,64	9,18	3,80	12,20	6,51	12,34	1,48
$\infty$	12,57	3,77	9,18	3,8	12,20	7,61	12,76	1,48

Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).





**ANEXO B:** Quadro de Bares para os coeficientes  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu'_x$ ,  $\mu'_y$  dos casos 4, 5 e 6.

$\lambda$	Caso 4				Caso 5			Caso 6		
	$\mu_x$	$\mu'_x$	$\mu_y$	$\mu'_y$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu'_y$	$\mu_x$	$\mu'_x$	$\mu_y$
1,00	2,81	6,99	2,81	6,99	2,15	3,17	6,99	3,17	6,99	2,15
1,05	3,05	7,43	2,81	7,18	2,47	3,32	7,43	3,29	7,20	2,07
1,10	3,30	7,87	2,81	7,36	2,78	3,47	7,87	3,42	7,41	1,99
1,15	3,53	8,28	2,80	7,50	3,08	3,58	8,26	3,52	7,56	1,89
1,20	3,76	8,69	2,79	7,63	3,38	3,70	8,65	3,63	7,70	1,80
1,25	3,96	9,03	2,74	7,72	3,79	3,80	9,03	3,71	7,82	1,74
1,30	4,16	9,37	2,69	7,81	4,15	3,90	9,33	3,79	7,93	1,67
1,35	4,33	9,65	2,65	7,88	4,5	3,96	9,69	3,84	8,02	1,59
1,40	4,51	9,93	2,60	7,94	4,85	4,03	10,00	3,90	8,11	1,52
1,45	4,66	10,41	2,54	8,00	5,19	4,09	10,25	3,94	8,13	1,45
1,50	4,81	10,62	2,47	8,06	5,53	4,14	10,49	3,99	8,15	1,38
1,55	4,93	10,82	2,39	8,09	5,86	4,16	10,70	4,03	8,20	1,34
1,60	5,06	10,99	2,31	8,12	6,18	4,17	10,91	4,06	8,25	1,28
1,65	5,16	11,16	2,24	8,14	6,48	4,14	11,08	4,09	8,28	1,23
1,70	5,27	11,30	2,16	8,15	6,81	4,12	11,24	4,12	8,30	1,18
1,75	5,36	11,43	2,11	8,16	7,11	4,12	11,39	4,14	8,31	1,15
1,80	5,45	11,55	2,04	8,17	7,41	4,10	11,43	4,15	8,32	1,11
1,85	5,53	11,57	1,99	8,17	7,68	4,08	11,65	4,16	8,33	1,08
1,90	5,60	11,67	1,93	8,18	7,95	4,04	11,77	4,17	8,33	1,04
1,95	5,67	11,78	1,91	8,19	8,21	3,99	11,83	4,17	8,33	1,01
2,00	5,74	11,89	1,88	8,20	8,47	3,92	11,88	4,18	8,33	0,97
$\infty$	7,06	12,50	1,95	8,20	12,58	4,13	11,88	4,18	8,33	0,97

Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).



**ANEXO C:** Quadro de Bares para os coeficientes  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu'_x$ ,  $\mu'_y$  dos casos 7, 8 e 9.

$\lambda$	Caso 7				Caso 8				Caso 9			
	$\mu_x$	$\mu'_x$	$\mu_y$	$\mu'_y$	$\mu_x$	$\mu'_x$	$\mu_y$	$\mu'_y$	$\mu_x$	$\mu'_x$	$\mu_y$	$\mu'_y$
1,00	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	2,38	5,98	2,66	6,46	2,78	6,47	2,09	5,56	2,31	5,50	2,10	5,29
1,10	2,63	6,50	2,71	6,75	2,95	6,76	2,04	5,65	2,50	5,85	2,09	5,43
1,15	2,87	7,11	2,75	6,97	3,09	6,99	1,98	5,7	2,73	6,14	2,06	5,51
1,20	3,11	7,72	2,78	7,19	3,23	7,22	1,92	5,75	2,94	6,43	2,02	5,59
1,25	3,43	8,81	2,79	7,36	3,34	7,40	1,85	5,75	3,04	6,67	1,97	5,64
1,30	3,56	8,59	2,77	7,51	3,46	7,57	1,78	5,76	3,13	6,90	1,91	5,68
1,35	3,76	8,74	2,74	7,63	3,55	7,7	1,72	5,75	3,25	7,09	1,86	5,69
1,40	3,96	8,88	2,71	7,74	3,64	7,82	1,64	5,74	3,38	7,28	1,81	5,7
1,45	4,15	9,16	2,67	7,83	3,71	7,91	1,59	5,73	3,48	7,43	1,73	5,71
1,50	4,32	9,44	2,63	7,91	3,78	8,00	1,53	5,72	3,58	7,57	1,66	5,72
1,55	4,48	9,68	2,60	7,98	3,84	8,07	1,47	5,69	3,66	7,68	1,60	5,72
1,60	4,63	9,91	2,55	8,02	3,89	8,14	1,42	5,66	3,73	7,79	1,54	5,72
1,65	4,78	10,13	2,50	8,03	3,94	8,20	1,37	5,62	3,80	7,88	1,47	5,72
1,70	4,92	10,34	2,45	8,10	3,98	8,25	1,32	5,58	3,86	7,97	1,40	5,72
1,75	5,04	10,53	2,39	8,13	4,01	8,30	1,27	5,56	3,91	8,05	1,36	5,72
1,80	5,17	10,71	2,32	8,17	4,04	8,34	1,20	5,54	3,95	8,12	1,32	5,72
1,85	5,26	10,88	2,27	8,16	4,07	8,38	1,17	5,55	3,98	8,18	1,26	5,72
1,90	5,36	11,04	2,22	8,14	4,10	8,42	1,14	5,56	4,01	8,24	1,21	5,72
1,95	5,45	11,20	2,14	8,13	4,11	8,45	1,11	5,60	4,04	8,29	1,19	5,72
2,00	5,55	11,35	2,07	8,12	4,13	8,47	1,08	5,64	4,07	8,33	1,16	5,72
$\infty$	7,07	12,50	2,05	8,12	4,18	8,33	1,09	5,64	4,19	8,33	1,17	5,72

Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).



**ANEXO D:** Quadro de Bares para o coeficiente  $\alpha$  dos casos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

$\lambda$	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	5,5	5,23	9,08	2,9	4,98	2,87	2,85
1,95	11,44	10,39	5,58	5,31	9,41	2,9	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
$\infty$	15,35	15,35	6,38	6,38	15,35	3,07	6,38	3,07	3,07

Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

**ANEXO E:** Quadro de Bares para o coeficiente  $k_x, k_y, k'_x, k'_y$  dos casos 1, 2 e 3.

$\lambda$	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	$\mu_x$	$\mu_x$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu'_y$	$\mu_x$	$\mu'_x$	$\mu_y$
1,00	2,50	2,50	1,83	2,32	4,02	2,32	4,02	1,83
1,05	2,62	2,50	1,92	2,37	4,10	2,38	4,13	1,83
1,10	2,73	2,50	2,01	2,41	4,17	2,44	4,23	1,83
1,15	2,83	2,50	2,10	2,44	4,22	2,50	4,32	1,83
1,20	2,92	2,50	2,20	2,46	4,27	2,54	4,41	1,83
1,25	3,00	2,50	2,29	2,48	4,30	2,59	4,48	1,83
1,30	3,08	2,50	2,38	2,49	4,32	2,63	4,55	1,83
1,35	3,15	2,50	2,47	2,50	4,33	2,67	4,62	1,83
1,40	3,21	2,50	2,56	2,50	4,33	2,70	4,68	1,83
1,45	3,28	2,50	2,64	2,50	4,33	2,74	4,74	1,83
1,50	3,33	2,50	2,72	2,50	4,33	2,77	4,79	1,83
1,55	3,39	2,50	2,80	2,50	4,33	2,80	4,84	1,83
1,60	3,44	2,50	2,87	2,50	4,33	2,82	4,89	1,83
1,65	3,48	2,50	2,93	2,50	4,33	2,85	4,93	1,83
1,70	3,53	2,50	2,99	2,50	4,33	2,87	4,97	1,83
1,75	3,57	2,50	3,05	2,50	4,33	2,89	5,01	1,83
1,80	3,61	2,50	3,10	2,50	4,33	2,92	5,05	1,83
1,85	3,65	2,50	3,15	2,50	4,33	2,94	5,09	1,83
1,90	3,68	2,50	3,20	2,50	4,33	2,96	5,12	1,83
1,95	3,72	2,50	3,25	2,50	4,33	2,97	5,15	1,83
2,00	3,75	2,50	3,29	2,50	4,33	2,99	5,18	1,83
$\infty$	5,00	2,50	5,00	2,50	4,33	3,66	6,25	1,83

Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

**ANEXO F:** Quadro de Bares para o coeficiente  $k_x, k_y, k'_x, k'_y$  dos casos 4, 5 e 6.

$\lambda$	Caso 4				Caso 5		Caso 6	
	$k_x$	$k'_x$	$k_y$	$k'_y$	$k_x$	$k'_y$	$k'_x$	$k_y$
1,00	1,83	3,17	1,83	3,17	1,44	3,56	3,56	1,44
1,05	1,92	3,32	1,83	3,17	1,52	3,66	3,63	1,44
1,10	2,00	3,46	1,83	3,17	1,59	3,75	3,69	1,44
1,15	2,07	3,58	1,83	3,17	1,66	3,84	3,74	1,44
1,20	2,14	3,70	1,83	3,17	1,73	3,92	3,80	1,44
1,25	2,20	3,80	1,83	3,17	1,80	3,99	3,85	1,44
1,30	2,25	3,90	1,83	3,17	1,88	4,06	3,89	1,44
1,35	2,30	3,99	1,83	3,17	1,95	4,12	3,93	1,44
1,40	2,35	4,08	1,83	3,17	2,02	4,17	3,97	1,44
1,45	2,40	4,15	1,83	3,17	2,09	4,22	4,00	1,44
1,50	2,44	4,23	1,83	3,17	2,17	4,25	4,04	1,44
1,55	2,48	4,29	1,83	3,17	2,24	4,28	4,07	1,44
1,60	2,52	4,36	1,83	3,17	2,31	4,30	4,10	1,44
1,65	2,55	4,42	1,83	3,17	2,38	4,32	4,13	1,44
1,70	2,58	4,48	1,83	3,17	2,45	4,33	4,15	1,44
1,75	2,61	4,53	1,83	3,17	2,53	4,33	4,17	1,44
1,80	2,64	4,58	1,83	3,17	2,59	4,33	4,20	1,44
1,85	2,67	4,63	1,83	3,17	2,66	4,33	4,22	1,44
1,90	2,70	4,67	1,83	3,17	2,72	4,33	4,24	1,44
1,95	2,72	4,71	1,83	3,17	2,78	4,33	4,26	1,44
2,00	2,75	4,75	1,83	3,17	2,84	4,33	4,28	1,44
$\infty$	3,66	6,33	1,83	3,17	5,00	4,33	5,00	1,44

Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

**ANEXO G:** Quadro de Bares para o coeficiente  $k_x, k_y, k'_x, k'_y$  dos casos 7, 8 e 9.

$\lambda$	Caso 7			Caso 8			Caso 9	
	$k_x$	$k'_x$	$k'_y$	$k'_x$	$k_y$	$k'_y$	$k'_x$	$k'_y$
1,00	1,44	2,50	3,03	3,03	1,44	2,50	2,50	2,50
1,05	1,52	2,63	3,08	3,12	1,44	2,50	2,62	2,50
1,10	1,59	2,75	3,11	3,21	1,44	2,50	2,73	2,50
1,15	1,66	2,88	3,14	3,29	1,44	2,50	2,83	2,50
1,20	1,73	3,00	3,16	3,36	1,44	2,50	2,92	2,50
1,25	1,80	3,13	3,17	3,42	1,44	2,50	3,00	2,50
1,30	1,88	3,25	3,17	3,48	1,44	2,50	3,08	2,50
1,35	1,94	3,36	3,17	3,54	1,44	2,50	3,15	2,50
1,40	2,00	3,47	3,17	3,59	1,44	2,50	3,21	2,50
1,45	2,06	3,57	3,17	3,64	1,44	2,50	3,28	2,50
1,50	2,11	3,66	3,17	3,69	1,44	2,50	3,33	2,50
1,55	2,16	3,75	3,17	3,73	1,44	2,50	3,39	2,50
1,60	2,21	3,83	3,17	3,77	1,44	2,50	3,44	2,50
1,65	2,25	3,90	3,17	3,51	1,44	2,50	3,48	2,50
1,70	2,30	3,98	3,17	3,84	1,44	2,50	3,53	2,50
1,75	2,33	4,04	3,17	3,87	1,44	2,50	3,57	2,50
1,80	2,37	4,11	3,17	3,90	1,44	2,50	3,61	2,50
1,85	2,40	4,17	3,17	3,93	1,44	2,50	3,65	2,50
1,90	2,44	4,21	3,17	3,96	1,44	2,50	3,68	2,50
1,95	2,47	4,28	3,17	3,99	1,44	2,50	3,72	2,50
2,00	2,50	4,33	3,17	4,01	1,44	2,50	3,75	2,50
$\infty$	3,66	6,34	3,17	5,00	1,44	2,50	5,00	2,50

**Fonte:** Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).





APÊNDICE A: Tabela de resultados da Análise 1.

lx	ly	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	cas o	$f_{ck}$	mx	mx'	my	lx	Asx+	Asx-	Asx+	$C_{ELSI}$	$\delta dif$
cm	cm	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/ m	kNm/ m	kNm/ m	$K_{X^-}$	cm <sup>2</sup> / m	cm <sup>2</sup> / m	cm <sup>2</sup> / m	kN/m <sup>2</sup>	cm
2,00	2,00	1,00	8,00	7,21	3	25,0 0	1,14	2,46	0,89	0,11	0,62	1,38	0,48	4,10	0,04 2
2,50	2,50	1,00	8,00	7,21	3	25,0 0	1,78	3,84	1,38	0,18	0,98	2,22	0,76	4,10	0,10 3
3,00	3,00	1,00	8,00	7,21	3	25,0 0	2,56	5,53	1,99	0,28	1,44	3,33	1,11	4,10	0,21 3
3,50	3,50	1,00	8,00	7,21	3	25,0 0	3,48	7,53	2,71	0,40	1,99	4,79	1,53	4,10	0,39 4
2,00	2,50	1,25	8,00	7,21	3	25,0 0	1,45	2,95	0,72	0,14	0,80	1,67	0,39	4,10	0,05 5
2,50	3,13	1,25	8,00	7,21	3	25,0 0	2,27	4,61	1,13	0,23	1,27	2,71	0,62	4,10	0,13 4
3,00	3,75	1,25	8,00	7,21	3	25,0 0	3,26	6,63	1,63	0,34	1,86	4,11	0,90	4,10	0,27 8
2,00	3,50	1,75	8,00	7,21	3	25,0 0	1,80	3,44	0,50	0,16	1,00	1,97	0,27	4,10	0,06 9
2,50	4,38	1,75	8,00	7,21	3	25,0 0	2,81	5,37	0,78	0,27	1,59	3,22	0,43	4,10	0,16 9
3,00	5,25	1,75	8,00	7,21	3	25,0 0	4,05	7,73	1,13	0,41	2,35	4,96	0,62	4,10	0,35 0
2,00	4,00	2,00	8,00	7,21	3	25,0 0	1,88	3,56	0,43	0,17	1,04	2,04	0,23	4,10	0,07 4
2,50	5,00	2,00	8,00	7,21	3	25,0 0	2,93	5,56	0,67	0,28	1,66	3,35	0,36	4,10	0,18 1
3,00	6,00	2,00	8,00	7,21	3	25,0 0	4,22	8,01	0,96	0,43	2,46	5,18	0,52	4,10	0,37 6
2,00	4,50	2,25	8,00	7,21	3	25,0 0	1,88	3,56	0,43	0,12	0,87	1,68	0,19	4,10	0,07 4
2,50	5,63	2,25	8,00	7,21	3	25,0 0	2,93	5,56	0,67	0,19	1,38	2,71	0,30	4,10	0,18 1
3,00	6,75	2,25	8,00	7,21	3	25,0 0	4,22	8,01	0,96	0,29	2,02	4,08	0,44	4,10	0,37 6
3,50	7,88	2,25	8,00	7,21	3	25,0 0	5,75	10,90	1,31	0,41	2,82	5,89	0,60	4,10	0,69 7
2,00	5,00	2,50	8,00	7,21	3	25,0 0	1,88	3,56	0,43	0,12	0,87	1,68	0,19	4,10	0,07 4
2,50	6,25	2,50	8,00	7,21	3	25,0 0	2,93	5,56	0,67	0,19	1,38	2,71	0,30	4,10	0,18 1
3,00	7,50	2,50	8,00	7,21	3	25,0 0	4,22	8,01	0,96	0,29	2,02	4,08	0,44	4,10	0,37 6
3,50	8,75	2,50	8,00	7,21	3	25,0 0	5,75	10,90	1,31	0,41	2,82	5,89	0,60	4,10	0,69 7

m	4,00	4,00	1,00	9,00	7,56	3	25,0 0	4,77	10,31	3,71	0,35	2,20	5,20	1,69	4,35	0,50 1
	3,50	4,38	1,25	9,00	7,56	3	25,0 0	4,66	9,46	2,32	0,32	2,15	4,71	1,04	4,35	0,38 4
	4,00	5,00	1,25	9,00	7,56	3	25,0 0	6,08	12,36	3,04	0,44	2,86	6,51	1,37	4,35	0,65 4
	3,50	6,13	1,75	9,00	7,56	3	25,0 0	5,78	11,04	1,61	0,38	2,71	5,65	0,71	4,35	0,48 3
	3,50	7,00	2,00	9,00	7,56	3	25,0 0	6,03	11,43	1,37	0,40	2,83	5,90	0,60	4,35	0,51 9
	4,00	9,00	2,25	9,00	7,56	3	25,0 0	7,87	14,93	1,79	0,39	3,21	6,67	0,69	4,35	0,88 6
	4,00	10,0 0	2,50	9,00	7,56	3	25,0 0	7,87	14,93	1,79	0,39	3,21	6,67	0,69	4,35	0,88 6
0	4,50	4,50	1,00	10,0 0	7,91	3	25,0 0	6,31	13,65	4,92	0,33	2,44	5,73	1,88	4,60	0,61 9
	5,00	5,00	1,00	10,0 0	7,91	3	25,0 0	7,79	16,85	6,07	0,42	3,06	7,39	2,34	4,60	0,94 3
	4,50	5,63	1,25	10,0 0	7,91	3	25,0 0	8,06	16,37	4,02	0,41	3,17	7,13	1,52	4,60	0,80 8
	4,00	7,00	1,75	10,0 0	7,91	3	25,0 0	7,90	15,09	2,20	0,37	3,10	6,45	0,82	4,60	0,63 5
	4,00	8,00	2,00	10,0 0	7,91	3	25,0 0	8,24	15,62	1,87	0,38	3,25	6,73	0,69	4,60	0,68 3
	4,50	10,1 3	2,25	10,0 0	7,91	3	25,0 0	10,43	19,77	2,37	0,38	3,65	7,55	0,78	4,60	1,09 4
	4,50	11,2 5	2,50	10,0 0	7,91	3	25,0 0	10,43	19,77	2,37	0,38	3,65	7,55	0,78	4,60	1,09 4
cm	5,50	5,50	1,00	11,0 0	8,26	3	25,0 0	9,84	21,29	7,67	0,39	3,32	7,95	2,54	4,85	1,09 4
	5,00	6,25	1,25	11,0 0	8,26	3	25,0 0	10,39	21,10	5,18	0,39	3,52	7,86	1,69	4,85	0,97 6
	4,50	7,88	1,75	11,0 0	8,26	3	25,0 0	10,44	19,94	2,91	0,36	3,53	7,34	0,93	4,85	0,80 6
	4,50	9,00	2,00	11,0 0	8,26	3	25,0 0	10,89	20,64	2,48	0,38	3,70	7,65	0,79	4,85	0,86 7
	5,00	11,2 5	2,25	11,0 0	8,26	3	25,0 0	13,44	25,48	3,06	0,38	4,12	8,52	0,88	4,85	1,32 1
	5,00	12,5 0	2,50	11,0 0	8,26	3	25,0 0	13,44	25,48	3,06	0,38	4,12	8,52	0,88	4,85	1,32 1
2	6,00	6,00	1,00	12,0 0	8,61	3	25,0 0	12,21	26,41	9,52	0,37	3,61	8,59	2,77	5,10	1,25 5
	5,50	6,88	1,25	12,0 0	8,61	3	25,0 0	13,10	26,62	6,54	0,37	3,89	8,67	1,87	5,10	1,15 7
	5,00	8,75	1,75	12,0 0	8,61	3	25,0 0	13,43	25,66	3,75	0,36	4,00	8,30	1,06	5,10	0,99 5
	5,00	10,0 0	2,00	12,0 0	8,61	3	25,0 0	14,01	26,56	3,19	0,37	4,19	8,65	0,90	5,10	1,07 0

	5,50	12,38	2,25	12,00	8,61	3	25,00	16,96	32,14	3,85	0,38	4,62	9,56	0,99	5,10	1,567	
	5,50	13,75	2,50	12,00	8,61	3	25,00	16,96	32,14	3,85	0,38	4,62	9,56	0,99	5,10	1,567	
3	6,50	6,50	1,00	13,00	8,96	3	25,00	14,92	32,25	11,62	0,36	3,93	9,31	3,01	5,35	1,426	
	7,00	7,00	1,00	13,00	8,96	3	25,00	17,30	37,41	13,48	0,43	4,60	11,17	3,52	5,35	1,918	
	6,00	7,50	1,25	13,00	8,96	3	25,00	16,22	32,97	8,10	0,37	4,30	9,56	2,07	5,35	1,352	
	6,50	8,13	1,25	13,00	8,96	3	25,00	19,04	38,69	9,50	0,45	5,11	11,66	2,44	5,35	1,862	
	5,50	9,63	1,75	13,00	8,96	3	25,00	16,91	32,31	4,72	0,36	4,49	9,33	1,19	5,35	1,201	
	6,00	10,50	1,75	13,00	8,96	3	25,00	20,13	38,45	5,61	0,45	5,43	11,57	1,42	5,35	1,702	
	5,50	11,00	2,00	13,00	8,96	3	25,00	17,64	33,45	4,01	0,37	4,70	9,73	1,01	5,35	1,293	
	6,00	13,50	2,25	13,00	8,96	3	25,00	21,00	39,80	4,77	0,38	5,16	10,68	1,10	5,35	1,831	
	6,00	15,00	2,50	13,00	8,96	3	25,00	21,00	39,80	4,77	0,38	5,16	10,68	1,10	5,35	1,831	
	4	7,50	7,50	1,00	14,00	9,31	3	25,00	20,63	44,62	16,08	0,42	4,95	11,95	3,79	5,60	2,118
		7,00	8,75	1,25	14,00	9,31	3	25,00	22,95	46,62	11,45	0,44	5,55	12,63	2,65	5,60	2,099
6,50		11,38	1,75	14,00	9,31	3	25,00	24,54	46,89	6,84	0,44	5,98	12,72	1,56	5,60	1,964	
6,00		12,00	2,00	14,00	9,31	3	25,00	21,82	41,36	4,96	0,38	5,26	10,88	1,13	5,60	1,534	
6,50		14,63	2,25	14,00	9,31	3	25,00	25,61	48,54	5,82	0,38	5,73	11,88	1,23	5,60	2,113	
6,50		16,25	2,50	14,00	9,31	3	25,00	25,61	48,54	5,82	0,38	5,73	11,88	1,23	5,60	2,113	
5	8,00	8,00	1,00	15,00	9,66	3	25,00	24,36	52,67	18,98	0,41	5,32	12,80	4,07	5,85	2,329	
	7,50	9,38	1,25	15,00	9,66	3	25,00	27,33	55,53	13,64	0,43	6,02	13,67	2,88	5,85	2,350	
	7,00	12,25	1,75	15,00	9,66	3	25,00	29,54	56,42	8,24	0,44	6,56	13,95	1,71	5,85	2,244	
	6,50	13,00	2,00	15,00	9,66	3	25,00	26,57	50,36	6,04	0,38	5,84	12,11	1,25	5,85	1,795	
	7,00	15,75	2,25	15,00	9,66	3	25,00	30,81	58,41	7,01	0,39	6,33	13,15	1,35	5,85	2,414	
	7,00	17,50	2,50	15,00	9,66	3	25,00	30,81	58,41	7,01	0,39	6,33	13,15	1,35	5,85	2,414	

Fonte: Autoria própria (2022).



**APÊNDICE B:** Tabela de resultados da Análise 2.

lx	ly	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	caso	mx	mx'	my	my'	Asx+	Asx-	Asx+	Asx-	$C_{ELSI}$	$\delta_{dif}$
cm	cm	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	kNm/m	kNm/m	kNm/m	kNm/m	cm <sup>2</sup> /m	cm <sup>2</sup> /m	cm <sup>2</sup> /m	cm <sup>2</sup> /m	kN/m <sup>2</sup>	cm
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	1	5,10	-	2,76	-	3,03	-	1,56	-	4,10	0,59 0
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	1	6,94	-	3,75	-	4,34	-	2,16	-	4,10	1,09 3
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	2	4,28	-	2,71	7,29	2,50	-	1,53	4,60	4,10	0,49 3
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	3	3,74	7,31	1,38	-	2,16	4,62	0,75	-	4,10	0,32 7
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	4	3,12	6,89	1,60	5,23	1,77	4,30	0,88	3,12	4,10	0,29 1
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	5	3,59	-	2,69	6,81	2,06	-	1,51	4,24	4,10	0,40 8
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	6	2,59	5,29	0,90	-	1,46	3,16	0,49	-	4,10	0,18 9
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	6	3,52	7,20	1,22	-	2,02	4,54	0,67	-	4,10	0,35 0
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	7	2,80	6,13	1,71	5,13	1,58	3,74	0,94	3,06	4,10	0,26 0
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	8	2,45	5,19	0,99	3,71	1,37	3,10	0,54	2,14	4,10	0,17 8
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	8	3,34	7,07	1,35	5,05	1,91	4,43	0,74	3,00	4,10	0,33 0
3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	9	2,32	4,91	1,08	3,71	1,30	2,91	0,59	2,14	4,10	0,16 7
3,50	5,25	1,50	8,00	7,21	9	3,16	6,69	1,47	5,05	1,80	4,15	0,81	3,00	4,10	0,30 9
4,00	6,00	1,50	9,00	7,56	1	9,51	-	5,14	-	4,73	-	2,38	-	4,35	1,38 9
3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	2	6,11	-	3,87	10,40	2,88	-	1,76	5,26	4,35	0,68 0

	3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	3	5,34	10,44	1,96	-	2,49	5,28	0,87	-	4,35	0,45 2
	3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	4	4,45	9,84	2,29	7,46	2,05	4,92	1,02	3,59	4,35	0,40 2
	3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	5	5,12	-	3,83	9,71	2,37	-	1,75	4,85	4,35	0,56 4
	4,00	6,00	1,50	9,00	7,56	6	4,83	9,86	1,67	-	2,23	4,94	0,74	-	4,35	0,44 5
	4,50	6,75	1,50	9,00	7,56	6	6,11	12,48	2,11	-	2,87	6,59	0,94	-	4,35	0,71 2
	3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	7	4,00	8,74	2,44	7,33	1,83	4,29	1,09	3,51	4,35	0,35 9
	4,00	6,00	1,50	9,00	7,56	7	5,23	11,42	3,18	9,57	2,43	5,89	1,44	4,77	4,35	0,61 2
	4,00	6,00	1,50	9,00	7,56	8	4,57	9,68	1,85	6,92	2,10	4,83	0,82	3,30	4,35	0,42 0
	4,50	6,75	1,50	9,00	7,56	8	5,79	12,25	2,34	8,76	2,71	6,43	1,05	4,30	4,35	0,67 2
	4,00	6,00	1,50	9,00	7,56	9	4,33	9,16	2,01	6,92	1,99	4,53	0,89	3,30	4,35	0,39 3
	4,50	6,75	1,50	9,00	7,56	9	5,48	11,59	2,54	8,76	2,55	6,00	1,14	4,30	4,35	0,63 0
	4,50	6,75	1,50	10,0 0	7,91	1	12,59	-	6,81	-	5,21	-	2,64	-	4,60	1,71 5
	4,00	6,00	1,50	10,0 0	7,91	2	8,35	-	5,29	14,21	3,30	-	2,02	6,01	4,60	0,89 4
	4,00	6,00	1,50	10,0 0	7,91	3	7,30	14,26	2,68	-	2,85	6,04	1,00	-	4,60	0,59 4
	4,00	6,00	1,50	10,0 0	7,91	4	6,09	13,44	3,13	10,20	2,35	5,63	1,17	4,11	4,60	0,52 9
	4,50	6,75	1,50	10,0 0	7,91	4	7,70	17,01	3,96	12,91	3,02	7,48	1,50	5,37	4,60	0,84 7
	4,00	6,00	1,50	10,0 0	7,91	5	7,00	-	5,24	13,28	2,72	-	2,00	5,55	4,60	0,74 1
	4,50	6,75	1,50	10,0 0	7,91	5	8,86	-	6,63	16,80	3,51	-	2,57	7,37	4,60	1,18 7
	5,00	7,50	1,50	10,0 0	7,91	6	7,89	16,12	2,73	-	3,10	7,00	1,02	-	4,60	0,83 7
	4,50	6,75	1,50	10,0 0	7,91	7	6,92	15,12	4,21	12,67	2,69	6,47	1,60	5,25	4,60	0,75 6
	5,00	7,50	1,50	10,0 0	7,91	8	7,47	15,82	3,03	11,31	2,92	6,84	1,13	4,61	4,60	0,79 0
	5,00	7,50	1,50	10,0 0	7,91	9	7,08	14,97	3,28	11,31	2,76	6,39	1,23	4,61	4,60	0,74 0
	4,50	6,75	1,50	11,0 0	8,26	2	11,04	-	6,99	18,78	3,75	-	2,31	6,83	4,85	1,13 5
cm	5,00	7,50	1,50	11,0 0	8,26	2	13,63	-	8,63	23,19	4,73	-	2,88	8,84	4,85	1,73 0

	4,50	6,75	1,50	11,0 0	8,26	3	9,65	18,85	3,55	-	3,25	6,86	1,14	-	4,85	0,75 4
	5,00	7,50	1,50	11,0 0	8,26	3	11,92	23,27	4,38	-	4,08	8,88	1,42	-	4,85	1,14 9
	5,00	7,50	1,50	11,0 0	8,26	4	9,93	21,93	5,10	16,64	3,35	8,24	1,66	5,94	4,85	1,02 2
	5,00	7,50	1,50	11,0 0	8,26	5	11,42	-	8,55	21,66	3,90	-	2,85	8,12	4,85	1,43 3
	5,50	8,25	1,50	11,0 0	8,26	6	9,97	20,36	3,45	-	3,36	7,53	1,11	-	4,85	0,97 1
	5,00	7,50	1,50	11,0 0	8,26	7	8,92	19,49	5,43	16,33	2,99	7,14	1,77	5,81	4,85	0,91 3
	5,50	8,25	1,50	11,0 0	8,26	7	10,79	23,59	6,57	19,76	3,66	9,03	2,16	7,26	4,85	1,33 6
	5,50	8,25	1,50	11,0 0	8,26	8	9,44	19,99	3,82	14,29	3,17	7,36	1,23	4,99	4,85	0,91 6
	6,00	9,00	1,50	11,0 0	8,26	8	11,24	23,79	4,55	17,01	3,83	9,13	1,48	6,09	4,85	1,29 7
	5,50	8,25	1,50	11,0 0	8,26	9	8,95	18,91	4,15	14,29	2,99	6,89	1,34	4,99	4,85	0,85 8
	6,00	9,00	1,50	11,0 0	8,26	9	10,65	22,51	4,94	17,01	3,61	8,51	1,61	6,09	4,85	1,21 5
	5,00	7,50	1,50	12,0 0	8,61	1	16,92	-	9,15	-	5,15	-	2,66	-	5,10	1,67 7
	5,50	8,25	1,50	12,0 0	8,61	2	17,19	-	10,89	29,25	5,24	-	3,19	9,74	5,10	2,05 1
	5,50	8,25	1,50	12,0 0	8,61	3	15,03	29,35	5,52	-	4,52	9,79	1,57	-	5,10	1,36 2
	5,50	8,25	1,50	12,0 0	8,61	4	12,53	27,66	6,43	20,99	3,71	9,09	1,84	6,56	5,10	1,21 2
	5,50	8,25	1,50	12,0 0	8,61	5	14,40	-	10,78	27,32	4,31	-	3,16	8,95	5,10	1,70 0
	6,00	9,00	1,50	12,0 0	8,61	6	12,37	25,26	4,28	-	3,66	8,15	1,21	-	5,10	1,11 3
	6,50	9,75	1,50	12,0 0	8,61	6	14,51	29,65	5,02	-	4,35	9,91	1,43	-	5,10	1,53 4
	6,00	9,00	1,50	12,0 0	8,61	7	13,39	29,26	8,15	24,52	3,98	9,75	2,35	7,86	5,10	1,53 3
	6,50	9,75	1,50	12,0 0	8,61	8	13,75	29,10	5,57	20,81	4,10	9,68	1,59	6,49	5,10	1,44 7
	6,50	9,75	1,50	12,0 0	8,61	9	13,02	27,54	6,04	20,81	3,87	9,04	1,72	6,49	5,10	1,35 5
	5,50	8,25	1,50	13,0 0	8,96	1	21,30	-	11,52	-	5,78	-	2,99	-	5,35	2,02 6
	6,00	9,00	1,50	13,0 0	8,96	2	21,29	-	13,48	36,22	5,78	-	3,53	10,73	5,35	2,39 7
	6,00	9,00	1,50	13,0 0	8,96	3	18,61	36,35	6,84	-	4,99	10,78	1,74	-	5,35	1,59 2



	6,00	9,00	1,50	13,0 0	8,96	4	15,52	34,26	7,97	26,00	4,10	10,02	2,03	7,24	5,35	1,41 7
	6,00	9,00	1,50	13,0 0	8,96	5	17,84	-	13,35	33,84	4,76	-	3,49	9,87	5,35	1,98 6
	7,00	10,5 0	1,50	13,0 0	8,96	6	17,52	35,78	6,06	-	4,67	10,57	1,53	-	5,35	1,70 2
	6,50	9,75	1,50	13,0 0	8,96	7	16,35	35,74	9,96	29,94	4,33	10,55	2,56	8,52	5,35	1,74 2
	7,00	10,5 0	1,50	13,0 0	8,96	8	16,60	35,12	6,72	25,11	4,40	10,33	1,71	6,96	5,35	1,60 6
	7,00	10,5 0	1,50	13,0 0	8,96	9	15,72	33,24	7,29	25,11	4,15	9,66	1,86	6,96	5,35	1,50 4
	7,50	11,2 5	1,50	13,0 0	8,96	9	18,04	38,15	8,37	28,83	4,82	11,46	2,14	8,15	5,35	1,98 2
4	6,50	9,75	1,50	14,0 0	9,31	3	22,70	44,33	8,34	-	5,49	11,85	1,91	-	5,60	1,83 7
	6,50	9,75	1,50	14,0 0	9,31	4	18,92	41,77	9,72	31,70	4,51	11,02	2,24	7,96	5,60	1,63 6
	6,50	9,75	1,50	14,0 0	9,31	5	21,75	-	16,28	41,26	5,24	-	3,84	10,85	5,60	2,29 3
	7,50	11,2 5	1,50	14,0 0	9,31	6	20,90	42,68	7,23	-	5,02	11,31	1,65	-	5,60	1,88 0
	7,00	10,5 0	1,50	14,0 0	9,31	7	19,71	43,06	12,00	36,08	4,71	11,43	2,79	9,25	5,60	1,96 4
	7,50	11,2 5	1,50	14,0 0	9,31	8	19,80	41,90	8,01	29,95	4,73	11,05	1,84	7,46	5,60	1,77 4
	8,00	12,0 0	1,50	14,0 0	9,31	9	21,33	45,11	9,89	34,08	5,13	12,11	2,28	8,65	5,60	2,15 1
5	6,00	9,00	1,50	15,0 0	9,66	1	27,33	-	14,78	-	6,02	-	3,13	-	5,85	2,04 2
	6,50	9,75	1,50	15,0 0	9,66	2	26,94	-	17,06	45,83	5,93	-	3,64	10,81	5,85	2,35 0
	7,00	10,5 0	1,50	15,0 0	9,66	3	27,31	53,35	10,03	-	6,02	13,00	2,10	-	5,85	2,09 9
	7,00	10,5 0	1,50	15,0 0	9,66	4	22,77	50,27	11,69	38,15	4,94	12,08	2,46	8,73	5,85	1,86 8
	7,00	10,5 0	1,50	15,0 0	9,66	5	26,18	-	19,60	49,65	5,75	-	4,21	11,90	5,85	2,61 9
	8,00	12,0 0	1,50	15,0 0	9,66	6	24,67	50,39	8,53	-	5,39	12,12	1,78	-	5,85	2,06 7
	8,50	12,7 5	1,50	15,0 0	9,66	6	27,85	56,88	9,63	-	6,15	14,10	2,01	-	5,85	2,63 4
	7,50	11,2 5	1,50	15,0 0	9,66	7	23,47	51,29	14,29	42,98	5,11	12,38	3,02	10,02	5,85	2,19 8
	8,00	12,0 0	1,50	15,0 0	9,66	8	23,37	49,46	9,46	35,36	5,08	11,85	1,97	8,01	5,85	1,95 0
	8,50	12,7 5	1,50	15,0 0	9,66	8	26,38	55,83	10,68	39,92	5,80	13,77	2,24	9,20	5,85	2,48 6

8,50	12,7 5	1,50	15,0 0	9,66	9	24,99	52,83	11,59	39,92	5,46	12,85	2,43	9,20	5,85	2,32 8
------	-----------	------	-----------	------	---	-------	-------	-------	-------	------	-------	------	------	------	-----------

**Fonte:** Aatoria própria (2022).

	lx	ly	$\lambda$	h	$C_{ELU}$	cas <sub>o</sub>	$f_{ck}$	mx	mx'	my	lx	Asx+	Asx-	Asx+	$C_{ELSI}$	$\delta dif$
	cm	cm	-	cm	kN/m <sup>2</sup>	-	MPa	kNm/m	kNm/m	kNm/m	$K_X$	cm <sup>2</sup> /m	cm <sup>2</sup> /m	cm <sup>2</sup> /m	kN/m <sup>2</sup>	cm
m	3,00	4,50	1,50	8,00	7,21	3	25,0 <sub>0</sub>	3,74	7,31	1,38	0,39	2,16	4,62	0,75	4,10	0,32 <sub>7</sub>
	3,00	4,50	1,50	8,00	7,91	3	25,0 <sub>0</sub>	4,11	8,02	1,51	0,43	2,39	5,19	0,83	4,25	0,33 <sub>9</sub>
m	3,50	5,25	1,50	9,00	7,56	3	25,0 <sub>0</sub>	5,34	10,44	1,96	0,36	2,49	5,28	0,87	4,35	0,45 <sub>2</sub>
	3,50	5,25	1,50	9,00	8,26	3	25,0 <sub>0</sub>	5,84	11,40	2,15	0,40	2,74	5,88	0,96	4,50	0,46 <sub>7</sub>
	3,00	4,50	1,50	9,00	8,96	3	25,0 <sub>0</sub>	4,65	9,09	1,71	0,30	2,14	4,49	0,76	4,65	0,26 <sub>1</sub>
	3,50	5,25	1,50	9,00	8,96	3	25,0 <sub>0</sub>	6,33	12,37	2,33	0,44	2,99	6,52	1,04	4,65	0,48 <sub>3</sub>
	3,00	4,50	1,50	9,00	9,66	3	25,0 <sub>0</sub>	5,02	9,80	1,84	0,33	2,32	4,90	0,82	4,80	0,26 <sub>9</sub>
	4,00	6,00	1,50	10,0 <sub>0</sub>	7,91	3	25,0 <sub>0</sub>	7,30	14,26	2,68	0,34	2,85	6,04	1,00	4,60	0,59 <sub>4</sub>
0	4,00	6,00	1,50	10,0 <sub>0</sub>	8,61	3	25,0 <sub>0</sub>	7,95	15,53	2,92	0,38	3,12	6,68	1,09	4,75	0,61 <sub>3</sub>
	4,00	6,00	1,50	10,0 <sub>0</sub>	9,31	3	25,0 <sub>0</sub>	8,59	16,79	3,16	0,42	3,40	7,36	1,18	4,90	0,63 <sub>3</sub>
	3,50	5,25	1,50	10,0 <sub>0</sub>	10,01	3	25,0 <sub>0</sub>	7,08	13,82	2,60	0,33	2,76	5,81	0,97	5,05	0,38 <sub>2</sub>
	4,50	6,75	1,50	11,0 <sub>0</sub>	8,26	3	25,0 <sub>0</sub>	9,65	18,85	3,55	0,34	3,25	6,86	1,14	4,85	0,75 <sub>4</sub>
cm	5,00	7,50	1,50	11,0 <sub>0</sub>	8,26	3	25,0 <sub>0</sub>	11,92	23,27	4,38	0,44	4,08	8,88	1,42	4,85	1,14 <sub>9</sub>
	4,50	6,75	1,50	11,0 <sub>0</sub>	8,96	3	25,0 <sub>0</sub>	10,47	20,45	3,85	0,37	3,55	7,57	1,24	5,00	0,77 <sub>7</sub>
	4,50	6,75	1,50	11,0 <sub>0</sub>	9,66	3	25,0 <sub>0</sub>	11,29	22,05	4,15	0,41	3,85	8,30	1,34	5,15	0,80 <sub>0</sub>
	4,00	6,00	1,50	11,0 <sub>0</sub>	10,36	3	25,0 <sub>0</sub>	9,56	18,68	3,51	0,33	3,22	6,79	1,13	5,30	0,51 <sub>4</sub>
	4,50	6,75	1,50	11,0 <sub>0</sub>	10,36	3	25,0 <sub>0</sub>	12,10	23,64	4,45	0,44	4,15	9,06	1,44	5,30	0,82 <sub>3</sub>
	5,50	8,25	1,50	12,0 <sub>0</sub>	8,61	3	25,0 <sub>0</sub>	15,03	29,35	5,52	0,42	4,52	9,79	1,57	5,10	1,36 <sub>2</sub>
2	5,00	7,50	1,50	12,0 <sub>0</sub>	9,31	3	25,0 <sub>0</sub>	13,43	26,23	4,93	0,37	4,00	8,52	1,40	5,25	0,95 <sub>8</sub>
	5,00	7,50	1,50	12,0 <sub>0</sub>	10,01	3	25,0 <sub>0</sub>	14,44	28,20	5,31	0,40	4,32	9,31	1,51	5,40	0,98 <sub>5</sub>
	5,00	7,50	1,50	12,0 <sub>0</sub>	10,71	3	25,0 <sub>0</sub>	15,45	30,18	5,68	0,44	4,66	10,13	1,62	5,55	1,01 <sub>2</sub>
	6,00	9,00	1,50	13,0 <sub>0</sub>	8,96	3	25,0 <sub>0</sub>	18,61	36,35	6,84	0,42	4,99	10,78	1,74	5,35	1,59 <sub>2</sub>

	5,50	8,25	1,50	13,0 0	9,66	3	25,0 0	16,86	32,93	6,19	0,37	4,48	9,55	1,57	5,50	1,15 5
	5,50	8,25	1,50	13,0 0	10,36	3	25,0 0	18,08	35,32	6,64	0,40	4,83	10,40	1,69	5,65	1,18 7
	5,50	8,25	1,50	13,0 0	11,06	3	25,0 0	19,30	37,71	7,09	0,43	5,19	11,29	1,80	5,80	1,21 8
4	6,50	9,75	1,50	14,0 0	9,31	3	25,0 0	22,70	44,33	8,34	0,41	5,49	11,85	1,91	5,60	1,83 7
	6,00	9,00	1,50	14,0 0	10,01	3	25,0 0	20,79	40,61	7,64	0,37	4,99	10,64	1,75	5,75	1,37 0
	6,00	9,00	1,50	14,0 0	10,71	3	25,0 0	22,25	43,45	8,17	0,40	5,37	11,56	1,87	5,90	1,40 5
	6,00	9,00	1,50	14,0 0	11,41	3	25,0 0	23,70	46,29	8,71	0,44	5,75	12,52	2,00	6,05	1,44 1
5	7,00	10,5 0	1,50	15,0 0	9,66	3	25,0 0	27,31	53,35	10,03	0,41	6,02	13,00	2,10	5,85	2,09 9
	6,50	9,75	1,50	15,0 0	10,36	3	25,0 0	25,26	49,33	9,28	0,37	5,53	11,81	1,94	6,00	1,60 0
	7,00	10,5 0	1,50	15,0 0	10,36	3	25,0 0	29,29	57,21	10,76	0,45	6,50	14,20	2,25	6,00	2,15 3
	6,50	9,75	1,50	15,0 0	11,06	3	25,0 0	26,96	52,66	9,91	0,41	5,93	12,79	2,07	6,15	1,64 0
	6,50	9,75	1,50	15,0 0	11,76	3	25,0 0	28,67	56,00	10,53	0,44	6,35	13,82	2,21	6,30	1,68 0

Fonte: Autoria própria (2022).

**APÊNDICE D:** Tabela de resultados da Análise 4.

	$l_x$	$l_y$	$\lambda$	$h$	$C_{ELU}$	$\alpha$	$f_{ck}$	$m_x$	$m_x'$	$m_y$	$l_x$	$A_{sx+}$	$A_{sx-}$	$A_{sx+}$	$C_{ELSI}$	$\delta dif$
	cm	cm	-	cm	$kN/m^2$	-	MPa	$kNm/m$	$kNm/m$	$kNm/m$	$K_{x-}$	$cm^2/m$	$cm^2/m$	$cm^2/m$	$kN/m^2$	cm
cm	3,0 0	4,50	1,5 0	8,00	7,21	3	25,0 0	3,74	7,31	1,38	0,3 9	2,16	4,62	0,75	4,10	0,32 7
cm	3,5 0	5,25	1,5 0	9,00	7,56	3	25,0 0	5,34	10,44	1,96	0,3 6	2,49	5,28	0,87	4,35	0,45 2
0	4,0 0	6,00	1,5 0	10,0 0	7,91	3	25,0 0	7,30	14,26	2,68	0,3 4	2,85	6,04	1,00	4,60	0,59 4
cm	4,5 0	6,75	1,5 0	11,0 0	8,26	3	25,0 0	9,65	18,85	3,55	0,3 4	3,25	6,86	1,14	4,85	0,75 4
cm	5,0 0	7,50	1,5 0	11,0 0	8,26	3	25,0 0	11,92	23,27	4,38	0,4 4	4,08	8,88	1,42	4,85	1,14 9
2	5,5 0	8,25	1,5 0	12,0 0	8,61	3	25,0 0	15,03	29,35	5,52	0,4 2	4,52	9,79	1,57	5,10	1,36 2
3	6,0 0	9,00	1,5 0	13,0 0	8,96	3	25,0 0	18,61	36,35	6,84	0,4 2	4,99	10,78	1,74	5,35	1,59 2
4	6,5 0	9,75	1,5 0	14,0 0	9,31	3	25,0 0	22,70	44,33	8,34	0,4 1	5,49	11,85	1,91	5,60	1,83 7
5	7,0 0	10,5 0	1,5 0	15,0 0	9,66	3	25,0 0	27,31	53,35	10,03	0,4 1	6,02	13,00	2,10	5,85	2,09 9

Fonte: Autoria própria (2022).