

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS

ENGENHARIA CIVIL

ROBERTA FARIA DE MELO

ESTRUTURAS MISTAS (CONCRETO E AÇO): Estudo comparativo do projeto de um pavimento composto por lajes mistas “Steel Deck” e Lajes Maciças de concreto armado.

Varginha – MG

2016

ROBERTA FARIA DE MELO

ESTRUTURAS MISTAS (CONCRETO E AÇO): Estudo comparativo do projeto de um pavimento composto por lajes mistas “Steel Deck” e Lajes Maciças de concreto armado.

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção de grau de bacharel, sob orientação do Prof. Me. Antônio de Faria.

Varginha – MG

2016

ROBERTA FARIA DE MELO

ESTRUTURAS MISTAS (CONCRETO E AÇO): Estudo comparativo do projeto de um pavimento composto por lajes mistas “Steel Deck” e Lajes Maciças de concreto armado.

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção de grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em 29/11/2016

Me. Antônio de Faria (Orientador)

Me. Armando Belato Pereira (Banca examinadora)

Esp. Max Filipe Ferreira Marques (Banca examinadora)

Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto e Celina, que sempre me incentivaram, me deram coragem para prosseguir nessa jornada e acreditaram que a educação é um dos maiores bens que podemos conquistar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que esteve presente em todos os momentos de minha vida, me abençoando com saúde, serenidade, sabedoria e mantendo as pessoas que mais amo do meu lado.

Agradeço aos meus pais e minha irmã, Maria Célia, por percorrerem comigo todos os caminhos dessa vida, por serem meu porto seguro, meu maior orgulho, exemplo de amor e por me fazerem acreditar que a família é a maior benção que podemos receber.

Agradeço a todos os professores que se propuseram a partilhar seu conhecimento, contribuindo para minha formação durante o período de graduação, em especial ao Prof. M.Sc. Antônio de Faria, orientador desse trabalho, pela disponibilidade, paciência e dedicação durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a todos os colegas que compartilharam comigo as expectativas, alegrias e aflições desses cinco anos de estudo. Em especial Leandro, Liza, Lucas, Marcel, Nayare, Nayme, Rachel, Thadeu, Vanessa e Waleska, pela amizade, companheirismo, grupos de estudo, materiais emprestados, por todo auxílio, apoio e principalmente por todos os momentos de risadas e descontrações durante nossa convivência.

“Peça a Deus que abençoe seus planos, e eles
darão certo.”

PB 16: 3

RESUMO

A necessidade de modernização dos métodos construtivos tem incorporado as estruturas mistas aos projetos de edificações. Estruturas mistas são aquelas dimensionadas para que dois materiais, concreto (normalmente armado) e perfis aço, resistam conjuntamente aos esforços solicitantes. Uma das aplicações dessas estruturas é nas lajes de edificações, sendo conhecidas com laje mista com fôrma de aço incorporada (*Steel Deck*). Essa laje é constituída por uma chapa metálica, que inicialmente funciona como uma fôrma de aço e suporta as ações permanentes e as sobrecargas de construção e, após a cura do concreto, essa fôrma não é retirada e passa a atuar como a armadura de tração da laje. Nesse sentido, o objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo do projeto do pavimento de um edifício comercial utilizando laje maciça e laje mista *Steel Deck*. Para isso foi realizada uma pesquisa bibliográfica a respeito dos vários sistemas de lajes, além de ter sido estudada a metodologia de cálculo dos dois sistemas e desenvolvido um estudo de caso para o comparativo que qual tipo de laje atenderá melhor a edificação em estudo.

Palavras-chave: Lajes comerciais. *Steel Deck*. Estruturas mistas.

ABSTRACT

The need of constructions methods modernization has incorporated composite structures to edifications projects. Composite structures are those that are designed for two materials, concrete and steel profiles, resists jointly to internal forces. One of the applications of these structures is in buildings slabs, being known as composite slabs with profiled steel sheeting (Steel Deck). This slab is made with a profiled steel sheeting, which initially serves as a steel mold and supports the permanent actions and construction actions and, after hardened concrete, this mold isn't removed and works as the tensile armor. In this sense, the objective of this is to conduct a comparative study of a commercial building pavement using concrete slab and composite slab (Steel Deck). For this was necessary a bibliographical research about the slab systems, and has been studied the calculating methodology of the two systems and developed a case study in order cooperate which slab type will serve better in a building study.

Keywords: *Commercial slabs. Steel Deck. Composite structures.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Comportamento estrutural das lajes como placas e como chapas.....	19
Figura 02 - Laje nervurada com vigotas treliçadas e vigotas de concreto armado.....	20
Figura 03 - Detalhes construtivos de uma laje nervurada com vigotas	21
Figura 04 - Seção transversal de uma laje nervurada	22
Figura 05 - Laje nervura construída com moldes.....	23
Figura 06 - Laje nervurada com utilização de EPS.	23
Figura 07 - Detalhes construtivos de uma laje nervurada	25
Figura 08 - Laje-cogumelo e laje lisa, respectivamente.	25
Figura 09 - Laje maciça de concreto armado	27
Figura 10 - Laje maciça convencional.....	28
Figura 11 - Fôrma trapezoidal e reentrante para lajes mistas de aço e concreto	29
Figura 12 - Detalhe geometria das mossas	30
Figura 13 - Detalhe dos conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça	30
Figura 14 - Dimensões fôrmas de aço para lajes Steel Deck MF-50	31
Figura 15 - Aplicação dos conectores de cisalhamento em uma.....	32
Figura 16 - Posicionamento da armadura complementar.	33
Figura 17 - Efeito do empoçamento numa fôrma simplesmente apoiada	39
Figura 18 - a) planta de um pavimento com vigas e lajes b) grelha equivalente empregada para representar o pavimento.....	42
Figura 19 - Casos de vinculação das lajes.	44
Figura 20 - Distribuição das ações concentradas ou lineares	52
Figura 21 - Seções críticas do estado-limite último	54
Figura 22 - Perímetro crítico para a punção	54
Figura 23 - Diagrama de tensões para momento positivo – LNP acima da fôrma.....	56
Figura 24 - Diagrama de tensões para momento positivo – LNP na fôrma de aço.....	57
Figura 25 - Curva característica do momento de plastificação	57
Figura 26 - Diagrama de tensões para momento negativo	58
Figura 27 - largura plana dos elementos da fôrma	59
Figura 28 - Esquema de carregamento na laje mista para	60
Figura 29 - Coeficientes m e k.....	61
Figura 30 - Intervalo de validade da reta de cisalhamento longitudinal.....	61
Figura 31 - Dimensões da fôrma de aço e da laje de concreto	63

Figura 32 - Perímetro crítico para a punção	64
Figura 33 – Planta baixa do pavimento tipo do edifício comercial	69
Figura 34 - Planta de fôrma inicial da laje maciça	73
Figura 35 - Extensão da armadura negativa	79
Figura 36 - Detalhamento armadura inferior - laje maciça	80
Figura 37 - Detalhamento armadura superior - laje maciça	81
Figura 38 - Detalhamento armadura longitudinal de distribuição - laje maciça	82
Figura 39 - Detalhamento armadura transversal de distribuição - laje maciça	83
Figura 40 - Regiões da laje para o cálculo das reações nas vigas	84
Figura 41 – Planta de fôrma final da laje maciça	87
Figura 42 - Seção transversal inicial da laje mista (mm)	88
Figura 43 – Planta de fôrma inicial da laje mista “Steel Deck”	89
Figura 44- Área resistente de concreto (A_v).....	97
Figura 45 - Planta de fôrma final da laje mista "Steel Deck"	100
Figura 46 – Detalhamento armadura negativa da laje mista “Steel Deck”	101
Figura 47 – Detalhamento do Steel Deck”	102
Figura 48 - Detalhamento tela soldada	103
Figura 49 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L3 (kN/m)	123
Figura 50 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L4 (kN/m)	123
Figura 51 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L9 (kN/m)	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Verificação da flecha elástica.....	72
Tabela 2 – Verificação do kx – <i>limite</i> e determinação da altura final das lajes maciças.....	72
Tabela 3 - Determinação da área de aço e armadura adotada	75
Tabela 4 - Verificação da necessidade de armadura de cisalhamento.....	77
Tabela 5 - Verificação da compressão diagonal do concreto	78
Tabela 6 - Reações de apoio das lajes sobre as vigas	86
Tabela 7 - Verificação da necessidade de escoramento	90
Tabela 8 - Verificação da carga máxima	90
Tabela 9 - Definição da posição da linha neutra	91
Tabela 10 - Verificação do momento fletor positivo para linha neutra na mesa.....	92
Tabela 11 - Cálculo da área de aço para momento fletor negativo	93
Tabela 12 - Determinação das armaduras para momento fletor negativo	94
Tabela 13 - Verificação do momento fletor negativo.....	95
Tabela 14 - Verificação inicial para a laje L1 considerando armadura \emptyset 8 mm c/ 20	96
Tabela 15 - Verificação do cisalhamento longitudinal.....	97
Tabela 16 - Verificação da necessidade de armadura transversal	98
Tabela 17 - Verificação do deslocamento vertical	99
Tabela 18- Indicadores de consumo das lajes maciças.....	104
Tabela 19 – Indicadores de consumo da laje mista "Steel Deck"	105
Tabela 20 - Custo total de cada sistema de laje	109

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos.....	16
1.2 Justificativa	17
1.3 Estrutura do trabalho	18
2 LAJES USUAIS DE EDIFÍCIOS	19
2.1 Lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas	20
2.1.1 Descrição.....	20
2.1.2 Processo de Execução	21
2.2 Lajes nervuradas	21
2.2.1 Descrição.....	21
2.2.2 Processo de Execução	24
2.3 Lajes-cogumelo e lajes lisas	25
2.3.1 Descrição.....	25
2.3.2 Processo de Execução	26
2.4 Lajes maciças	26
2.4.1 Descrição.....	26
2.4.2 Processo de Execução	28
2.5 Lajes mistas (Steel deck).....	28
2.5.1 Descrição.....	28
2.5.1.1 Concreto	30
2.5.1.2 Fôrma de aço	31
2.5.1.3 Conectores de cisalhamento (<i>Stud Bolt</i>).....	32
2.5.1.4 Armadura Complementar	33
2.5.2 Processo de Execução	33
3 DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS E LAJES MISTAS <i>STEEL DECK</i> .	35
3.1 Considerações gerais de dimensionamento	35
3.2 Ações a serem consideradas.....	36
3.2.1 Combinações de ações	36
3.2.2 Coeficientes de ponderação das ações	37
3.2.3 Ações consideradas no dimensionamento da laje maciça.....	37
3.2.4 Ações consideradas no dimensionamento da laje mista <i>Steel Deck</i>	38
3.2.4.1 Ações a serem consideradas na fase inicial.....	38
3.2.4.2 Ações a serem consideradas na fase final	40

3.3 Metodologia de Cálculo das lajes maciças	40
3.3.1 Determinação dos esforços por grelha equivalente.....	42
3.3.2 Determinação de esforços e deslocamentos pela teoria das placas.....	43
3.3.2.1 Determinação da flecha	44
3.3.2.2 Determinação dos momentos	45
3.3.3 Dimensionamento	46
3.3.3.1 Determinação das armaduras longitudinais.....	47
3.3.3.2 Verificação do cisalhamento	47
3.4 Metodologia de Cálculo das lajes mistas	49
3.4.1 Verificação da fôrma de aço na fase inicial	50
3.4.1.1 Estados-limites últimos	50
3.4.1.2 Estado limite de serviço	50
3.4.2 Verificação da laje na fase final	52
3.4.2.1 Determinação da largura efetiva.....	52
3.4.2.2 Estados-limites últimos	53
3.4.2.2.1 Momento fletor	54
3.4.2.2.1.1 Posição da linha neutra	55
3.4.2.2.1.2 Resistência de cálculo pelo momento fletor positivo	55
3.4.2.2.1.3 Resistência de cálculo pelo momento fletor negativo	58
3.4.2.2.1.4 Verificação da flambagem da fôrma de aço	59
3.4.2.2.2 Cisalhamento longitudinal	60
3.4.2.2.3 Cisalhamento vertical.....	62
3.4.2.2.4 Punção.....	64
3.4.2.3 Estado-limite de serviço	65
3.4.2.3.1 Fissuração do concreto.....	65
3.4.2.3.2 Deslocamento vertical.....	66
4 MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1 Características gerais do estudo comparativo	67
4.1.1 Parâmetros de Dimensionamento.....	67
4.1.2 Indicadores de consumo de material	68
4.2 Características gerais do edifício comercial.....	68
4.2.1 Projeto arquitetônico	68
4.2.2 Ação de utilização	70
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
5.1 Dimensionamento do pavimento com laje maciça.....	71
5.2 Dimensionamento da laje mista “Steel Deck”	88

5.3 Indicadores de consumo de material	104
5.3.1 Indicadores das lajes maciças.....	104
5.3.2 Indicadores das lajes mistas “Steel Deck”	105
5.4 Estudo comparativo	105
6 CONCLUSÃO.....	110
REFERÊNCIAS	111
APÊNDICE A – Planilhas de dimensionamento das lajes maciças.....	113
APÊNDICE B – Diagramas de esforço cortante e momento fletor das lajes mistas “Steel Deck”	122
APÊNDICE C – Planilhas para a determinação do peso total de aço das lajes maciças.....	128
APÊNDICE D – Planilhas para a determinação do peso total de aço das lajes mistas “Steel Deck”.....	131
APÊNDICE E – Planilhas de composição de preço unitário.....	135
ANEXO A – Diagramas tensão-deformação.....	141
ANEXO B – Tabela de peso específico dos materiais de construção	143
ANEXO C – Tabela de ações de uso	144
ANEXO D – Coeficiente α para o cálculo da flecha elástica nas lajes maciças.....	146
ANEXO E – Coeficientes $\mu_x, \mu_y, \mu_x', \mu_y'$ para o cálculo de momentos máximos nas lajes maciças.....	147
ANEXO F – Coeficientes Ψ_2 e Ψ_3 pré-dimensionamento da altura da laje maciça.....	150
ANEXO G – KMD, K_x e K_z para o cálculo da armadura longitudinal da laje maciça .	151
ANEXO H – Coeficientes k_x, k_y, k_x', k_y' para o cálculos das reações de apoio nas lajes maciças.....	154
ANEXO I – Coeficientes de ponderação das ações para lajes mistas Steel Deck	157
ANEXO J – Tabelas de especificações para laje <i>Steel Deck</i> – MF-50 e MF-75	159

ANEXO K – Coeficientes de majoração das ações.....163

ANEXO L – Coeficientes m-k164

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil atravessa um período em que é nítida a necessidade de se apresentar aos clientes inovações, métodos construtivos que sejam capazes de gerar economia de dinheiro e mão de obra, além da redução de tempo e do desperdício de materiais, mas que ao mesmo tempo proporcionem qualidade, segurança, praticidade e conforto aos usuários.

Nesse sentido, há várias décadas a utilização de estruturas metálicas vem sendo incorporadas aos projetos de engenharia, através da utilização de perfis de aço, principalmente em vigas e pilares, em substituição do habitual concreto armado.

Porém o desenvolvimento de novos métodos que garantem o funcionamento solidário do concreto e do aço tem possibilitado o aprimoramento dos projetos estruturais através das estruturas mistas concreto-aço, que são dimensionadas para que os dois materiais, concreto (normalmente armado) e perfis aço, resistam conjuntamente aos esforços solicitantes.

Uma das aplicações das estruturas mistas é nas lajes de edificações, já que essa parte da estrutura, devido à sua grande dimensão, pode ser considerada a que possui o maior consumo de material. Dessa forma então, pequenas alterações na seção transversal desse elemento estrutural podem representar uma economia considerável no custo final de uma obra.

Esse sistema estrutural é conhecido como laje mista com fôrma de aço incorporada (*Steel Deck*), que é constituída por uma chapa metálica, que inicialmente funciona como uma fôrma de aço e suporta as ações permanentes e as sobrecargas de construção e, após a cura do concreto, essa fôrma não é retirada e passa a atuar como a armadura de tração da laje.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é realizar um estudo comparativo, através de indicadores de consumo de materiais, do projeto do pavimento de um edifício comercial utilizando laje maciça e laje mista *Steel Deck*.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) realizar um estudo, através de uma revisão bibliográfica, sobre os sistemas de lajes usuais de edifícios, abordando a descrição de suas principais características e processo de execução das mesmas;

- b) estudar a metodologia de cálculo das lajes maciças, tendo como base a ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- c) estudar a metodologia de cálculo das lajes mistas *Steel Deck*, tendo como base a ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios;
- d) caracterizar o edifício comercial que será utilizado para o desenvolvimento do estudo comparativo
- e) realizar o dimensionamento do pavimento composto por laje maciça;
- f) realizar o dimensionamento do pavimento composto por laje mista “Steel Deck”;
- g) determinar os indicadores de consumo de material das lajes maciças;
- h) determinar os indicadores de consumo de material das lajes mistas “Steel Deck”;
- i) estimar o custo de cada um dos dois sistemas estruturais de laje em análise;
- j) realizar o estudo comparativo por meio dos indicadores de consumo de material e estimativa de custo.

1.2 Justificativa

Existe à disposição dos projetistas uma variedade considerável de sistemas estruturais de lajes que podem ser aplicados em edificações comerciais. Os sistemas mais tradicionais são basicamente os de lajes nervuradas, maciças e lisas, sendo que todos esses sistemas já possuem uma tecnologia, tanto de cálculo quanto de execução, bem definida.

Porém, o atual cenário da construção civil está baseado na busca de novas tecnologias, com processos construtivos inovadores e industrializados, capazes de utilizarem as propriedades dos materiais de forma mais racional e eficiente, ao mesmo tempo em que tragam economia para a obra. Nesse sentido, é possível verificar que as construções mais modernas têm-se utilizado como uma alternativa aos sistemas tradicionais, os sistemas estruturais mistos aço-concreto.

Queiroz et al (2012, p.11) define sistema misto aço-concreto como aquele no qual um perfil de aço (laminado, soldado ou formado a frio) trabalha em conjunto com o concreto (geralmente armado), formando um pilar misto, uma viga mista ou uma ligação mista. O que amplia de forma considerável as opções de projetos e construção.

Segundo Sieg (2015, p.21) a utilização de lajes mistas com fôrma de aço incorporada (*Steel Deck*) está consolidada em vários países, por ser um sistema de piso econômico e

eficiente em edifícios de andares múltiplos estruturados em aço e vêm ganhando popularidade crescente no Brasil.

Dessa forma, justificou-se a realização do presente trabalho pelo fato do sistema de laje mista *Steel Deck* ser um processo inovador e que vêm ganhando espaço mercado da construção civil brasileira. No entanto, sua utilização é ainda limitada, visto que a norma brasileira que contempla os critérios de cálculo e dimensionamento para as lajes mistas, ABNTNBR 8800:2008 no anexo Q, é relativamente nova se comparada com a norma específica de concreto armado, ABNT NBR 6118:2014, que foi lançada pela primeira vez em 1940 (NB-1 – Cálculo e execução de obras de concreto armado).

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho proposto está estruturado em seis capítulos, referências e anexos.

O primeiro capítulo apresenta a introdução, os objetivos e a justificativa para o desenvolvimento do mesmo.

O segundo capítulo aborda os principais sistemas estruturais de lajes, descrevendo suas principais características e processo de execução.

O terceiro capítulo contempla as considerações de projeto e metodologia de cálculo para as lajes maciças e das lajes mistas *Steel Deck*, baseadas na ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 8800:2008.

O quarto capítulo descreve a metodologia de desenvolvimento deste trabalho.

O quinto capítulo apresenta os resultados e discussões do trabalho, contendo o dimensionamento das lajes do pavimento analisado com laje maciça e laje mista, bem como o estudo comparativo dos dois sistemas de laje, através de indicadores de consumo de material estimativa de custos.

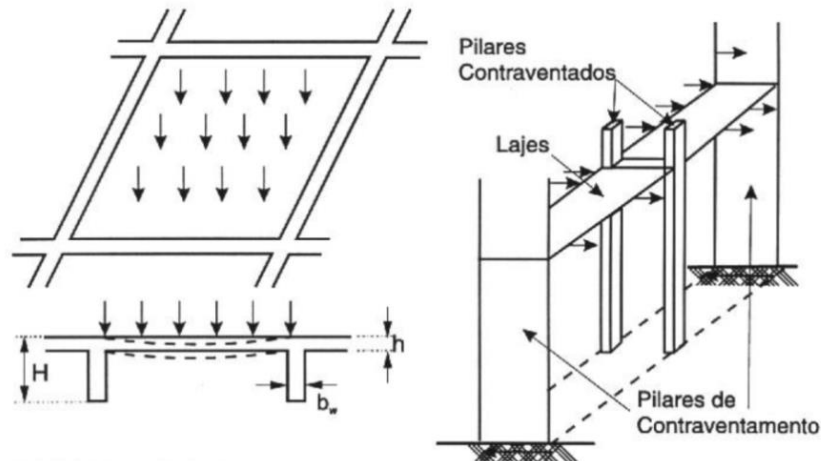
O sexto capítulo apresenta as considerações finais e conclusão do trabalho.

2 LAJES USUAIS DE EDIFÍCIOS

As lajes são classificadas, segundo Bastos (2015, p.1) como elementos planos bidimensionais, aqueles em que duas dimensões, o comprimento e a largura, são da mesma ordem de grandeza e muito maiores que a terceira dimensão, a espessura. As lajes podem ser chamadas também de elementos de superfície ou placas.

A ABNT NBR 6118:2014 define que lajes são elementos estruturais de superfície plana sujeitos principalmente a ações normais a seu plano. Essa situação confere às lajes o comportamento de placas. Elas podem também distribuir as ações horizontais aos pilares, comportando-se, dessa forma, como chapas. (LIMA, 2009, p.18). A figura 01 representa esquematicamente o comportamento estrutural das lajes como placas e como chapas, respectivamente.

Figura 01 – Comportamento estrutural das lajes como placas e como chapas



Fonte: (LOPES, 2012, p.22)

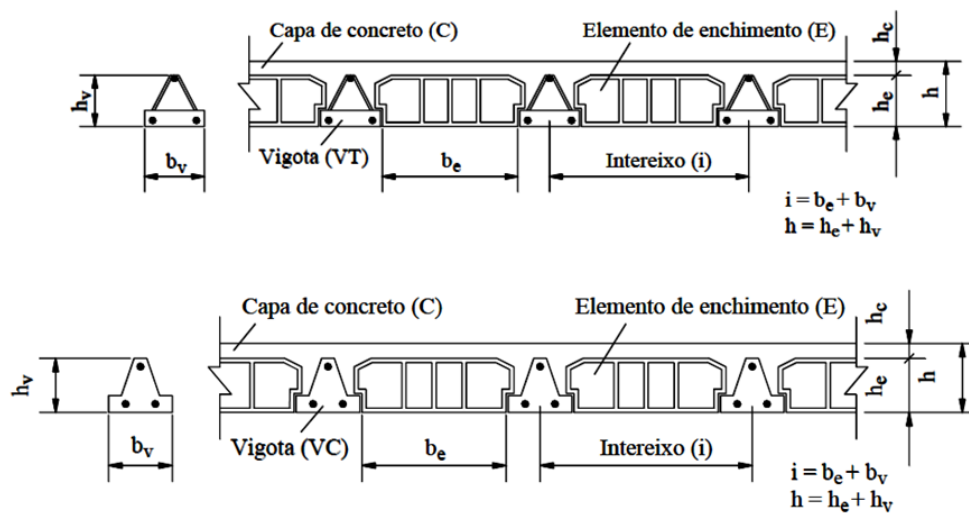
Existem diferentes sistemas de lajes que podem ser utilizados nas edificações. De acordo com Carvalho (2009, p.13) a escolha do sistema estrutural mais adequado para determinado pavimento deve ser feita considerando alguns parâmetros básicos, como por exemplo, a finalidade da edificação; o projeto arquitetônico; as ações de utilização; o tamanho dos vãos a vencer; a disponibilidade de equipamentos, materiais e mão de obra; os custos e a interação com os demais subsistemas construtivos. Serão apresentados a seguir os sistemas mais usuais de lajes.

2.1 Lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas

2.1.1 Descrição

As lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas são constituídas de elementos pré-fabricados responsáveis por formarem as nervuras. De acordo Carvalho (2014, p.74) esses elementos são conhecidos por vigotas (trilhos de concreto armado, pretendido ou treliças) e englobam total ou parcialmente a armadura inferior de tração. A figura 02 representa a seção transversal das lajes com vigotas treliçadas e vigotas de concreto armado.

Figura 02 - Laje nervurada com vigotas treliçadas e vigotas de concreto armado.



Fonte: (SILVA, 2005, P.127)

Outro item que compõe esse tipo de laje são lajotas, elementos de enchimento normalmente de cerâmica ou EPS, sem função estrutural. As diferentes alturas desses elementos somadas à espessura da capa de concreto resultam nas variações de altura das lajes pré-moldadas. Além disso, suas diferentes larguras definem os diversos intereixos entre as vigotas (LIMA, 2009, p.25).

Por cima das vigotas e das lajotas é feita uma capa de concreto moldada no local, com a função de solidarizar esses elementos, além de resistir aos esforços de compressão provenientes da flexão (LIMA, 2009, p.25). Ainda, segundo ABNT NBR 14859:2016, deve haver uma armadura de distribuição colocada na capa de concreto nas direções transversal e longitudinal para a distribuição das tensões oriundas de ações concentradas e para o controle da fissuração.

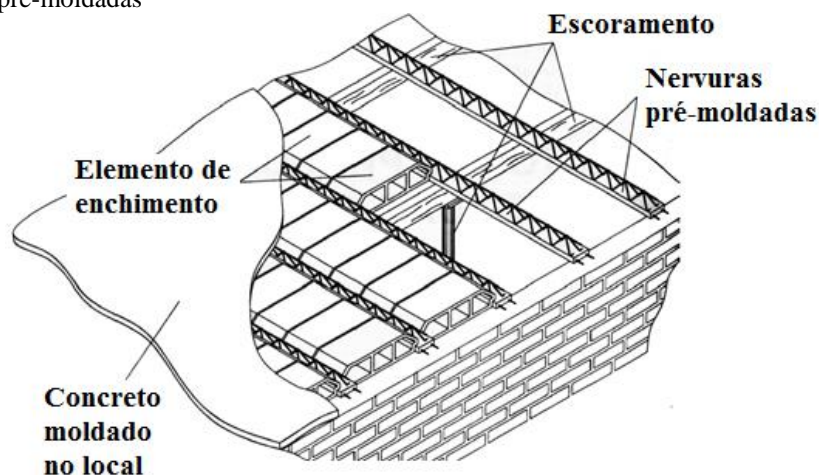
2.1.2 Processo de Execução

O processo de execução das lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas ocorre em sete etapas descritas por Carvalho (2014, p.77-78):

- a) etapa 1: Nivelamento e acerto do piso e execução do escoramento;
- b) etapa 2: Colocação das vigotas, posicionando as lajetas nas extremidades como gabarito de espaçamento entre vigotas;
- c) etapa 3: Colocação do elemento de enchimento, tubulação elétrica, caixas de passagem etc.;
- d) etapa 4: Colocação das armaduras de distribuição e negativas (quando necessário);
- e) etapa 5: Limpeza cuidadosa da interface entre as nervuras e o concreto a ser lançado;
- f) etapa 6: Concretagem da capa de concreto;
- g) etapa 7: retirada do escoramento.

A figura 03 mostra alguns detalhes construtivos de uma laje nervura com vigotas pré-moldadas:

Figura 03 - Detalhes construtivos de uma laje nervurada com vigotas pré-moldadas



Fonte: (SILVA, 2005, p.143)

2.2 Lajes nervuradas

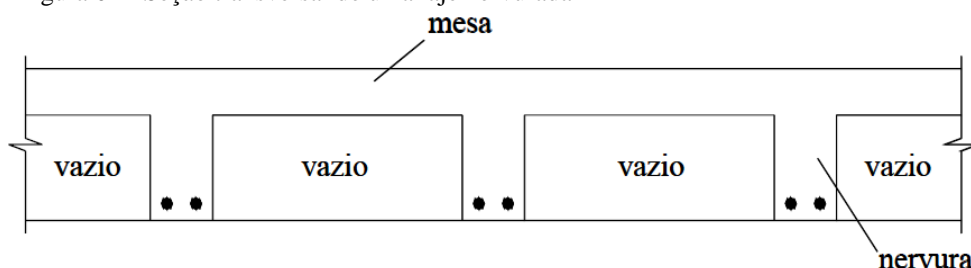
2.2.1 Descrição

Segundo Albuquerque (1999, p. 24) as lajes nervuradas podem ser definidas como um conjunto de nervuras solidarizadas por uma mesa de concreto. O fato de as armaduras serem

responsáveis pelos esforços resistentes de tração permite que a zona tracionada seja discretizada em forma de nervuras, não comprometendo a zona comprimida, que será resistida pela mesa de concreto.

A ABNT NBR 6118:2014 define lajes nervuradas como lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras, entre as quais pode ser colocado material inerte. A figura 04 representa a seção transversal de uma laje nervurada.

Figura 04 - Seção transversal de uma laje nervurada



Fonte: (SILVA, 2005, p.65)

As lajes de concreto armado nervuradas possuem comportamento estrutural semelhante ao das placas (lajes maciças), porém com a eficiência das vigas na flexão, ou seja, grande inércia e peso próprio relativamente pequeno devido ao menor consumo de concreto. (CARVALHO, R.C; PINHEIRO, L.M., 2009, p.13)

De acordo com Carvalho (2009, p.16) existem duas soluções para a confecção das nervuras. A primeira é a utilização de moldes de plástico reforçado, que são encontrados com várias dimensões e atendem desde os projetos mais simples até os mais sofisticados. Esses moldes suportam o peso do concreto fresco, das armaduras, equipamentos e pessoas. Por esse motivo servem de fôrma para a estrutura e, para montar o escoramento, basta o uso de barretes, travessas e pontaletes. A figura 05 mostra o aspecto final de uma laje em que foi utilizado esses moldes.

Figura 05 - Laje nervura construída com moldes.



Fonte: (AUBUQUERQUE, 1999, P. 34)

Ainda segundo Carvalho (2009, p.17) outra solução pode ser obtida com o uso de um tablado de madeira, como nas lajes maciças, substituindo apenas parte do concreto tracionado por um material mais leve e barato. Para essa solução os materiais de enchimento (como os blocos de EPS, concreto comum, concreto celular e os blocos cerâmicos) ficam incorporados à laje. A figura 06 mostra o aspecto de uma laje nervurada com a utilização de EPS como material de enchimento.

Figura 06 - Laje nervurada com utilização de EPS.



Fonte: (AUBUQUERQUE, 1999, P. 34)

A ABNT NBR 6118:2014 faz algumas recomendações quanto aos aspectos geométricos e construtivos das lajes nervuradas:

a) quanto a espessura da mesa:

- Quando não existirem tubulações horizontais, a espessura da mesa deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras e não menor que 4 cm;

- Quando existirem tubulações com diâmetro \emptyset menor ou igual a 10 mm, o valor mínimo e absoluto da espessura da mesa deve ser 5 cm. Para tubulações com diâmetro \emptyset maior que 10 mm, a espessura mínima deve ser $4 \text{ cm} + \emptyset$, ou $4 \text{ cm} + 2\emptyset$ no caso de haver cruzamento de tubulações;
- b) quanto a espessura das nervuras:
- A espessura das nervuras não pode ser inferior a 5 cm;
 - Nervuras com espessura menor que 8 cm não podem conter armadura de compressão;
- c) quanto ao espaçamento entre nervuras:
- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual menor a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa e, para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios da laje;
 - Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; É permitida essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;
 - Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maiores que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se seus limites mínimos de espessura.

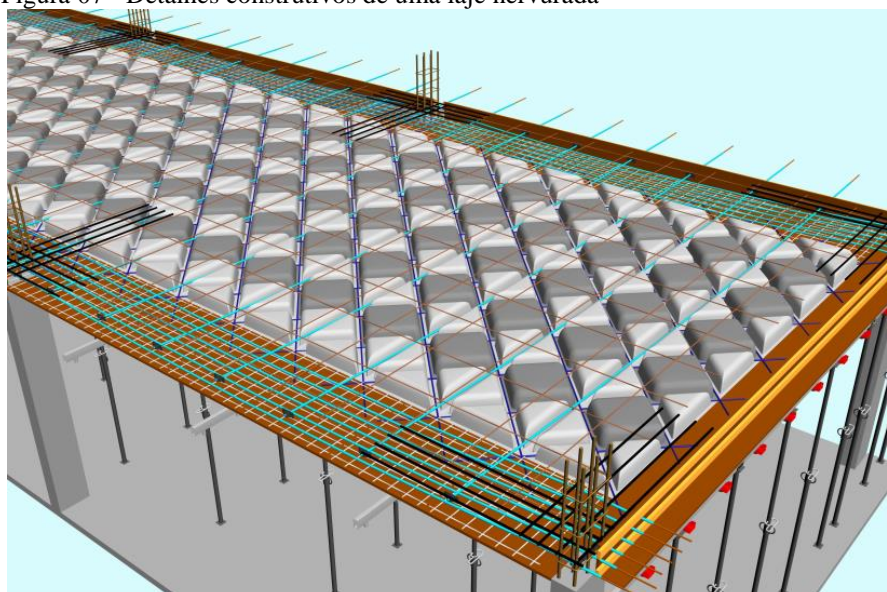
2.2.2 Processo de Execução

Segundo Silva (2005, p. 91-98) a construção de pavimentos de edificações utilizando lajes nervuradas exige o desenvolvimento de oito etapas de trabalho, descritas abaixo:

- a) etapa 1: Colocação dos escoramentos;
- b) etapa 2: Montagem das fôrmas;
- c) etapa 3: Colocação dos elementos de enchimento;
- d) etapa 4: Colocação das armaduras;
- e) etapa 5: Limpeza das fôrmas antes da concretagem;
- f) etapa 6: Concretagem;
- g) etapa 7: Cura;
- h) etapa 8 : Retirada das fôrmas e do escoramento.

A figura 07 mostra os detalhes construtivos da laje nervurada:

Figura 07 - Detalhes construtivos de uma laje nervurada



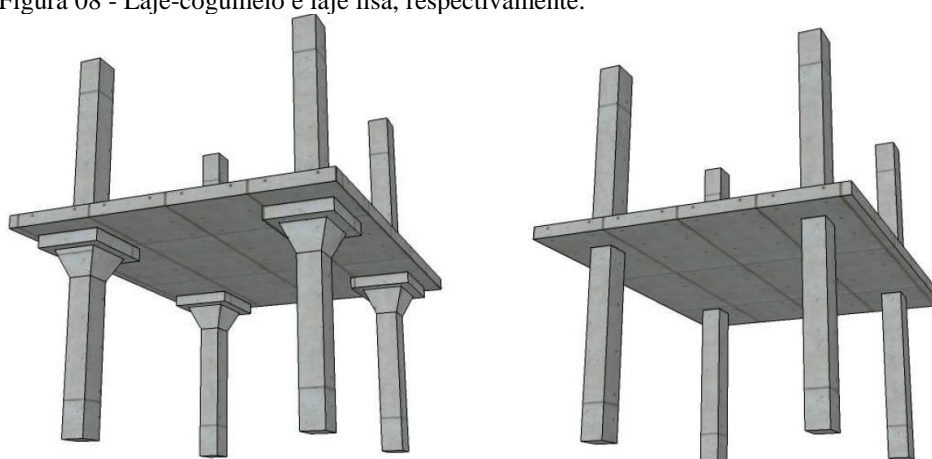
Fonte: (DIOGENES, 2012)

2.3 Lajes-cogumelo e lajes lisas

2.3.1 Descrição

A ANBT NBR 6118:2014 define lajes-cogumelo como lajes apoiadas diretamente em pilares com capitéis¹, enquanto as lajes lisas são apoiadas diretamente nos pilares sem capitéis. A figura 08 representa esses dois tipos de laje.

Figura 08 - Laje-cogumelo e laje lisa, respectivamente.



Fonte: (RABELLO, 2010, P.24)

¹Capitéis: engrossamento da seção dos pilares na região da ligação com a laje. (CARVALHO, 2009, P.81)

Segundo Rabello (2010, p.24) essa solução construtiva, na qual se suprimem as vigas e as lajes são apoiadas diretamente sobre os pilares, tem sido adotada como uma opção para situações onde se exigem flexibilidade arquitetônica devido à inexistência de vigas.

Albuquerque (1999, p.45) diz que nas primeiras lajes sem vigas era comum o uso de capitéis, visando o enrijecimento da ligação laje-pilar, mas isso prejudicava uma das suas principais vantagens, que é a ausência de recortes na forma do pavimento. Com o desenvolvimento do sistema, abandonou-se o uso de capitéis na maioria dos casos e passou-se a fazer uma criteriosa verificação da punção.

A punção é caracterizada por Carvalho (2009, p.80-81) quando existe uma força agindo em uma pequena área de uma placa provocando sua perfuração. É isso que ocorre nas lajes sem vigas, na ligação da laje com o pilar existe uma força cortante de grande intensidade, que provoca altas tensões de cisalhamento e pode causar a ruína dessa laje.

2.3.2 Processo de Execução

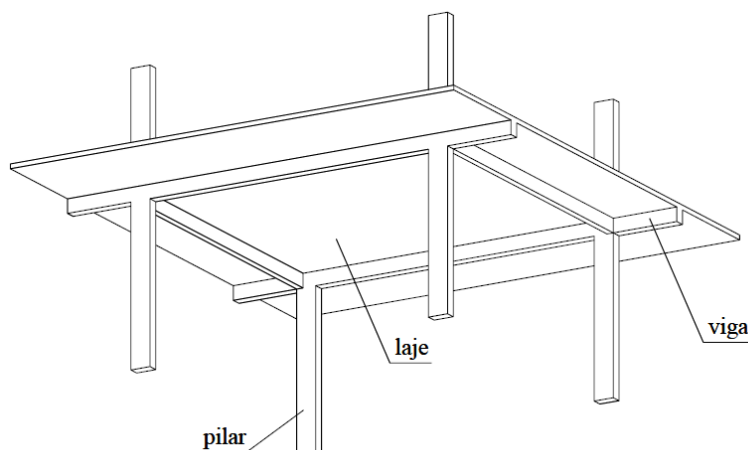
O processo de execução das lajes lisas, de acordo com Faria (2010, p.29) é praticamente igual ao das lajes maciças convencionais. Pelo fato de não existirem vigas, pode-se eliminar os procedimentos de montagem de fôrmas e armaduras das mesmas, porém as demais etapas são consideradas idênticas e aplicáveis para o caso das lajes lisas.

2.4 Lajes maciças

2.4.1 Descrição

Lajes maciças podem ser definidas estruturalmente como placas de espessura uniforme, apoiadas ao longo de seu contorno, sendo que esses apoios podem ser vigas ou alvenarias (ARAÚJO, 2003 apud FARIA, 2010, p.19). A figura 09 representa uma laje maciça de concreto armado apoiada sobre vigas.

Figura 09 - Laje maciça de concreto armado



Fonte: (SILVA, 2005, p.14)

De acordo com Lima (2009, p.20) as lajes maciças consistem basicamente de fôrmas e escoras que sustentam a estrutura de concreto armado durante o processo de cura. Esse tipo de laje não consegue vencer grandes vãos devido ao peso próprio elevado, por esse motivo adota-se, usualmente, um vão médio econômico de 3,5m a 5m.

As lajes maciças, diferentemente das lajes pré-moldadas, distribuem suas reações em todas as vigas de contorno. Com isso, há um melhor aproveitamento das vigas do pavimento, pois todas elas, dependendo apenas do vão e das condições de contorno, podem ter ações da mesma ordem de grandeza (CARVALHO, 2014, p. 319).

Ainda segundo Carvalho (2014, p. 320) quando a relação entre o maior e o menor vão da laje é menor ou igual a dois, costuma-se considerar, para efeito de cálculo que ela trabalha em duas direções, ou seja, é armada em duas direções. Quando essa relação é maior que dois, ela trabalha apenas na direção do menor vão, sendo armada apenas nessa direção, porém essa consideração não leva em conta a armadura construtiva ou a mínima estabelecida nas normas.

A ABNT NBR 6118 (2014, p. 74) determina alguns limites mínimos para a espessura desse tipo de laje:

- a) 7 cm para cobertura não em balanço;
- b) 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- c) 10 cm para lajes em balanço;
- d) 10 cm para lajes que suportam veículos de peso total igual ou menor a 30 kN;
- e) 12 cm para lajes que suportam veículos de peso total maior que 30 kN;
- f) 15 cm para lajes de protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de 1/42 para lajes biapoiadas e /50 para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

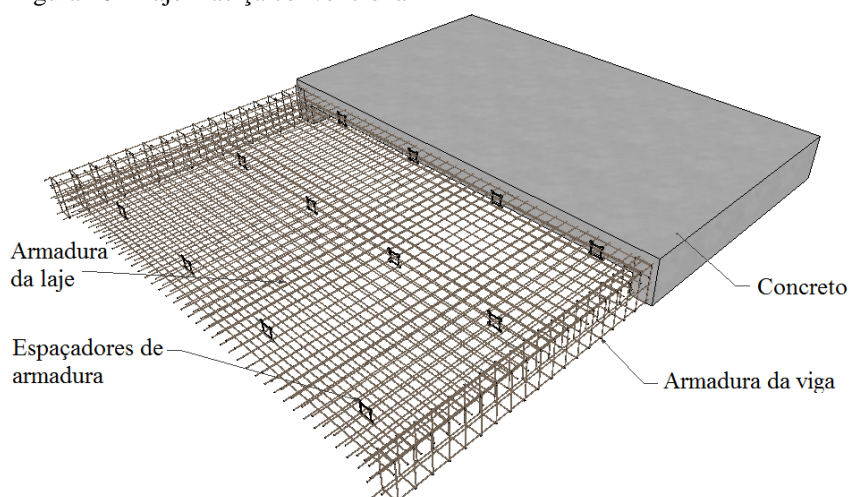
2.4.2 Processo de Execução

De acordo com Barros e Melhado (2006 apud SMIRIGLIO, 2015, P. 15) o processo de execução das lajes maciças ocorre em seis etapas que serão descritas a seguir:

- a) etapa 1 : Montagem das fôrmas e armaduras dos pilares;
- b) etapa 2: Montagem das fôrmas de vigas e lajes;
- c) etapa 3: Concretagem dos pilares;
- d) etapa 4: Colocação das armaduras nas fôrmas de vigas e lajes;
- e) etapa 5: Concretagem das vigas e lajes;
- f) etapa 6: Desfôrma.

A figura 10 representa os detalhes construtivos de uma laje maciça convencional.

Figura 10 - Laje maciça convencional



Fonte: (CATÁLOGO DIGITAL DE DETALHAMENTO DA CONSTRUÇÃO, 2012)

2.5 Lajes mistas (Steel deck)

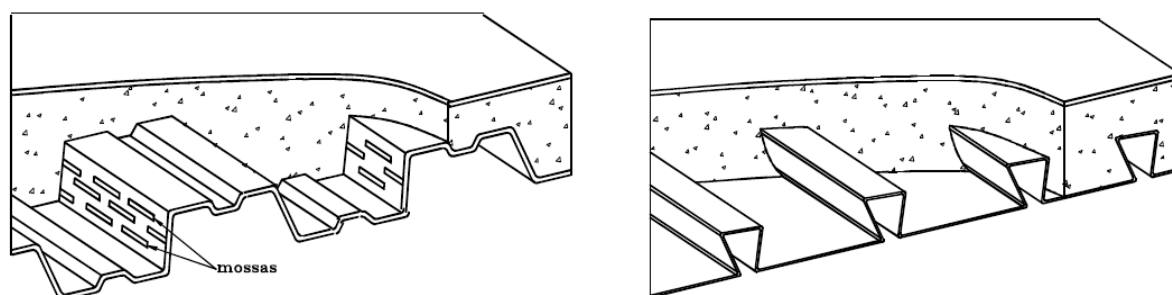
2.5.1 Descrição

A ABNT NBR 8800 (2008, p.211) define laje mista de aço e de concreto, também chamada de laje com fôrma de aço incorporada, como aquela em que, na fase final, o concreto atua estruturalmente em conjunto com a fôrma de aço, funcionando como parte ou como toda a armadura de tração da laje. Na fase inicial, antes do concreto atingir 75% da resistência à

compressão especificada, a fôrma de aço suporta isoladamente as ações permanentes e a sobrecarga de construção.

Ainda segundo especificação da norma, a fôrma de aço deve ser capaz de transmitir o cisalhamento longitudinal na interface entre aço e concreto, necessitando, assim, de aderência entre os dois materiais. Porém a aderência natural entre o aço e o concreto não é considerada efetiva para o comportamento misto, sendo necessário garantir a mesma através de ligações mecânicas por meio de *mossas*² nas fôrmas de aço trapezoidais e, ligação por meio do atrito devido ao confinamento do concreto nas fôrmas de aço reentrantes. A figura 11 apresenta as fôrmas de aço trapezoidais e reentrantes, respectivamente.

Figura 11 - Fôrma trapezoidal e reentrante para lajes mistas de aço e concreto

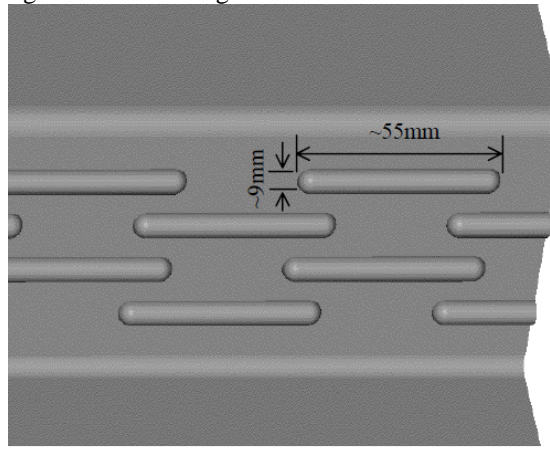


Fonte: (ABNT NBR 8800:2008, p.211)

Segundo Lima (2009, p.34-35) a capacidade de carga desse tipo de laje é influenciada principalmente pela geometria da fôrma metálica e pela sua transferência mecânica ao cisalhamento com o concreto. Atualmente, o mecanismo mais utilizado para se obter essa transferência mecânica é o emprego de saliências (*mossas*) estampadas nas partes inclinadas e/ou planas da fôrma metálica. As características dessas saliências, tais como geometria e profundidade, influenciam fortemente na resistência ao cisalhamento. A figura 12 mostra os detalhes da geometria das *mossas*.

² Mossas: cavidades na fôrma de aço, internas à laje mista. (NETO, 2001, p.5)

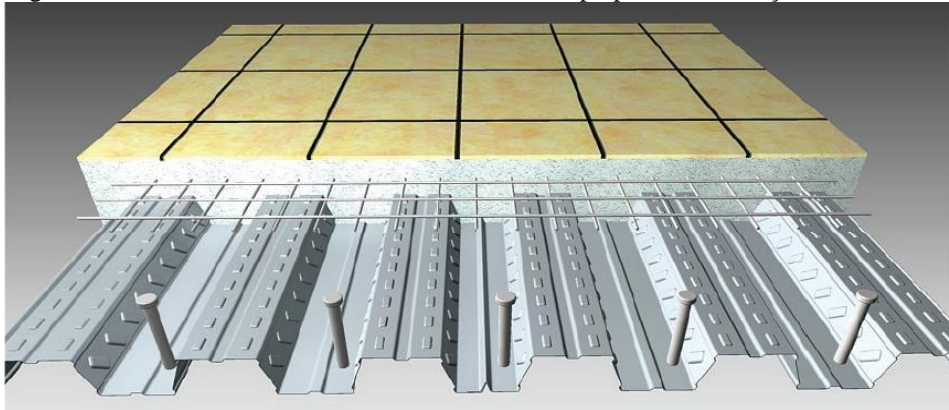
Figura 12 - Detalhe geometria das mossas



Fonte: (NETO, 2001, p.65)

Ainda, segundo Queiroz et al. (2001 apud SIEG, 2015 p.27), para garantir esse comportamento misto podem ser utilizados outros meios, como os conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*Stud Bolt*), desde que devidamente assegurados por ensaios ou por combinações adequadas de análise e ensaios. A figura 13 apresenta detalhes desses conectores de cisalhamento.

Figura 13 - Detalhe dos conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça



Fonte: (MBP COBERTURAS E FECHAMENTOS, [20--], p.2)

A seguir serão descritos os principais elementos constituintes das lajes com fôrma de aço incorporada.

2.5.1.1 Concreto

De acordo com Campos (2001, p.2 apud LEMOS, 2013, p.27), o concreto utilizado em lajes mistas *Steel Deck* deve resistir aos esforços de compressão e cisalhamento vertical. A resistência mínima à compressão (f_{ck}) é, usualmente, igual ou superior a 20 MPa.

Lemos (2013, p.27) diz que o concreto utilizado em lajes mistas *Steel Deck* é moldado no local, podendo ser armado ou não.

A NBR 8800 (2008, p.220) determina uma espessura mínima de 50 mm de concreto sobre a fôrma. A dimensão máxima dos agregados deve ser:

- $0,4 t_c$, onde t_c é a altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;
- $b_o/3$, onde b_o é a largura média das nervuras para fôrmas trapezoidais e a largura mínima das nervuras para as fôrmas reentrantes;
- 30 mm.

2.5.1.2 Fôrma de aço

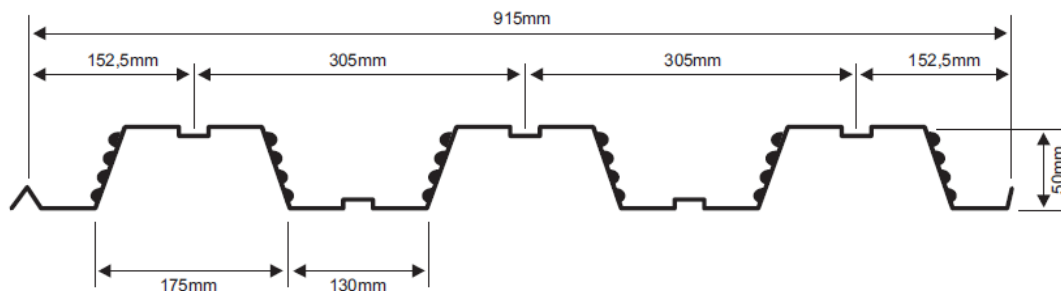
De acordo com Deliberato (2006, p.10) a fôrma metálica geralmente trabalha na direção longitudinal às nervuras, deve resistir isoladamente às ações atuantes na fase construtiva da laje e satisfazer os critérios de cálculo para um dimensionamento seguro.

Ainda segundo Deliberato (2006, p.22) as chapas utilizadas nas fôrmas de aço são de pequena espessura, sendo as mais utilizadas de 0,8 mm, 0,95 mm e 1,25 mm, geralmente com baixo teor de carbono.

Lemos (2013, p.30) diz que para não comprometer a vida útil das fôrmas de aço, existem diversos tipos de revestimentos que impedem ou retardam o processo de corrosão das mesmas. Os mais comuns e que devem ser aplicados em todas as superfícies expostas são a zincagem, a galvanização e a pintura eletrostática. A escolha do tipo de proteção adequada e sua correta aplicação são fatores determinantes para garantir a durabilidade da estrutura.

A figura 14 apresenta as dimensões mais comuns das chapas de aço utilizadas.

Figura 14 - Dimensões fôrmas de aço para lajes Steel Deck MF-50



Fonte: (METFORM, [20--], p.4)

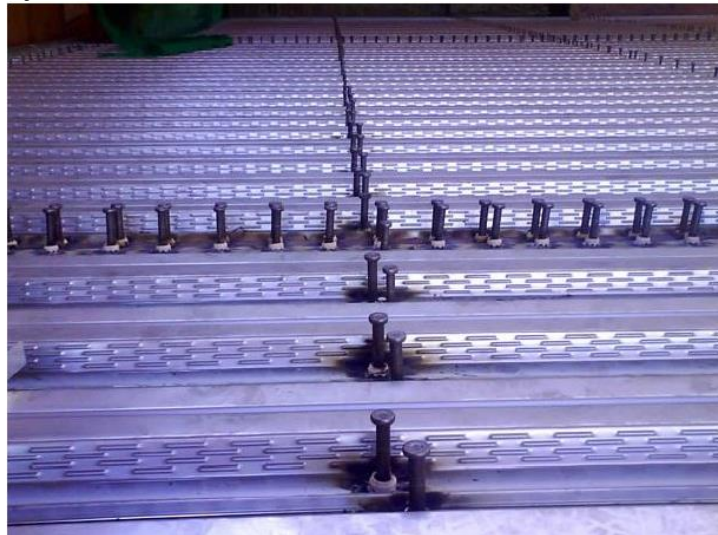
Deliberato (2006, p. 10) diz que as variações das dimensões da fôrma dependem da funcionalidade do sistema misto, por exemplo, a obtenção de maior capacidade de

carregamento durante a fase construtiva, principalmente para se alcançar maiores vãos sem a utilização de escoramento e maior capacidade de carregamento da laje.

2.5.1.3 Conectores de cisalhamento (*Stud Bolt*)

De acordo com Lemos (2013, p.29) os conectores de cisalhamento são aplicados nas vigas suporte com objetivo de proporcionar uma eficiente interação entre o aço e o concreto. A figura 15 mostra a aplicação desses conectores em uma laje mista.

Figura 15 - Aplicação dos conectores de cisalhamento em uma laje mista



Fonte: (METFORM SA, 2010 apud LEMOS, 2013, p.29)

Ainda segundo Lemos (2013, p.29) esses conectores são soldados e, quando bem dimensionados, garantem a absorção do cisalhamento nas duas direções e impedem o afastamento vertical entre a laje e as vigas, pois promovem a ligação entre estes elementos.

Conforme colocado por Fabrizzi (2007, p.46 apud LEMOS, 2013, p.30) existem dois grupos de conectores: os rígidos e os flexíveis, sendo caracterizados por meio da relação entre a força do conector e o deslocamento relativo entre o aço e o concreto. O primeiro tipo, não apresenta patamar de escoamento, sendo que a ruptura se dá de maneira frágil. Já o segundo tipo, possui esse patamar e conseqüentemente apresentar ruptura dúctil.

De acordo com Deliberato (2006. p. 25) o aço utilizado na fabricação dos *Stud Bolts* apresentam baixo teor de carbono, cujas propriedades fornecidas pelos fabricantes apresentam os mesmos valores:

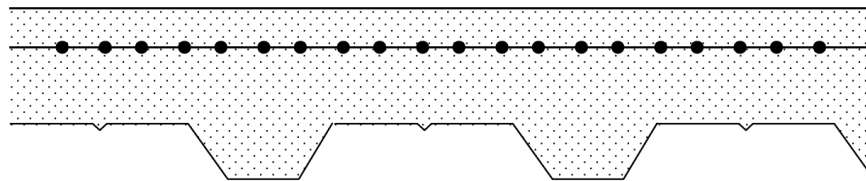
- Limite de escoamento mínimo: $f_y = 345 \text{ MPA}$

- Limite de resistência à tração: $f_u = 415 \text{ MPA}$
- Alongamento mínimo: $A = 20\%$

2.5.1.4 Armadura Complementar

Deliberato (2006, p. 24) diz que para os sistemas isostáticos, nos quais não ocorrem momentos negativos, as chapas de aço são suficientes para atender para atender ao sistema. Porém, visando controlar o aparecimento de fissuras, provocadas tanto pela retração do concreto quanto pela variação térmica, são empregadas telas soldadas na parte superior da capa de concreto, conforme mostra figura 16.

Figura 16 - Posicionamento da armadura complementar.



Fonte: (DELIBERATO, 2006, p.24)

Já para os trechos onde ocorrem momentos negativos, deverá ser especificada uma armadura adicional para resistir a esses momentos. (DELIBERATO, 2006, p.24).

2.5.2 Processo de Execução

O processo de execução das lajes mistas, segundo Silva (2010, p.6 apud LEMOS, 2013, p.37) pode ser descrito em 13 etapas descritas abaixo:

- etapa 1: içamento, distribuição e espalhamento das chapas de aço;
- etapa 2: montagem da estrutura;
- etapa 3: escoramento nas áreas necessárias;
- etapa 4: fixação da estrutura através dos conectores de cisalhamento;
- etapa 5: fixação dos arremates;
- etapa 6: aplicação de fitas adesivas nas juntas;
- etapa 7: colocação da malha antifissuração;
- etapa 8: inserção dos espaçadores;
- etapa 9: proteção das áreas de recorte;

- j) etapa 10: colocação das mestras;
- k) etapa 11: concretagem;
- l) etapa 12: nivelamento;
- m) etapa 13: acabamento superficial.

Segundo Deliberato (2006, p.118) durante o processo de execução das lajes mistas deve haver uma fiscalização, tanto das empresas fornecedoras quanto de quem está executando, muito maior que das lajes convencionais, já que boa parte da mão de obra ainda não assimilou os procedimentos necessários a esse tipo de sistema estrutural.

3 DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS E LAJES MISTAS *STEEL DECK*

A escolha do pavimento ideal para uma determinada edificação está relacionada tanto a imposições arquitetônicas e construtivas quanto a capacidade do mesmo de resistir de forma eficiente aos esforços solicitantes. Nos tópicos seguintes serão descritas as considerações e metodologias de cálculo para que se possa analisar o melhor sistema de lajes, entre lajes maciças e lajes mistas *Steel Deck*, do ponto de vista do dimensionamento e da capacidade de resistir a esses esforços.

3.1 Considerações gerais de dimensionamento

Segundo Carvalho (2003 apud BANDEIRA, 2006, p.7) para as estruturas de concreto armado a determinação das reações e esforços solicitantes é feita a partir da análise individual de cada elemento estrutural (lajes, vigas e pilares), supondo que as lajes estejam apoiadas nas vigas ou diretamente nos pilares, as vigas estejam apoiadas nos pilares e os pilares, por sua vez, são considerados indeformáveis na direção vertical.

O cálculo de um elemento de concreto armado consiste em determinar seus esforços internos (deslocamentos e deformações), atendendo-se às exigências dos estados limites últimos (ruína) e de serviço (verificação do seu deslocamento) e, dispor, convenientemente a armadura. Portanto, o dimensionamento do concreto armado resume-se em dimensionar uma seção de concreto que resista às tensões de compressão e uma seção de aço que resista às tensões de tração, de forma que ambos os elementos, concreto e aço, trabalhem solidariamente.

Bandeira (2006, p.8) afirma que para o cálculo e dimensionamento se torne algo mais simplificado e com soluções já conhecidas devem ser empregadas algumas hipóteses:

- a) o material é isotrópico, elástico, linear e tem pequenos deslocamentos;
- b) as lajes são apoiadas nas vigas (apoio simples);
- c) as vigas de apoio são indeslocáveis na direção vertical;
- d) as reações das lajes nas vigas são uniformemente distribuídas;
- e) as seções transversais, planas antes do carregamento, permanecem planas até a ruptura (há uma distribuição linear das deformações na seção);
- f) a deformação em cada barra de aço é a mesma do concreto em sua volta (há uma perfeita aderência entre o aço e o concreto não fissurado);

- g) o encurtamento máximo de ruptura do concreto, ou seja, a deformação limite, nas seções inteiramente comprimidas, pode chegar até 0,35%;
- h) o alongamento máximo permitido para a armadura de tração é de 1%;
- i) aplicação de coeficientes de minoração nas características dos materiais envolvidos e majoração dos esforços;

Bandeira (2006, p.8) afirma ainda que na prática o dimensionamento acontece na situação em que pelo menos um dos materiais (aço ou concreto) atinge seu limite máximo de deformação. A ABNT NBR 6118 (2014, p.26) apresenta em forma de diagramas (ver anexo A) as distribuições possíveis de deformação na seção transversal de uma peça submetida à flexão. Esses diagramas são denominados de diagramas de domínio do estado-limite último de uma seção transversal, sendo que o estado limite último é caracterizado quando a distribuição da deformação pertence a um dos domínios no diagrama. O objetivo disso é garantir que o concreto e o aço desenvolvam ao máximo sua capacidade resistente, resultando em um dimensionamento seguro e econômico.

3.2 Ações a serem consideradas

Conforme Bandeira (2006, p.6) ao se calcular uma estrutura de concreto armado, primeiramente são determinadas as ações características (ação por metro quadrado de laje), as reações e os esforços solicitantes. Para isso, segundo Pinheiro (2003 apud BANDEIRA, 2006, p.6), é feito o estudo das ações que provocam esforços ou deformações nas estruturas. Os esforços são chamados de ações diretas e as deformações ações indiretas.

A ABNT NBR 6120 (1980, p.1) classifica as ações que devem ser consideradas para todas as estruturas de edificações, independente de sua classe ou destino, em duas categorias: as ações permanentes (g) e as ações acidentais (q).

As ações permanentes (g) são constituídas pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos construtivos fixos e instalações permanentes. Já as ações acidentais (q) são todas aquelas que podem atuar sobre a estrutura da edificação em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais diversos, veículos etc.)

3.2.1 Combinações de ações

Para as lajes maciças de concreto armado e mistas *Steel Deck*, um carregamento deve ser definido, segundo a ABNT NBR 8681 (2003 p. 07), pela combinação das ações que têm

probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido. Essa combinação de ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

Para a determinação da combinação aplica-se a seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \Psi_{0j} \cdot F_{Qj,k}) \quad (3.1)$$

Em que:

$F_{Gi,k}$ – valor característico das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ – valor característico da ação variável principal;

$F_{Qj,k}$ – valor característico das demais ações variáveis;

γ_{gi} – Coeficiente para ações permanentes fornecido na tabela 01 do anexo I;

γ_{q1} - Coeficiente para ação variável principal fornecido na tabela 01 do anexo I;

γ_{qj} - Coeficiente para demais ações variáveis fornecido na tabela 01 do anexo I;

Ψ_{0j} – Coeficiente fornecido na tabela 02 do anexo I.

3.2.2 Coeficientes de ponderação das ações

Segundo a ANBT NBR 6118 (2014, p.64) as ações devem ser majoradas pelo coeficiente γ_f , considerando que:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3} \quad (3.2)$$

Em que:

$\gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$ - Coeficiente fornecido na tabela 01 do anexo K;

γ_{f2} – Coeficiente fornecido na tabela 02 do anexo K.

3.2.3 Ações consideradas no dimensionamento da laje maciça

Segundo Pinheiro (2010, p. 8) nas lajes maciças geralmente atuam, além de seu peso próprio, pesos de revestimentos de piso e forro, peso de paredes divisórias e ações de uso.

Para a definição do peso próprio admite-se o peso específico do concreto de 25 kN/m^3 , conforme a ABNT NBR 6118 (2014, p.22) especifica no item 8.2.2. Já as ações relativas aos revestimentos de piso e da face inferior da laje dependem dos materiais utilizados, conforme valores mínimos indicados na tabela 01 do anexo B.

O valor das ações acidentais depende da utilização do ambiente arquitetônico que ocupa a região da laje em estudo e, portanto, da finalidade da edificação (residencial, comercial, escritórios etc.). Esses valores podem ser encontrados na tabela 01 do anexo C.

3.2.4 Ações consideradas no dimensionamento da laje mista *Steel Deck*

Para a determinação correta das ações que atuam nas lajes mistas *Steel Deck* deve-se considerar individualmente a fase inicial e a fase final. Na fase inicial a fôrma de aço suporta as ações permanentes e as sobrecargas de construção. Já na fase final, o concreto atua estruturalmente em conjunto com a fôrma de aço. (ABNT NBR 8800, 2008, p. 211)

Dessa forma, serão descritas, na sequência, as ações em cada uma dessas fases.

3.2.4.1 Ações a serem consideradas na fase inicial

Segundo a ABNT NBR 8800 (2008, p. 2019) as ações que devem ser levadas em conta na determinação da resistência da fôrma de aço na fase inicial são:

- a) Peso próprio do concreto fresco, da fôrma de aço e da armadura;
- b) Sobrecarga de construção;
- c) Efeito do empoçamento (*ponding effect*).

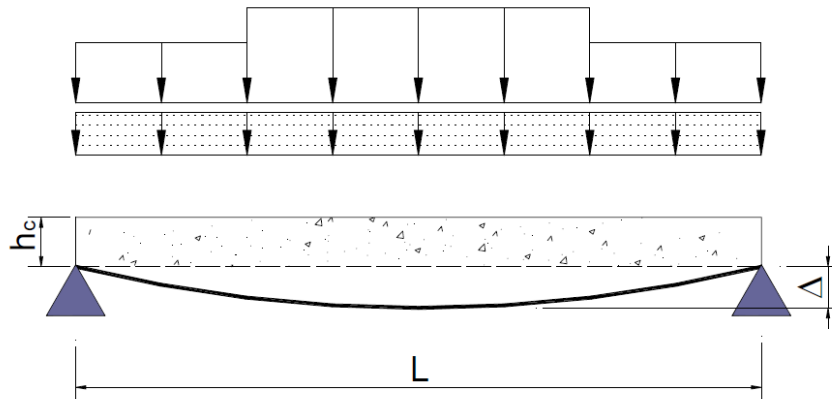
Segundo o Eurocode4 (1993 apud NETO, 2001, p.13) o peso próprio da fôrma de aço, o peso do concreto fresco e o empoçamento são consideradas ações permanentes.

As sobrecargas de construção devem representar o peso de todas as operações envolvidas na concretagem, as ações temporárias de armazenamento e qualquer impacto ou vibração que possa ocorrer. (NETO, 2001, p.13). A ABNT NBR 8800 (2008, p.219) diz que a sobrecarga característica de construção deve ser tomada como o valor mais nocivo dos seguintes valores:

- a) ação uniformemente distribuída mínima de 1 kN/m^2 ;
- b) ação linear de $2,2 \text{ kN/m}$ perpendicular à direção das nervuras da fôrma, na posição mais desfavorável, somente para a verificação do momento fletor;

De acordo com Neto (2001, p. 13-14) o efeito do empoçamento (*ponding effect*) é o aumento da altura de concreto causada pela flexão da fôrma, conforme mostra a figura 17, em que h_c é a altura total da laje mista e Δ é o aumento da altura da laje devido ao efeito do empoçamento:

Figura 17 - Efeito do empoçamento numa fôrma simplesmente apoiada



Fonte: (NETO, 2001, p. 14)

A ANBT NBR 8800 (2008, p. 219) diz que é considerado um acréscimo na espessura nominal do concreto de 70% do valor do deslocamento (δ) no centro da fôrma, nas situações em que:

$$\delta > \frac{L_f}{250} \quad (3.3)$$

Em que:

L_f - Vão teórico da laje na direção das nervuras.

Sendo, segundo Cotta (2009, p.34), o valor do deslocamento dado pela expressão abaixo:

$$\delta = k \cdot \frac{5}{384} \cdot p \cdot L^4 \cdot \frac{1}{E \cdot I} \quad (3.4)$$

Em que:

$$k = \begin{cases} 1,00 - \text{para vigas simplesmente apoiadas;} \\ 0,41 - \text{para vigas com 2 vãos iguais(3 apoios);} \\ 0,52 - \text{para vigas com 3 vãos iguais(4 apoios);} \\ 0,49 - \text{para vigas com 4 vãos iguais;} \end{cases}$$

p – carregamento da laje;

L –vão efetivo da laje;

E – Módulo de elasticidade da fôrma;

I - momento de inércia da seção efetiva da fôrma.

Além disso, Neto (2001, p. 14) diz que as ações devem estar dispostas de modo a causar as condições mais desfavoráveis ao dimensionamento da fôrma de aço.

3.2.4.2 Ações a serem consideradas na fase final

Segundo a ABNT NBR 8800 (2008, p.219) na fase final deve-se considerar que todo o carregamento é sustentado pelo sistema misto de aço e concreto, ou seja, deve-se considerar todas as ações permanentes (peso próprio e revestimentos) e as ações acidentais, decorrentes do uso e ocupação da laje.

3.3 Metodologia de Cálculo das lajes maciças

De acordo com Carvalho (2014, p. 321) há basicamente dois métodos de cálculo para as lajes maciças: o elástico e o de ruptura. O primeiro se baseia na análise do comportamento do elemento sob ações de serviço e concreto íntegro (não fissurado). O segundo procedimento se baseia nos mecanismos de ruptura das lajes.

No método elástico, subestimam-se os deslocamentos, pois não é considerada a fissuração do concreto; também não se pode dizer que os esforços na situação de ruptura, usados no cálculo da armadura, são proporcionais aos obtidos em serviço.

O método de ruptura é desenvolvido com base no mecanismo de ruptura da laje, ou seja, procura identifica de que forma a laje chega ao colapso e, para esta situação, são calculados os esforços pela chamada teoria das charneiras plásticas; normalmente é difícil, neste caso, determinar dos deslocamentos, não sendo possível assim, precisar informações sobre o comportamento da estrutura em serviço.

Apesar das diferenças, em ambos são utilizados conceitos de ruptura da seca transversal no cálculo e detalhamento da armadura e os conceitos do método elástico na verificação do comportamento da estrutura em serviço. (CARVALHO, 2014, p.321).

Neste trabalho será abordado apenas o método elástico, que pode ser designado também por teoria das placas delgadas. Segundo Carvalho (2014, p. 321) esse método se baseia na equação de equilíbrio de um elemento infinitesimal de placa e nas relações de compatibilidade das deformações do mesmo. Como as lajes maciças são placas delgadas de concreto, todos os conceitos e tóricas desenvolvidas para placas delgadas se aplicam a elas. A equação diferencial fundamental das placas delgadas submetidas a uma ação $p(x,y)$ é:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = -\frac{P}{D} \quad (3.5)$$

Em que:

w – deslocamento vertical;

x, y - coordenadas de um ponto genérico da placa;

P – intensidade da ação atuante;

$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$ – Rigidez a flexão da placa;

E – módulo de deformação longitudinal do concreto;

ν – coeficiente de Poisson.

Conforme afirmado por Carvalho (2014, p.325) a determinação dos esforços e dos deslocamentos de placas pode ser feita considerando-se as ações em serviço, a partir da equação fundamental, ou, simplesmente, montando outro tipo de modelo, visto que essa equação tem solução analítica para poucos casos. Dessa forma os processos que podem ser empregados para o cálculo de lajes são:

- a) diferenças finitas;
- b) elementos finitos;
- c) grelha equivalente;
- d) utilização de séries para a representação do valor de $p(x, y)$ – teoria das placas.

Neste trabalho serão estudados o processo de grelha equivalente e o processo que determina os esforços e deslocamentos por meio de séries.

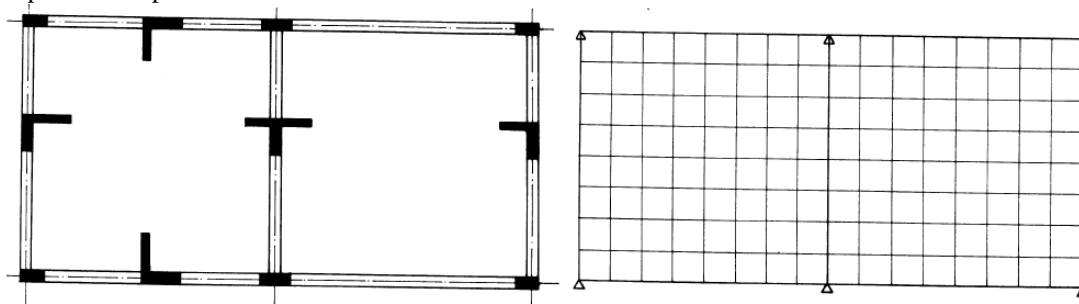
3.3.1 Determinação dos esforços por grelha equivalente

Carvalho (2014, p.399) diz que devido à impossibilidade de resolver as placas com a equação fundamental, o cálculo de pavimentos de edifícios compostos de lajes e vigas de concreto armado é feito de maneira simplificada, considerando-se as lajes como elementos isolados apoiados em elementos rígidos. O avanço da informática e de programas de análise estrutural possibilitou analisar o comportamento de um pavimento como um todo, e também lajes isoladas, levando em consideração a influência da flexibilidade dos apoios e da rigidez à torção, sendo ainda possível incluir na análise a não linearidade física do concreto armado.

Ainda segundo Carvalho (2014, p.399) o processo de grelha equivalente (ou analogia de grelha) permite que se analise um pavimento em diferentes situações de esquema estrutural, garantindo ao projetista rapidez na definição do sistema estrutural mais adequado.

O procedimento de grelha equivalente consiste em, segundo Carvalho (1994, p.20), substituir a placa (laje) por uma malha equivalente de vigas (grelha equivalente). A figura 18a mostra a planta de um pavimento com duas lajes e a figura 18b mostra a grelha equivalente que representa o pavimento.

Figura 18 - a) planta de um pavimento com vigas e lajes b) grelha equivalente empregada para representar o pavimento.



Fonte: (CARVALHO, 1994, p.21)

Carvalho (1994, p.20) diz que as ações distribuídas se dividem entre os elementos da grelha equivalente de acordo com a área de influência de cada elemento. Elas podem ser consideradas uniformemente distribuídas ao longo dos elementos ou mesmo, dentro de certa aproximação, concentrada nos nós, considerando-se quando a posição das mesmas não coincidir com um nó, valores equivalentes de ação nos nós próximos. A rigidez à torção e à

flexão deve ter valores tais que ao se carregar as duas estruturas se obtenham a mesma deformação e esforços internos iguais em seções correspondentes das duas estruturas.

Hambly (1976 apud CARVALHO, 1994, p. 23) faz algumas recomendações para a adoção de uma grelha equivalente:

- a) o espaçamento entre os elementos da grelha não devem ser superior a $\frac{1}{4}$ do vão;
- b) no caso de se desejar estudar efeitos localizados deve-se considerar um espaçamento menor da malha na região em questão;
- c) as vigas ou regiões rígidas têm que ser consideradas com elementos;
- d) em bordas livres os elementos devem ser considerados passando a $0,3h$ deste, sendo h a espessura do elemento;
- e) para placas pouco esconsas os elementos da grelha podem ser considerados ortogonais.

Segundo Hambly (1976 apud CARVALHO, 2014, p. 400) o cálculo da inércia à flexão dos elementos de placa é feito considerando-se uma faixa de largura b , a qual é dada pela soma da metade dos espaços entre os elementos vizinhos, e a altura h (espessura da placa). Assim para um elemento de placa, considera-se a rigidez à torção (I_f) e a rigidez à flexão (I_t) igual a:

$$I_f = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.6)$$

$$I_t = 2 \cdot I_f = \frac{b \cdot h^3}{6} \quad (3.7)$$

Nos elementos de viga, no estágio I, admitindo a viga retangular (altura h , largura b), a inércia à torção (I_f) e a inércia à flexão (I_t) igual a:

$$I_f = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.8)$$

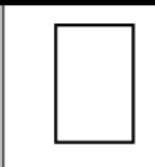
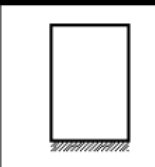
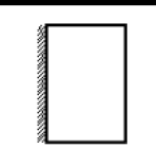
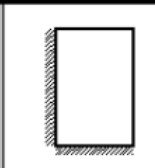
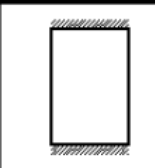
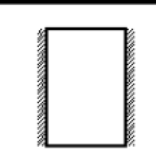
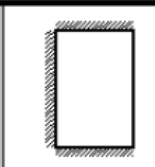
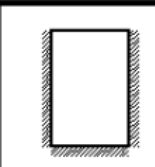
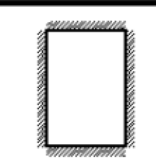
$$I_t = \frac{h \cdot b^3}{3} \quad (3.9)$$

3.3.2 Determinação de esforços e deslocamentos pela teoria das placas

De acordo com Carvalho (2014, p.330) esse processo de cálculo possibilita determinar momentos fletores máximos e deslocamentos máximos (flechas) a partir da geometria e condição de vinculação da placa. Para isso o pavimento deve ser discretizado, ou seja, cada laje deve ser estudada individualmente, de acordo com sua vinculação às demais, conforme mostra a figura 19. Além disso, considera-se que as lajes menores e menos rígidas são engastadas nas maiores e mais rígidas.

Segundo Pinheiro (2010, p.3) existem basicamente três tipos vínculos das bordas das lajes: borda livre, simplesmente apoiada e engastada. A borda livre se caracteriza pela ausência de apoio, apresentando, dessa forma, deslocamentos verticais. Nos outros tipos de vinculação não há deslocamentos verticais. Nas bordas engastadas, as rotações também são impedidas.

Figura 19 - Casos de vinculação das lajes.

Caso	Vinculação	Caso	Vinculação	Caso	Vinculação
1		2		3	
Quatro bordas simplesmente apoiadas		Uma borda menor engastada		Uma borda maior engastada	
4		5		6	
Duas bordas adjacentes engastadas		Duas bordas menores engastadas		Duas bordas maiores engastadas	
7		8		9	
Uma borda maior apoiada		Uma borda menor apoiada		Quatro bordas engastadas	

Fonte: (PINHEIRO, 2010, p.4)

3.3.2.1 Determinação da flecha

Para Carvalho (2014, p.331) a flecha (deslocamento transversal máximo de uma placa ou barra reta) para lajes com carregamento uniforme e com as condições de contorno de

acordo com a figura 20, pode ser calculada pela equação abaixo. Observando-se que a flecha encontrada é elástica, ou seja, não considera os efeitos da fissuração e da fluência.

$$f = \frac{\alpha}{100} \frac{P \cdot l_x^4}{E_{cs} \cdot h^3} \quad (3.10)$$

Em que:

P - carregamento uniformemente distribuído sobre a placa;

α - coeficiente retirado da tabela 01 do anexo D;

l_x - menor vão da laje;

$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci}$ -Módulo de elasticidade do concreto;

h - altura ou espessura da placa;

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80};$$

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}};$$

f_{ck} - resistência à compressão característica do concreto.

Porém, para a verificação do estado limite de deformação, a ABNT NBR 6118 (2014, p. 125) diz que deve ser considerada a rigidez efetiva das seções dos elementos estruturais, ou seja, é necessário levar em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações diferidas no tempo. Para isso, no item 14.6.4.1, a norma permite, como meio de aproximação, utilizar o módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}) e o momento de inércia da seção bruta de concreto.

Para considerar o efeito da fissuração do concreto no cálculo da flecha, Carvalho (2014, p. 331) diz que a melhor alternativa é empregar o método de grelha equivalente, mas segundo Moura e Marcelino (2003 apud CARVALHO, 2014, p.331) uma forma simplificada de corrigir a flecha é multiplicar a equação acima pela relação entre a inércia no estágio I e a inércia equivalente.

3.3.2.2 Determinação dos momentos

Segundo Carvalho (2014, p. 331-332) o momento atuante (aquele que vai ser comparado ao momento de fissuração para a verificação do estágio em que a seção se

encontra, e para ser utilizado no cálculo da inércia equivalente) é o máximo momento positivo (no caso de peças biapoiadas e contínuas); porém com base nos resultados obtidos por Carvalho (1994 apud CARVALHO, 2014, p.332) o melhor é usar o máximo momento negativo caso ele exista. Os momentos fletores máximos são determinados pelas expressões:

a) momentos fletores máximos positivos, nas direções x e y:

$$m_x = \mu_x \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} \quad (3.11)$$

$$m_y = \mu_y \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} \quad (3.12)$$

b) momentos fletores máximos negativos, nas direções x e y:

$$x_x = \mu_x' \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} \quad (3.13)$$

$$x_y = \mu_y' \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} \quad (3.14)$$

Em que:

l_x - menor dimensão superficial da placa

$\mu_x, \mu_y, \mu_x', \mu_y'$ - coeficientes fornecidos nas tabelas 01, 02 e 03 do anexo E.

3.3.3 Dimensionamento

Para o dimensionamento de lajes isoladas pelo método elástico por meio da teoria das placas, Carvalho (2014, p.336) recomenda o seguinte roteiro:

- a) discretização do pavimento: determinação das condições mais adequadas de vinculação das lajes;
- b) pré-dimensionamento das alturas das lajes;
- c) cálculo das ações atuantes;
- d) verificação das flechas;
- e) cálculo dos momentos;

- f) determinação das armaduras longitudinais;
- g) cálculo das reações da laje nas vigas de apoio;
- h) verificação do efeito das forças cortantes (cisalhamento);
- i) detalhamento das armaduras.

3.3.3.1 Determinação das armaduras longitudinais

Carvalho (2014, p.341) afirma que o cálculo da armadura das lajes, nas direções x e y, é feito observando-se que para a largura da seção é tomada uma faixa unitária (normalmente um metro) e, portanto, a armadura encontrada deve ser distribuída ao longo dessa largura.

Para o cálculo da área de aço (A_s), Carvalho (2014, p.140-141) utiliza a expressão abaixo:

$$A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (3.15)$$

Em que:

$M_d = M \cdot 1,4$ –Momento fletor solicitante de cálculo;

K_z - valor adimensional que pode ser encontrado na tabela 01 do anexo G;

d –altura útil;

M - Momento fletor atuante;

$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$ - tensão (resistência) de escoamento de cálculo do aço;

f_{yk} - resistência característica do aço à tração.

3.3.3.2 Verificação do cisalhamento

A ABNT NBR 6118 (2014, p.158-160) prevê duas situações para a verificação do efeito da força cortante: lajes sem armadura para forças cortantes e lajes com armadura para força cortante.

Porém, de maneira geral, segundo Carvalho (2014, p.347), as lajes de concreto armado fazem parte de um grupo de elementos estruturais que resistem bem ao esforço cortante, fazendo com que seu efeito não seja crítico. Em grande parte das situações apenas o concreto é suficiente para resisti-lo e não são necessárias armaduras transversais.

A norma diz que não é necessária armadura transversal para resistir aos esforços de tração devido à força cortante desde que a força cortante solicitante de cálculo (V_{sd}) seja menor ou igual à resistência de projeto ao cisalhamento (V_{Rd1}):

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} \quad (3.16)$$

Sendo a força cortante resistente de cálculo dada por:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (3.17)$$

Em que:

$\tau_{Rd} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$ - Tensão de cisalhamento resistente de cálculo;

$f_{ctd} = \frac{f_{ck,inf}}{1,4}$ - Resistente à compressão de cálculo do concreto;

$k = (1,6 - d) \geq 1$ - Coeficiente;

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

$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c}$ - Tensão de compressão do concreto;

b_w - Largura mínima da seção;

d - Altura útil;

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

A_{s1} - área da armadura de tração que se estende no mínimo até $d - l_{b,nec}$, sendo $l_{b,nec}$ o comprimento de ancoragem necessário;

N_{sd} - Força longitudinal na seção devida à protensão ou carregamento (a compressão é considerada com sinal positivo);

A_c - Área da seção transversal de concreto.

A verificação da compressão diagonal do concreto, de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014, p. 136) é feita comparando-se a força cortante solicitante de cálculo (V_{sd}) com força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto (V_{Rd2}):

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad (3.18)$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (3.19)$$

Em que:

$\alpha_{v2} = \left(1,0 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ - (f_{ck} em MPa)- coeficiente;

$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$ - Resistência de cálculo do concreto;

b_w - Largura mínima da seção;

d - Altura útil.

3.4 Metodologia de Cálculo das lajes mistas

O dimensionamento das lajes mistas é feito em duas etapas distintas: primeiro é feita a verificação da fôrma de aço na fase inicial e em um segundo momento é feita a verificação da laje na fase final.

A primeira fase ocorre, segundo Lemos (2013, p.32-33), antes do processo de cura do concreto, quando ainda não existe um comportamento misto do sistema, sendo o dimensionamento norteado pela ABNT NBR 14762 (2010). De acordo com Queiroz et al (2012, p.50), o cálculo da fôrma de aço na fase de construção não envolve considerações de seções mistas, envolve apenas o dimensionamento de seções de aço formadas a frio. Portanto, essa etapa de cálculo não será aprofundada neste trabalho, já que usualmente, os fabricantes fornecem, sob a forma de tabelas (ver tabela 01 do anexo J), a capacidade de cargas da fôrma para um dado vão.

Já a segunda fase, ocorre quando os dois materiais, concreto e aço, trabalham de forma solidária: a fôrma de aço resiste aos esforços de tração e o concreto aos esforços de compressão. Para essa etapa os procedimentos para dimensionamento estão prescritos na ABNT NBR 8800 (2008), que trata do projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de concreto e aço de edifícios e, serão descritos no item 3.4.2.

3.4.1 Verificação da fôrma de aço na fase inicial

De acordo com Neto (2001, p. 19), a fôrma metálica de um sistema de laje mista fica submetida principalmente ao momento fletor e ao esforço cortante e, apresenta os seguintes estados limites:

a) estados-limites últimos:

- Momento fletor;
- Esforço cortante;
- Interação momento fletor e esforço cortante;
- *Web Crippling* (deformação por compressão da alma dos perfis metálicos);
- Interação momento fletor e *Web Crippling*.

b) estado limite de serviço:

- Flecha máxima.

3.4.1.1 Estados-limites últimos

Para a verificação da fôrma de aço nos estados-limites últimos deve ser utilizada a análise elástica. (ABNT NBR 8800, 2008, p.2012)

Segundo Neto (2001, p. 19) o comportamento da fôrma de aço pode ser analisado no regime elástico ao se usar a teoria das placas finas. No entanto, a análise dos perfis de chapas finas torna-se muito complexa devido a fatores tais como a resistência pós-flambagem, a flambagem por cisalhamento, o dobramento a frio da chapa, a presença de enrijecedores, de mossas e/ou indentações etc. Por essas razões, a determinação da capacidade de carregamento é simplificada baseando-se em ensaios experimentais e no conceito da largura efetiva.

3.4.1.2 Estado limite de serviço

Segundo a ABNT NBR 8800 (2008, p. 212) para o estado limite de serviço, o deslocamento máximo da fôrma de aço sob seu peso próprio e peso do concreto fresco (excluindo-se a sobrecarga de construção) deve ser:

$$\delta_{m\acute{a}x} \leq \begin{cases} L_f/180 \\ 20 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.20)$$

Em que:

L_f - vão teórico da fôrma na direção da nervura

Além disso, ainda segundo a ABNT NBR 8800(2008, p.212) as propriedades geométricas da seção transversal da fôrma devem ser determinadas com base na ABNT NBR 14762 (2010).

De acordo com o CSSBI 12M-84 (1998 apud NETO, 2001, p. 45-46) o deslocamento máximo no meio do vão é dado pela seguinte equação:

a) Para fôrmas simplesmente apoiadas:

$$\delta_0 = \frac{5 \cdot p \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_{ef}} \cdot \gamma_p \quad (3.21)$$

b) Para fôrmas contínuas de dois vãos iguais:

$$\delta = 0,46 \cdot \delta_0 \quad (3.22)$$

c) Para fôrmas contínuas de três ou mais vãos iguais

$$\delta = 0,53 \cdot \delta_0 \quad (3.23)$$

Em que:

p – ação permanente uniformemente distribuída;

L - vão entre apoios;

E_a – módulo de elasticidade longitudinal do aço;

I_{ef} – momento de inércia efetiva da fôrma;

$\gamma_p = 1,10$ - fator de majoração que considera o efeito do empoçamento da fôrma.

3.4.2 Verificação da laje na fase final

A ABNT NBR 8800 (2008, p.212) determina que a resistência de cálculo das lajes com fôrma de aço incorporada deve suportar as solicitações de cálculo de momento fletor, cisalhamento longitudinal, cisalhamento vertical e punção.

3.4.2.1 Determinação da largura efetiva

Para a determinação da resistência de cálculo, a ABNT NBR 8800 (2008, p.221) considera a utilização de uma largura efetiva da laje sob ações concentradas e lineares.

Quando as ações suportadas pela laje forem paralelas às nervuras da fôrma de aço pode-se considerá-las como distribuídas em uma largura b_m , medida imediatamente acima do topo da fôrma, conforme figura 20, dada por:

$$b_m = b_p + 2 \cdot (t_c + h_r) \quad (3.24)$$

Em que:

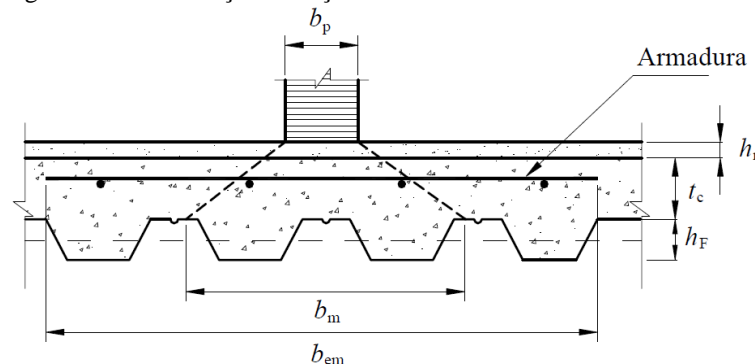
b_p – largura da ação concentrada perpendicular ao vão da laje;

t_c – altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

h_r – altura do revestimento da laje, se houver.

Para as ações perpendiculares pode ser utilizada a mesma fórmula, desde que a largura b_p seja tomada como o comprimento da ação linear.

Figura 20 - Distribuição das ações concentradas ou lineares



Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008, p. 221)

A ABNT NBR 8800 (2008, p.221) ainda determina que essa largura efetiva não supere os seguintes valores:

a) Para momento fletor e cisalhamento longitudinal:

- no caso de vãos simples e tramos externos de lajes contínuas:

$$b_{em} = b_m + 2 \cdot L_p \cdot \left(1 - \frac{L_p}{L_f}\right) \quad (3.25)$$

- no caso de tramos internos de lajes contínuas:

$$b_{em} = b_m + 1,33 \cdot L_p \cdot \left(1 - \frac{L_p}{L_f}\right) \quad (3.26)$$

b) Para cisalhamento vertical:

$$b_{ev} = b_m + L_p \cdot \left(1 - \frac{L_p}{L_f}\right) \quad (3.27)$$

Em que:

L_p – distância do centro de carga ao apoio mais próximo;

L_f – vão teórico da laje na direção das nervuras.

3.4.2.2 Estados-limites últimos

Segundo Queiroz et al (2012, p.58) a resistência das lajes mistas deve ser suficiente para que estas possam suportar as ações de cálculo aplicadas, assegurando-se que nenhum estado limite último seja atingido. Os estados limites que devem ser verificados são baseados nos seguintes modos de colapsos, conforme mostra a figura 21.

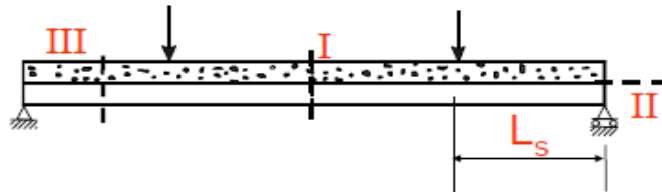
A seção crítica I corresponde à flexão, que é a resistência ao momento fletor. Esse estado limite pressupõe a interação completa entre a fôrma e o concreto e pode ser considerado crítico se o vão de cisalhamento for suficientemente grande.

A seção crítica II corresponde ao cisalhamento longitudinal. A ação máxima na laje é determinada pela resistência cisalhamento longitudinal, não sendo possível atingir a

resistência última ao momento fletor. É caracterizada como uma ação mista de interação parcial, sendo usualmente o estado limite crítico das lajes mistas.

A seca crítica III corresponde ao cisalhamento vertical. Não é considerado um estado crítico para as lajes mistas usuais, apenas para casos especiais como, por exemplo, lajes espessas de vão curto sujeitas a ações elevadas.

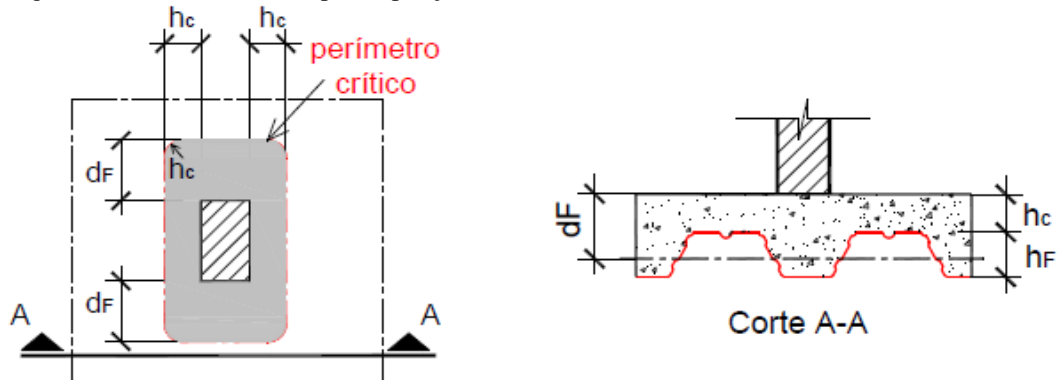
Figura 21 - Seções críticas do estado-limite último



Fonte: (COTTA, 2009, p.44)

A punção é outro estado limite que pode ser crítico se o perímetro da área carregada e a espessura da laje forem pequenos e se a ação concentrada for muito elevada. A figura 22 representa esse estado limite.

Figura 22 - Perímetro crítico para a punção



Fonte: (COTTA, 2009, p.50)

3.4.2.2.1 Momento fletor

Na determinação do momento fletor positivo resistente de cálculo, a ABNT NBR 8800 (2008, p.212) diz que a fôrma de aço deve resistir aos esforços de tração em conjunto com uma armadura adicional, caso exista, colocada na face inferior da laje. Para o momento fletor negativo resistente de cálculo sobre os apoios em lajes contínuas, a contribuição da fôrma de aço aos esforços de compressão somente pode ser levada em conta se for contínua.

3.4.2.2.1.1 Posição da linha neutra

O primeiro passo para a determinação do momento fletor é estabelecer a posição da linha neutra que, segundo Fabrizzi (2007, p.197) situa-se, normalmente, acima da fôrma de aço, porém em fôrmas mais profundas pode acontecer da mesma se localizar na fôrma de aço.

De acordo com Queiroz et al (2012, p.52) a posição da linha neutra plástica (LNP) é definida considerando os valores de N_{cf} e N_{pa} , sendo que :

$$N_{cf} \geq N_{pa} \rightarrow LNP \text{ está acima da fôrma} \quad (3.28)$$

$$N_{cf} = \left(\frac{0,85 \cdot f_{ck}}{1,4} \right) \cdot b \cdot t_c \quad (3.29)$$

$$N_{pa} = A_{F,ef} \cdot f_{yFd} \quad (3.30)$$

Em que:

N_{cf} – força de compressão no concreto;

N_{pa} – força de tração na fôrma de aço;

$f_{yFd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$ – Resistência de cálculo ao escoamento da fôrma de aço;

b – largura unitária da laje, tomada igual a 1000 mm;

t_c – altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

$A_{F,ef}$ – área de seção efetiva da fôrma (correspondente a 1000 mm), determinada desprezando-se a largura das mossas na seção transversal.

3.4.2.2.1.2 Resistência de cálculo pelo momento fletor positivo

A ABNT NBR 8800 (2008, p.212) determina o valor dos momentos fletores pelas seguintes expressões:

a) momento fletor positivo resistente de cálculo para linha neutra acima da face superior da fôrma de aço:

$$M_{Rd} = N_{pa} \cdot (d_f - 0,5 \cdot a) \quad (3.31)$$

Em que:

N_{pa} - força de tração na fôrma de aço;

d_f - distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma;

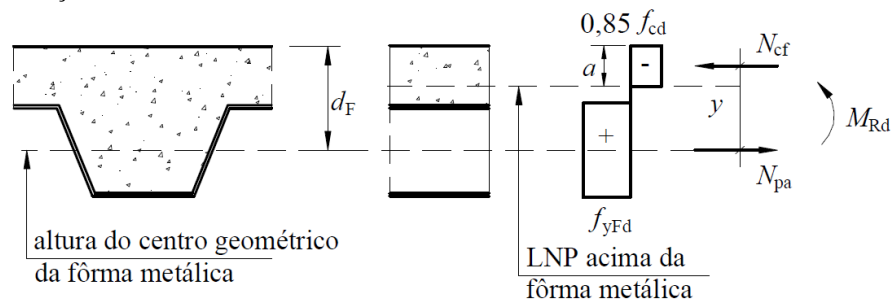
$a = \frac{N_{pa}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b}$ - altura do bloco de compressão;

$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$ - Resistência de cálculo do concreto;

b - largura unitária da laje, tomada igual a 1000 mm.

A figura 23 representa o diagrama de tensões para momento positivo quando a linha neutra estiver acima da face superior da fôrma de aço.

Figura 23 - Diagrama de tensões para momento positivo – LNP acima da fôrma de aço



Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008, p. 213)

b) momento fletor positivo resistente de cálculo para linha neutra abaixo da face superior da fôrma de aço:

$$M_{Rd} = N_{cf} \cdot y + M_{pr} \quad (3.32)$$

Em que:

$y = h_t - 0,5 \cdot t_c - e_p + (e_p - e) \cdot \frac{N_{cf}}{N_{pa}}$ - distância entre N_{cf} e N_{pa} ;

h_t - altura total da laje incluindo fôrma e concreto;

t_c – altura da laje de concreto acimado topo da fôrma de aço;

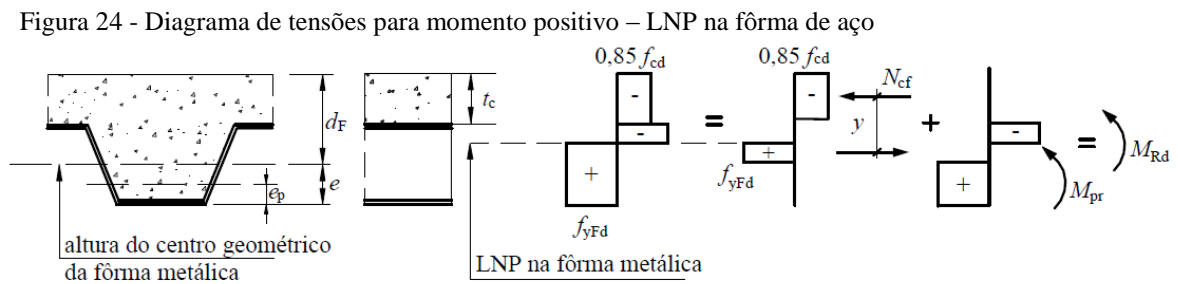
e_p – distância da LNP da seção efetiva da fôrma à sua face inferior;

e – distância do centro geométrico da área efetiva da fôrma à sua face inferior;

$M_{pr} = 1,25 \cdot M_{pa} \cdot \left(1 - \frac{N_{cf}}{N_{pa}}\right) \leq M_{pa}$ – Momento de plastificação da fôrma de aço, reduzido pela presença da força axial;

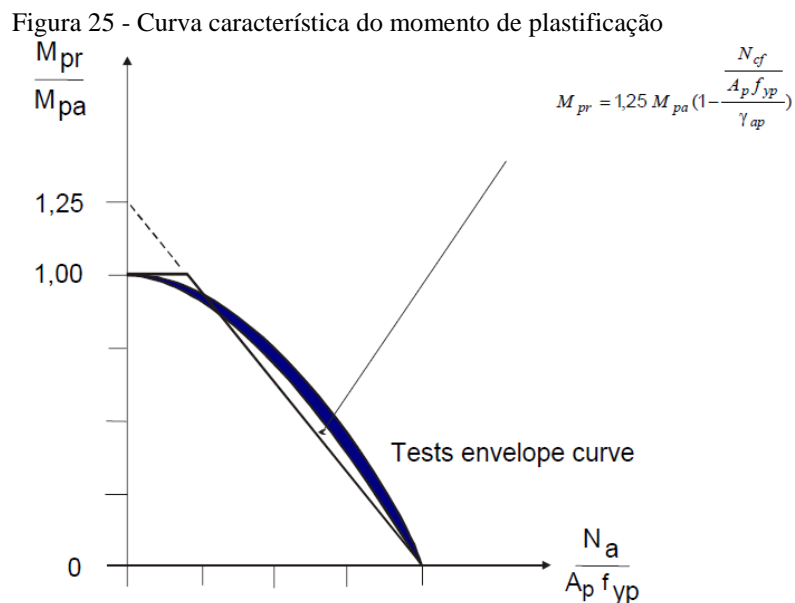
M_{pa} – Momento de plastificação da fôrma de aço (usualmente fornecida pelo fabricante) dividido pelo coeficiente de ponderação da resistência $\gamma_{a1} = 1,10$.

A figura 24 representa o diagrama de tensões para momento positivo quando a linha neutra estiver na face superior da fôrma de aço.



Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008, p. 214)

A figura 25 representa a curva característica do momento de plastificação resistente na seção da fôrma de aço.



Fonte: (SIMÕES, [20--], p. 19)

3.4.2.2.1.3 Resistência de cálculo pelo momento fletor negativo

Segundo Fabrizzi (2007, p.197) o momento fletor negativo ocorre sobre apoios intermediários de lajes contínuas, sendo que nessas regiões a laje mista deve ser considerada como uma laje de concreto armado. Dessa forma, a área da fôrma de aço comprimida é desprezada e a resistência é obtida pela seção de concreto comprimida e a armadura tracionada.

O momento fletor negativo pode ser obtido pela equação a seguir, retirada do Eurocode4 (2004 apud FABRIZZI, 2007, p.197):

$$M_{Rd,pl} = A_s \cdot f_{sd} \cdot z \quad (3.33)$$

Em que:

A_s – área de armadura por unidade de comprimento para o momento negativo;

f_{sd} – resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura;

$z = d_s - \frac{x}{2}$ – Distância entre N_s e N_c ;

d_s – distância entre a face inferior da fôrma de aço e armadura negativa;

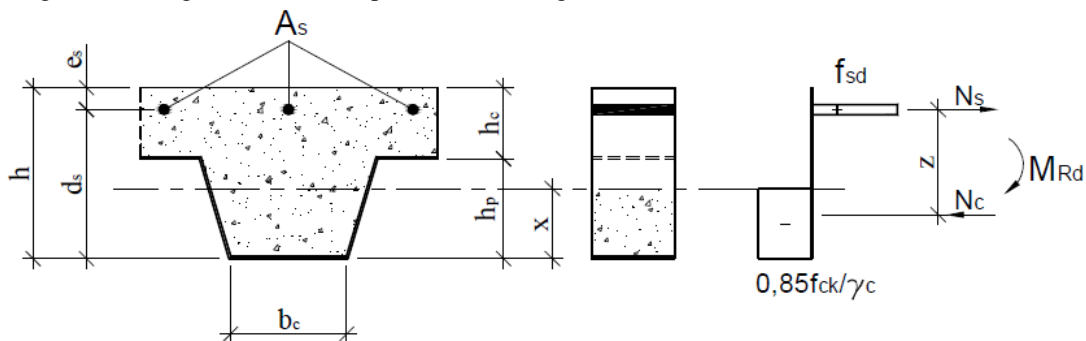
$x = \frac{A_s \cdot f_{sd}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_c}$ – altura da linha neutra;

$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$ Resistência de cálculo do concreto à compressão;

b_c - largura de concreto comprimido no interior das nervuras.

A figura 26 representa o diagrama de tensões para momento negativo.

Figura 26 - Diagrama de tensões para momento negativo



Fonte: (FABRIZZI, 2007, p.197)

3.4.2.2.1.4 Verificação da flambagem da fôrma de aço

Ainda, de acordo com a ABNT NBR 8800 (2008, p.214) deve-se assegurar que não haverá flambagem local na fôrma de aço preenchida com concreto. Para isso, a largura plana de todos os elementos da fôrma (ver figura 27), havendo ou não mossas no elemento considerado deve atender às seguintes exigências:

a) Quando $\alpha \geq 0,5$

$$b_f \leq \frac{26,49 \sqrt{\frac{E}{f_{yF}}}}{(13 \cdot \alpha - 1)} \cdot t_F \quad (3.34)$$

b) Quando $\alpha < 0,5$

$$b_f \leq \frac{2,40 \sqrt{\frac{E}{f_{yF}}}}{\alpha} \cdot t_F \quad (3.35)$$

Em que:

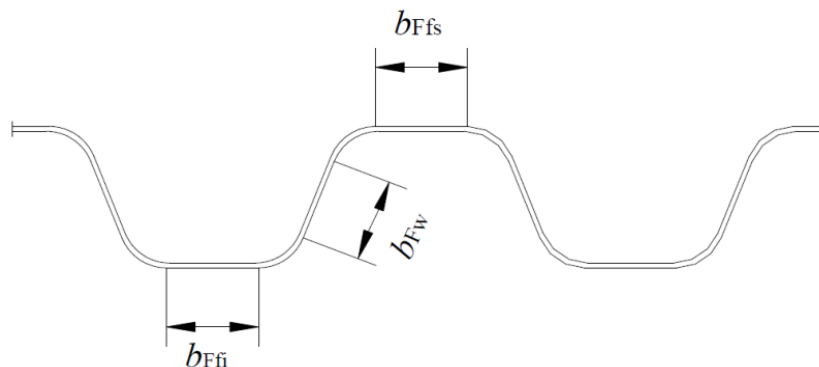
E – Módulo de elasticidade do aço

f_{yF} – resistência ao escoamento da fôrma de aço.

α – relação entre a largura da parte comprimida e a largura plana do elemento;

t_F – espessura da fôrma de aço

Figura 27 - largura plana dos elementos da fôrma



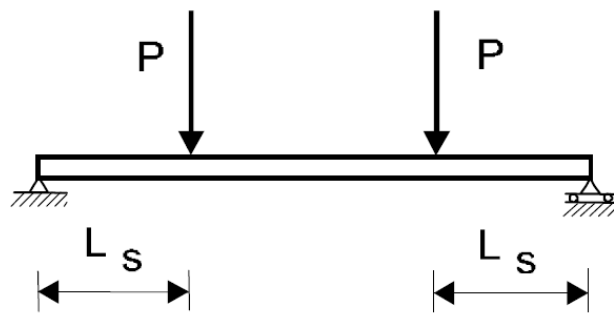
Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008, p.214)

3.4.2.2.2 Cisalhamento longitudinal

Segundo Simões ([20--], p.20) existem dois métodos para o cálculo da força cortante resistente de cálculo das lajes mistas: o método semi-empírico m-k e o método de interação parcial. Como a ABNT NBR 8800 (2008, p. 215) e o Eurocode4 (2004, p. 103) recomendam, neste trabalho será utilizado o método semi-empírico m-k.

De acordo com Sieg (2015, p.31) esse método está baseado em uma equação semi-empírica, que relaciona a resistência nominal ao esforço cortante, obtidos através de parâmetros de ensaio. O método é fundamentado na consideração de uma laje simplesmente apoiada submetida a duas forças concentradas, de mesma intensidade, a uma distância L_s dos apoios, conforme figura 28.

Figura 28 - Esquema de carregamento na laje mista para o método m-k

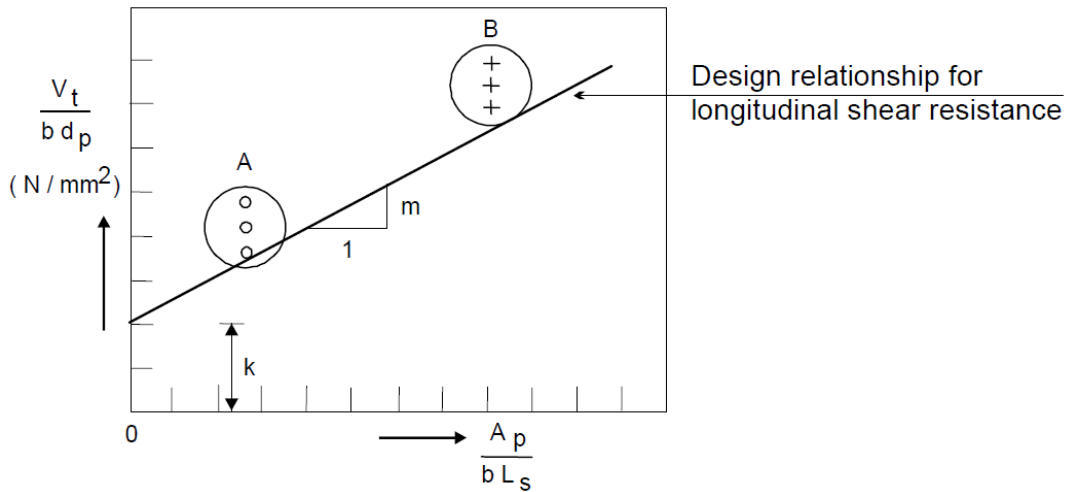


Fonte: (SIMÕES, [20--], p.22)

O método m-k gera um gráfico (ver figura 29) que apresenta uma reta determinada a partir dos resultados obtidos em seis modelos de lajes mistas testadas experimentalmente. Essa reta possui uma relação direta com a resistência ao corte longitudinal da laje mista, fornecendo os coeficientes m e k e m para o cálculo da força cortante resistente de cálculo $V_{L,Rd}$.

Na figura 30 o parâmetro $\frac{V_t}{b \cdot d_f}$ corresponde a um fator de tensão, que depende da força vertical V_t (incluindo o peso próprio da laje). O parâmetro $\frac{A_p}{b \cdot L_s}$ é um fator adimensional que representa uma relação entre a área da seção transversal e a área de corte longitudinal.

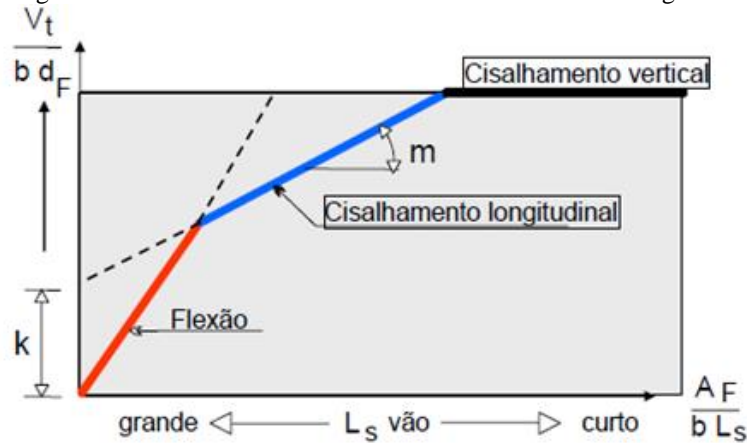
Figura 29 - Coeficientes m e k



Fonte: (SIMÕES, [20--], p.21)

Porém, Cotta (2009, p.46) diz que essa reta de cisalhamento longitudinal apresentada na figura 27 é válida somente em alguns limites, pois depende do vão e dos modos de falhas, que pode ser flexão, cisalhamento longitudinal e cisalhamento vertical. O gráfico 03 apresenta o intervalo em que a reta de cisalhamento longitudinal é válida.

Figura 30 - Intervalo de validade da reta de cisalhamento longitudinal



Fonte: (COTTA, 2009, p.46)

De acordo com a ABNT NBR 8800 (2008, p. 215) a força cortante resistente de cálculo $V_{l,Rd}$ de lajes com fôrma de aço incorporada, relativa a 1000 mm de largura pode ser calculada pela expressão abaixo:

$$V_{l,Rd} = \frac{b \cdot d_f \cdot \left[\left(\frac{m \cdot A_{f,ef}}{b \cdot L_s} \right) + k \right]}{\gamma_{sl}} \quad (3.36)$$

Em que:

b – largura unitária da laje, tomada igual a 1000 mm;

d_f – distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma, em mm;

m - inclinação da reta m-k- coeficiente fornecido no anexo L;

k – ordenada na origem - coeficiente fornecido no anexo L;

$A_{f,ef}$ – área da seção efetiva da fôrma (correspondente a 1000 mm);

$L_s = \frac{L_f}{4}$ -vão de cisalhamento para ações uniformemente distribuídas, em mm;

L_f - vão teórico da laje na direção das nervuras;

$\gamma_{sl} = 1,25$ – Coeficiente de ponderação da resistência.

3.4.2.2.3 Cisalhamento vertical

Quanto ao cisalhamento vertical, a ABNT NBR 8800 (2008, p.216) determina a que a força cortante vertical resistente de cálculo $V_{V,Rd}$, relativa a 1000 mm, deva se expressa pela seguinte expressão:

$$V_{V,Rd} = V_{V,F,Rd} + V_{V,C,Rd} \leq V_{m\acute{a}x} \quad (3.37)$$

$$V_{V,C,Rd} = \frac{1000 \cdot \tau_{Rd} \cdot k_v \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho) \cdot A_v}{b_n} \quad (3.38)$$

Em que:

$V_{V,F,Rd}$ – força cortante resistente de cálculo da fôrma de aço, relativa a 1000 mm de largura;

$V_{V,C,Rd}$ – força cortante resistente de cálculo do concreto, relativa a 1000 mm de largura;

$$\tau_{Rd} = \frac{0,25 \cdot \eta \cdot f_{ctk,inf}}{1,4};$$

$f_{ctk,inf} = 0,21 \cdot f_{ck}^{2/3}$ – resistência à tração direta característica inferior do concreto;

$$\eta = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\rho_c}{2400};$$

ρ_c - massa específica do concreto, não podendo ser tomado valor superior a 2400 kg/m³;

$$\rho = \frac{A_s}{A_v} \leq 0,02;$$

A_s - área da armadura longitudinal referente à A_v ;

A_v - área resistente de concreto (área hachurada na figura 29);

b_n - largura entre duas nervuras consecutivas;

$$k_v = \begin{cases} \left(1,6 - \frac{d}{1000}\right) \geq 1 & \text{-- caso haja armadura longitudinal de tração que não se} \\ & \text{extenda a } d + l_{b,nec} \text{ além da seção considerada;} \\ 1,00 & \text{-- para os demais casos;} \end{cases}$$

d - distância da face superior da laje de concreto ao centro da armadura longitudinal de tração;

$l_{b,nec}$ - comprimento de ancoragem necessário;

$V_{máx}$ - limite da força cortante, relativo a 1000 mm de largura.

O limite da força cortante, segundo a ABNT NBR 8800 (2008, p. 217), relativo a 1000 mm de largura é expresso por:

$$V_{máx} = \frac{1000 \cdot 0,285 \cdot (f_{ck})^{1/2} \cdot A_v}{b_n} \quad (3.39)$$

Em que:

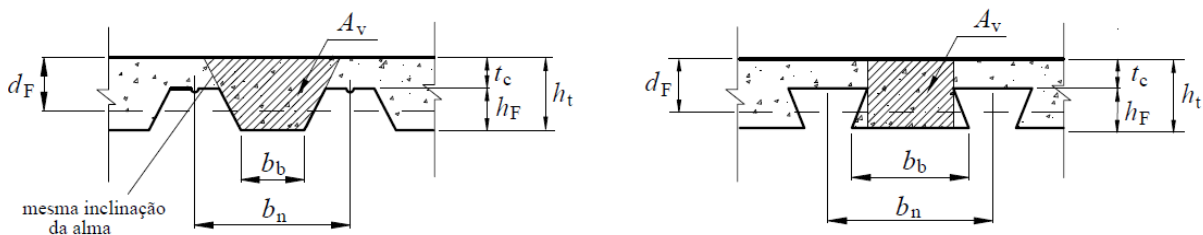
f_{ck} - resistência do concreto à compressão;

A_v - área resistente de concreto (área hachurada na figura 29);

b_n - largura entre duas nervuras consecutivas;

A figura 31 apresenta as dimensões da fôrma de aço e da laje de concreto.

Figura 31 - Dimensões da fôrma de aço e da laje de concreto

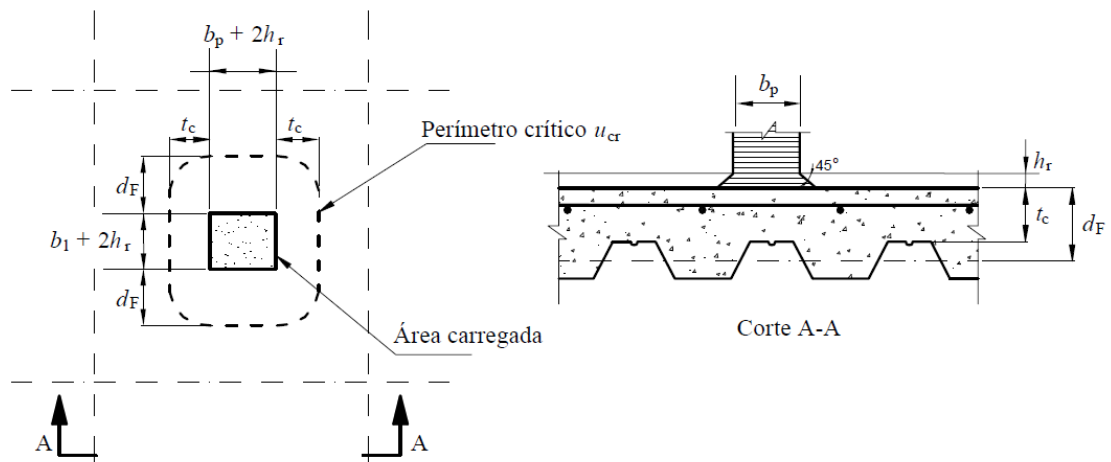


Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008, p. 215)

3.4.2.2.4 Punção

Segundo Fabrizzi (2007, p.200) a punção só é crítica em caso de lajes pouco espessas e submetidas a ações concentradas. A verificação para esse estado limite é feita de maneira análoga à de lajes maciças: a partir da seção de aplicação da ação, com um ângulo de 45° é determinado um perímetro crítico, conforme figura 32.

Figura 32 - Perímetro crítico para a punção



Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008, p. 218)

A ABNT NBR 8800 (2008, p. 217) diz que a força cortante resistente de cálculo à punção $V_{Rd,p}$, provocada por uma ação concentrada, pode ser determinada pela expressão abaixo:

$$V_{Rd,p} = u_{cr} \cdot d_1 \cdot \tau_{Rd} \quad (3.40)$$

$$d_1 = \frac{d_f + t_c}{2} \quad (3.41)$$

$$\tau_{Rd} = 0,13 \cdot k_p \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck} \geq 0,30 \cdot f_{ctd}) \quad (3.42)$$

Em que:

u_{cr} – perímetro crítico, em mm, conforme a figura 30;

d_f – distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma;

t_c – altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

$$k_p = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_1}} \leq 2,0;$$

$$\rho = \sqrt{\rho_f \cdot \rho_s} \leq 0,02;$$

$$\rho_f = \frac{A_f + A_{sl}}{d_F \cdot (b_p + 2 \cdot h_r + 3 \cdot d_F)} - \text{taxa de armadura na direção longitudinal};$$

A_f – área da seção da fôrma de aço, referente à largura ($b_p + 2 \cdot h_r + 3 \cdot d_F$);

A_{sl} – área da armadura longitudinal, referente à largura ($b_p + 2 \cdot h_r + 3 \cdot d_F$);

b_p - conforme figura 30;

h_r – altura do revestimento da laje;

ρ_s – taxa de armadura na direção transversal;

f_{ck} - resistência do concreto à compressão;

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} \text{ Resistência de cálculo do concreto à compressão.}$$

3.4.2.3 Estado-limite de serviço

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014, p.55) os estados-limites de serviço são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas.

3.4.2.3.1 Fissuração do concreto

De acordo com a ABNT NBR 8800 (2008, p. 219) para lajes calculadas como simplesmente apoiadas, deve-se colocar armadura para combater os efeitos de retração e de temperatura com área não menor que 0,1 % da área de concreto acima da face superior da fôrma. Essa armadura deve ser colocada preferencialmente a 20 mm abaixo do topo da laje.

Para lajes contínuas o estado limite de fissuração do concreto em regiões de momento negativo deve ser verificado de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), pois, segundo Queiroz et al (2012, p.59) essa armadura pode não ser suficiente para controlar a fissuração nos apoios intermediários.

Normalmente, os fabricantes das fôrmas de aço estabelecem as armaduras de retração necessárias, em telas soldadas, conforme tabela 03 do anexo J, de acordo com a espessura da laje adotada.

3.4.2.3.2 Deslocamento vertical

A flecha máxima, segundo a ABNT NBR 8800 (2008, p. 219), considerando apenas o efeito das ações variáveis, não pode ser maior que:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5 \cdot p \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_{ef}} \leq \frac{L_F}{350} \quad (3.43)$$

Em que:

L_F - vão teórico da laje na direção das nervuras;

p - ação variável uniformemente distribuída;

L - vão entre apoios;

E_a - módulo de elasticidade longitudinal do aço;

I_{ef} - momento de inércia efetiva da fôrma.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho será apresentado em duas etapas: TCC1 e TCC2.

A primeira etapa (TCC1) teve como objetivo principal a aquisição de conhecimento teórico a respeito do assunto abordado, através do estudo das normas regulamentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, basicamente a ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 8800:2008, além de pesquisas bibliográficas em livros, artigos científicos e teses de mestrado e doutorado que forneceram os subsídios teóricos necessários para a fundamentação do estudo.

A segunda etapa (TCC2) consistirá efetivamente no estudo comparativo, através de indicadores de consumo de materiais, determinação das reações de apoio e carga nos pilares, do projeto de um pavimento comercial composto por lajes mistas *Steel Deck* e lajes maciças de concreto armado.

4.1 Características gerais do estudo comparativo

Para o estudo de caso será realizado o dimensionamento de um pavimento nas duas situações abordadas neste trabalho, primeiro com laje maciça e depois com laje mista *Steel Deck*, para que seja possível comparar as influências que o emprego de um ou de outro tipo de pavimento podem provocar na estrutura do edifício como um todo.

4.1.1 Parâmetros de Dimensionamento

O dimensionamento para as lajes maciças será feito conforme metodologia de cálculo exposta no referencial bibliográfico deste trabalho, no item 3.3, tomando como base as prescrições da ABNT NBR 6118:2014. Para as lajes mistas *Steel Deck*, a metodologia de cálculo seguirá o procedimento descrito no item 3.4 deste trabalho, em concordância com a ABNT NBR 8800:2008.

A partir desse dimensionamento serão formulados indicadores de consumo de material para as duas situações e estimativa de custos, o que permitirá estabelecer parâmetros reais para a definição de qual a melhor solução construtiva para o projeto do edifício comercial.

4.1.2 Indicadores de consumo de material

Os indicadores de consumo de material que serão adotados como parâmetros de comparação no estudo de caso serão os seguintes:

- a) número de lajes do pavimento;
- b) área de fôrma;
- c) volume de concreto (m³);
- d) peso de aço (kg);
- e) consumo de concreto por metro quadrado (m³/m²);

$$C_{conc} = \frac{\text{Volume concreto (m}^3\text{)}}{\text{Área total de laje (m}^2\text{)}} \quad (4.1)$$

- f) consumo de aço por metro quadrado (kg/m²);

$$C_{aço} = \frac{\text{Peso da armadura (kg)}}{\text{Área total de laje (m}^2\text{)}} \quad (4.2)$$

- g) taxa de armadura (kg/m³);

$$TA = \frac{\text{Consumo de aço (kg)}}{\text{Consumo de concreto (m}^3\text{)}} \quad (4.3)$$

4.2 Características gerais do edifício comercial

4.2.1 Projeto arquitetônico

A edificação escolhida para ser analisada neste trabalho trata-se de um projeto comercial com 4 pavimentos mais o térreo, possuindo área total de 2013,42m². Cada pavimento tipo, com 306,56 m², é composto por 3 salas comerciais, com áreas de 50,72 m², 83,10 m² e 93,26 m²; hall, de 14,35 m² e banheiros, com 8,80 m². A planta baixa do pavimento tipo está apresentada na figura 33.

4.2.2 Ação de utilização

Conforme já descrito no tópico 3.2.1 deste trabalho, as ações de utilização dependem da finalidade do ambiente arquitetônico que ocupa a região da laje em estudo.

Para a edificação comercial apresentada, será adotado o valor de 2 kN/m², que corresponde ao valor da ação para escritórios, salas de uso geral e banheiro, determinado pela ABNT NBR 6120 (1980, p.3-4) na tabela 01 do anexo C deste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o estudo dos métodos de cálculo das lajes maciças e das lajes mistas e a definição das rotinas de cálculo de cada uma, foi possível aplica-las ao dimensionamento do pavimento da edificação em estudo. Conforme apresentado na seção 4.2 deste trabalho o mesmo é composto por 3 salas comerciais por pavimento e pé direito de 3,40 m.

5.1 Dimensionamento do pavimento com laje maciça

O primeiro dimensionamento a ser analisado é o do pavimento da edificação sendo composto por lajes maciças. O primeiro passo é a definição da planta de fôrma, conforme figura 34, indicando a posição dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares) bem como a dimensão inicial de cada um. Vale ressaltar que essas dimensões sofrerão ajustes após o cálculo da estrutura, de modo a cumprir todas as verificações de resistência.

Com a planta de fôrma definida foi possível dar início ao dimensionamento das nove lajes que constituem o pavimento em análise.

A primeira etapa do dimensionamento é a verificação da flecha elástica que deve ser menor que $l/250$. Para isso foi utilizada a equação (3.10), exposta no item 3.3.2.1. Nessa verificação todas as nove lajes passaram com espessura de 10 cm, conforme apresentado na tabela 1.

$$P_{total} = g_1 + g_2 + q = (0,1 * 25) + 1,06 + 2,00 = 5,56 \text{ kN/m}^2$$

$$E_{ci} = \alpha_e . 5600 \sqrt{f_{ck}} = 1 . 5600 \sqrt{25} = 28000 \text{ MPa}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{25}{80} = 0,8625$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = 0,8625 \cdot 28000 = 24150 \text{ MPa}$$

$$f = \frac{\alpha}{100} \frac{P \cdot l_x^4}{E_{cs} \cdot h^3} = \frac{4,53}{100} \cdot \frac{5,56 \cdot 10^{-4} \cdot 512^4}{24150 \cdot 10^3} = 0,72 \text{ cm}$$

$$f_{limite} = \frac{l_x}{250} = \frac{512}{250} = 2,05 \text{ cm}$$

Como $f = 0,72 \text{ cm} < f_{limite} = 2,05 \text{ cm}$, a verificação está cumprida.

Tabela 1 - Verificação da flecha elástica

Localização	Caso de vinculação	Vão da Laje		Rel.Vãos λ (l_y/l_x)	α Centro Laje	Flecha (cm) Centro Laje	Flecha Limite (cm) (1/250)	Verificação
		l_x (m)	l_y (m)					
L1	Caso 4	5,12	7,67	1,50	4,53	0,72	2,05	Ok!
L2	Caso 8	5,13	7,67	1,50	2,53	0,40	2,05	Ok!
L3	Caso 8	5,76	7,67	1,33	2,48	0,63	2,30	Ok!
L4	Caso 3	5,76	7,67	1,33	4,50	1,14	2,30	Ok!
L5	Caso 4	3,83	6,35	1,66	4,77	0,24	1,53	Ok!
L6	Caso 8	3,84	6,35	1,65	2,78	0,14	1,54	Ok!
L7	Caso 8	4,50	6,00	1,33	2,48	0,34	1,80	Ok!
L8	Caso 8	1,85	5,25	2,84	3,07	0,01	0,74	Ok!
L9	Caso 3	1,53	4,30	2,81	6,38	0,01	0,61	Ok!

Fonte: a autora

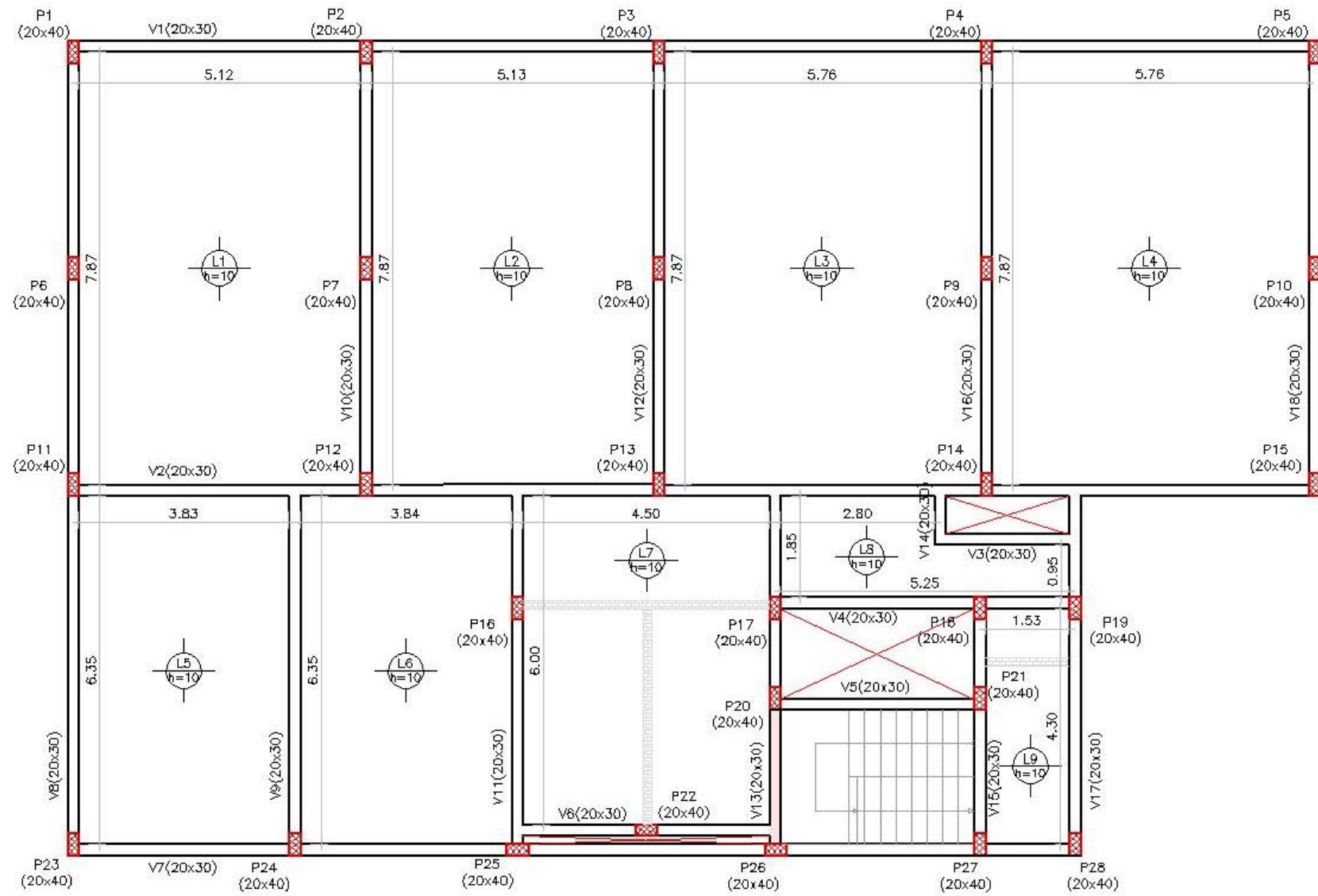
Após a verificação da flecha elástica foi feito o cálculo da área de aço, através da determinação dos momentos atuantes. Nessa etapa, as lajes L1, L2, L3, L4 e L7 geraram um k_x maior que o $k_{x-limite}$, o que fez com que a espessura destas fossem aumentadas, conforme apresenta a tabela 2.

Tabela 2 – Verificação do $k_{x-limite}$ e determinação da altura final das lajes maciças

Localização	h inicial (cm)	K_x inicial (maior valor)	Verificação inicial	h final (cm)	K_x final (maior valor)	Verificação Final
L1	10	0,702	$k_x > k_{x-limite} = 0,45$	12	0,362	Ok!
L2	10	0,464	$k_x > k_{x-limite} = 0,45$	12	0,259	Ok!
L3	10	0,598	$k_x > k_{x-limite} = 0,45$	12	0,320	Ok!
L4	10	0,943	$k_x > k_{x-limite} = 0,45$	13	0,376	Ok!
L5	10	0,337	Ok!	10	0,337	Ok!
L6	10	0,238	Ok!	10	0,238	Ok!
L7	10	0,500	$k_x > k_{x-limite} = 0,45$	12	0,268	Ok!
L8	10	0,052	Ok!	10	0,052	Ok!
L9	10	0,075	Ok!	10	0,075	Ok!

Fonte: a autora

Figura 34 - Planta de fôrma inicial da laje maciça



Fonte: a autora

Após a alteração da espessura das lajes, o cálculo da área de aço necessária foi feito, gerando como resultados os valores apresentados resumidamente na tabela 3. No apêndice A deste trabalho é possível encontrar esta mesma planilha detalhada.

. Para o cálculo dos momentos foram utilizadas as equações 3.11 a 3.14, que podem ser encontradas no item 3.3.2.2 e para a determinação das armaduras longitudinais foi utilizada a equação 3.15, conforme item 3.3.3.2.

$$m_x = \mu_x \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} = 4,93 \cdot \frac{6,06 \cdot 5,12^2}{100} = 7,83 \text{ kN.m/m} = 783,18 \text{ kN.cm/m}$$

$$m_x' = \mu_x' \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} = 10,82 \cdot \frac{6,06 \cdot 5,12^2}{100} = 17,18 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} = 1718,86 \text{ kN.cm/m}$$

$$m_y = \mu_y \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} = 2,38 \cdot \frac{6,06 \cdot 5,12^2}{100} = 3,78 \text{ kN.m/m} = 378,09 \text{ kN.cm/m}$$

$$m_y' = \mu_y' \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} = 8,09 \cdot \frac{6,06 \cdot 5,12^2}{100} = 12,85 \text{ kN.m/m} = 1285,17 \text{ kN.cm/m}$$

$$kmd_{mx} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1,4 \cdot 783,18}{100 \cdot (12 - 4)^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,096 \rightarrow \begin{cases} k_x = 0,150 - ok \\ k_z = 0,940 \end{cases}$$

$$kmd_{mx'} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1,4 \cdot 1718,86}{100 \cdot (12 - 4)^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,211 \rightarrow \begin{cases} k_x = 0,362 - ok \\ k_z = 0,855 \end{cases}$$

$$kmd_{my} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1,4 \cdot 378,09}{100 \cdot (12 - 4)^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,046 \rightarrow \begin{cases} k_x = 0,070 - ok \\ k_z = 0,972 \end{cases}$$

$$kmd_{my'} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1,4 \cdot 1285,17}{100 \cdot (12 - 4)^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,157 \rightarrow \begin{cases} k_x = 0,258 - ok! \\ k_z = 0,897 \end{cases}$$

$$A_{s,mx} = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{1,4 \cdot 783,18}{0,940 \cdot (12 - 4) \cdot 50/1,15} = 3,35 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{s,mx'} = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{1,4 \cdot 1718,86}{0,855 \cdot (12 - 4) \cdot 50/1,15} = 8,09 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{s,my} = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{1,4 \cdot 378,09}{0,972 \cdot (12 - 4) \cdot 50/1,15} = 1,57 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{s,my'} = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{1,4 \cdot 1285,17}{0,897 \cdot (12 - 4) \cdot 50/1,15} = 5,77 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{s,mínima} = 0,67 \cdot 0,15 \cdot h = 0,67 \cdot 0,15 \cdot 12 = 1,21 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$A_{s,mínima}' = 0,15 \cdot h = 0,15 \cdot 12 = 1,80 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$A_{s,mx} = 3,35 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \rightarrow \text{Ø}10,0 \text{ mm c/ 20}$$

$$A_{s,my} = 1,57 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \rightarrow \text{Ø}6,3 \text{ mm c/ 20}$$

$$A'_{s,mx} = 8,09 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \rightarrow \text{Ø}10,0 \text{ mm c/ 10}$$

$$A_{s,my}' = 5,77 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \rightarrow \text{Ø}10 \text{ mm c/ 14}$$

Tabela 3 - Determinação da área de aço e armadura adotada

Localização		A _{s-calc} (cm ² /m)	Armadura adotada
L1	M _x	3,35	Ø 10,0 mm c/ 20,0
	M _{x'}	8,09	Ø 10,0 mm c/ 10,0
	M _y	1,57	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	M _{y'}	5,77	Ø 10,0 mm c/ 14
L2	M _x	2,33	Ø 8,0 mm c/ 20,0
	M _{x'}	5,78	Ø 10,0 mm c/ 14,0
	M _y	0,96	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	M _{y'}	3,93	Ø 10,0 mm c/ 20,0
L3	M _x	3,04	Ø 10,0 mm c/ 20,0
	M _{x'}	7,15	Ø 10,0 mm c/ 11,0
	M _y	1,43	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	M _{y'}	5,12	Ø 10,0 mm c/ 16,0

Fonte: a autora

Tabela 3 - Determinação da área de aço e armadura adotada (continuação...)

Localização		$A_{s,calc}$ (cm^2/m)	Armadura adotada
L4	M_x	4,31	Ø 10,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	9,44	Ø 10,0 mm c/ 8,0
	M_y	1,80	Ø 8,0 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	x-x-x	Ø 6,3 mm c/ 20,0
L5	M_x	2,40	Ø 8,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	5,65	Ø 10,0 mm c/ 14,0
	M_y	1,00	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	0,96	Ø 10,0 mm c/ 20,0
L6	M_x	1,81	Ø 8,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	3,99	Ø 10,0 mm c/ 19,0
	M_y	0,61	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	2,64	Ø 10,0 mm c/ 20,0
L7	M_x	2,69	Ø 10,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	5,98	Ø 10,0 mm c/ 13,0
	M_y	1,22	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	4,32	Ø 10,0 mm c/ 19,0
L8	M_x	0,43	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	0,87	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	M_y	0,11	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	0,58	Ø 6,3 mm c/ 20,0
L9	M_x	0,74	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,26	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	M_y	0,14	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	x-x-x	Ø 6,3 mm c/ 20,0

Fonte: a autora

Também foi feita a verificação da necessidade de armadura de cisalhamento, conforme tabela 4 e da compressão diagonal do concreto, conforme tabela 5.

Para a verificação do cisalhamento foram utilizadas as equações 3.16 e 3.17 do item 3.3.3.2 e para a verificação da compressão diagonal do concreto (V_{Rd2}) foram utilizadas as equações 3.18 e 3.19 do item 3.3.3.2.

Todas as lajes passaram nessas duas etapas de verificação sem a necessidade de armadura de cisalhamento.

$$f_{ctd} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{25^2} = 1,795 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctd} = 0,25 \cdot 1,795 = 4,49 \text{ MPa } 0,045 \text{ kN/cm}^2$$

$$k = (1,6 - d) = (1,6 - 0,08) = 1,52 \geq 1$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{3,35}{100 \cdot 8} = 0,004192 \leq 0,02$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} = 0$$

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{Rd1} = [0,045 \cdot 1,52 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,004192) + 0,15 \cdot 0] \cdot 100 \cdot 8 = 74,65 \text{ kN/m}$$

Como $V_{sd} = 1,4 \cdot 13,44 = 18,82 \text{ kN/m} \leq V_{Rd1} = 74,65 \text{ kN/m}$, não há necessidade de armadura de cisalhamento.

Tabela 4 - Verificação da necessidade de armadura de cisalhamento

Localização	V_{sd} (kN/m)	f_{ctd} (MPa)	τ_{Rd} (kN/cm ²)	k	ρ_1	σ_{cp}	V_{Rd1} (kN/m)	Verificação
L1	13,44	1,795	0,045	1,52	0,004192	0,00	74,65	Ok!
L2	11,73	1,795	0,045	1,52	0,002914	0,00	71,86	Ok!
L3	12,46	1,795	0,045	1,52	0,003798	0,00	73,79	Ok!
L4	15,62	1,795	0,045	1,51	0,004789	0,00	84,89	Ok!
L5	9,54	1,795	0,045	1,54	0,003993	0,00	56,39	Ok!
L6	8,24	1,795	0,045	1,54	0,003020	0,00	54,78	Ok!
L7	13,63	1,795	0,045	1,52	0,003366	0,00	72,85	Ok!
L8	5,28	1,795	0,045	1,54	0,001675	0,00	52,55	Ok!
L9	7,93	1,795	0,045	1,54	0,001675	0,00	52,55	Ok!

Fonte: a autora

$$\alpha_{v2} = \left(1,0 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = \left(1,0 - \frac{25}{250}\right) = 0,90$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d = 0,27 \cdot 0,90 \cdot \frac{2,5}{1,4} \cdot 100 \cdot 8 = 347,14 \text{ kN}$$

Como $V_{sd} = 26,46 \text{ kN/m} \leq V_{Rd1} = 347,14 \text{ kN/m}$ não há problemas com a compressão diagonal do concreto.

Tabela 5 - Verificação da compressão diagonal do concreto

Localização	V_{sd} (kN/m)	α_{v2} (MPa)	V_{Rd2} (kN/m)	Verificação
L1	19,40	0,90	347,14	Ok!
L2	15,50	0,90	347,14	Ok!
L3	17,50	0,90	347,14	Ok!
L4	18,20	0,90	390,54	Ok!
L5	13,30	0,90	260,36	Ok!
L6	10,70	0,90	260,36	Ok!
L7	19,10	0,90	347,14	Ok!
L8	6,40	0,90	260,36	Ok!
L9	5,80	0,90	260,36	Ok!

Fonte: autora

Após o dimensionamento e o cumprimento de todas as verificações impostas por norma, foi realizado o detalhamento das armaduras de todas as lajes. Para isso foram adotado alguns parâmetros, em concordância com o item 20 da ABNT NBR 6118 (2014, p. 169), descritos abaixo:

a) diâmetro máximo das barras:

$$\phi_{m\acute{a}x} = \frac{h}{8} = \frac{10}{8} = 1,25 \text{ cm}$$

b) armadura principal:

- As barras serão colocadas em todo o vão da laje;
- As barras penetrarão nos apoios 6 cm ou 10ϕ .

$$S \leq \begin{cases} 2 \cdot h = 2 \cdot 10 = 20 \text{ cm} \\ 20 \text{ cm} \end{cases}$$

c) Armadura de distribuição:

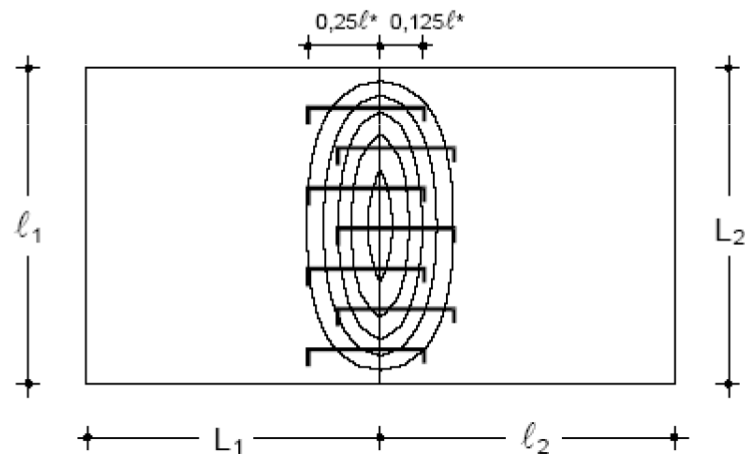
$$\frac{A_s}{S} \geq \begin{cases} 20\% \text{ da armadura principal} \\ 0,5 \cdot \rho_{min} \\ 0,9 \text{ cm}^2/\text{m} \end{cases}$$

$$S_{m\acute{a}x} = 33 \text{ cm}$$

d) Armadura negativa:

- Nas lajes adjacentes será considerada a armadura referente ao maior momento;
- Todas as lajes serão consideradas isoladas e armadura se estenderá no interior da laje conforme a figura 35.

Figura 35 - Extensão da armadura negativa

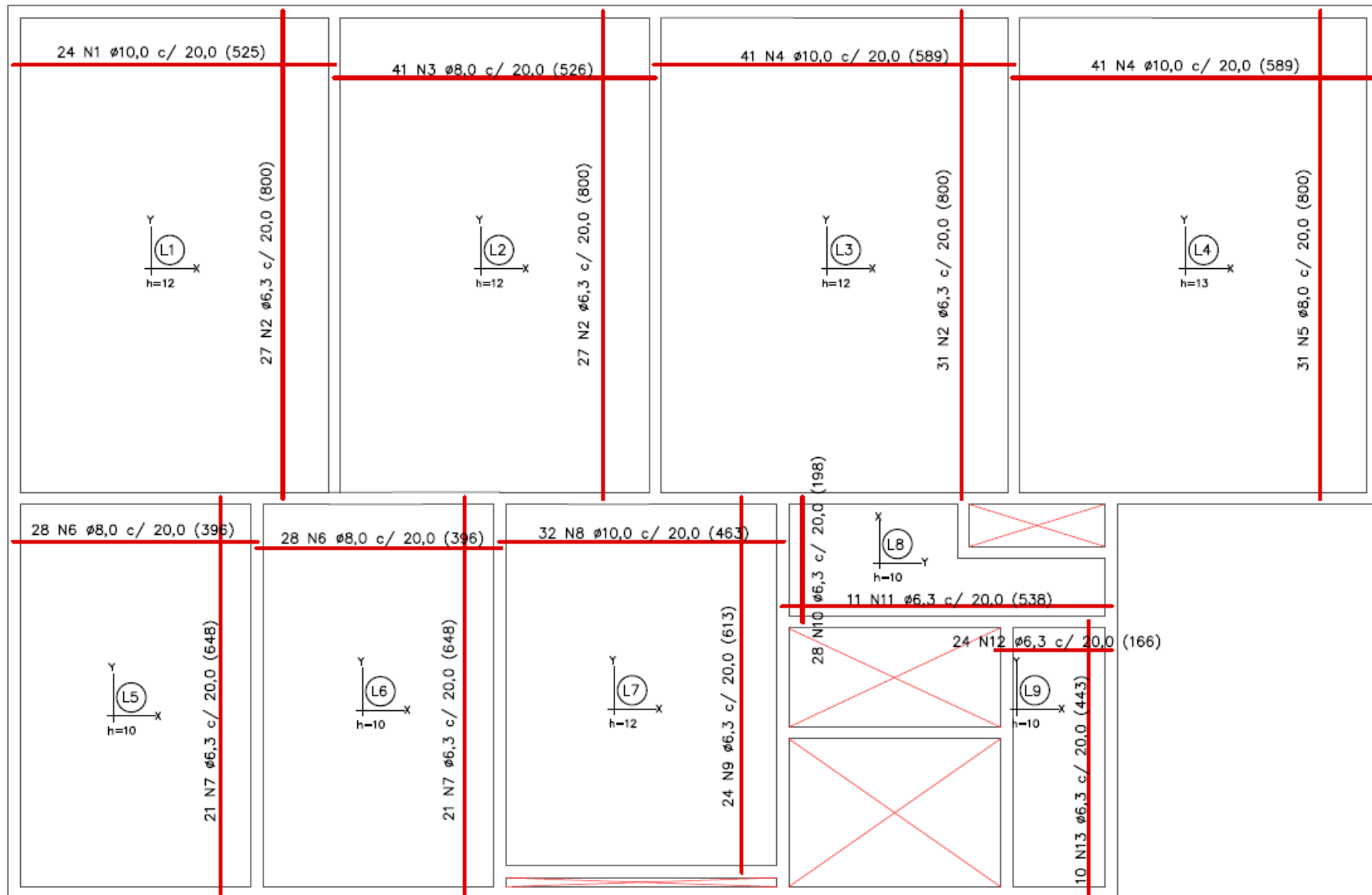


Fonte: (FARIA, 2015, p.19)

- Em relação ao comprimento de ancoragem será adotado $10 \cdot \emptyset$ para o trecho reto do gancho executado nas extremidades das armaduras negativas.

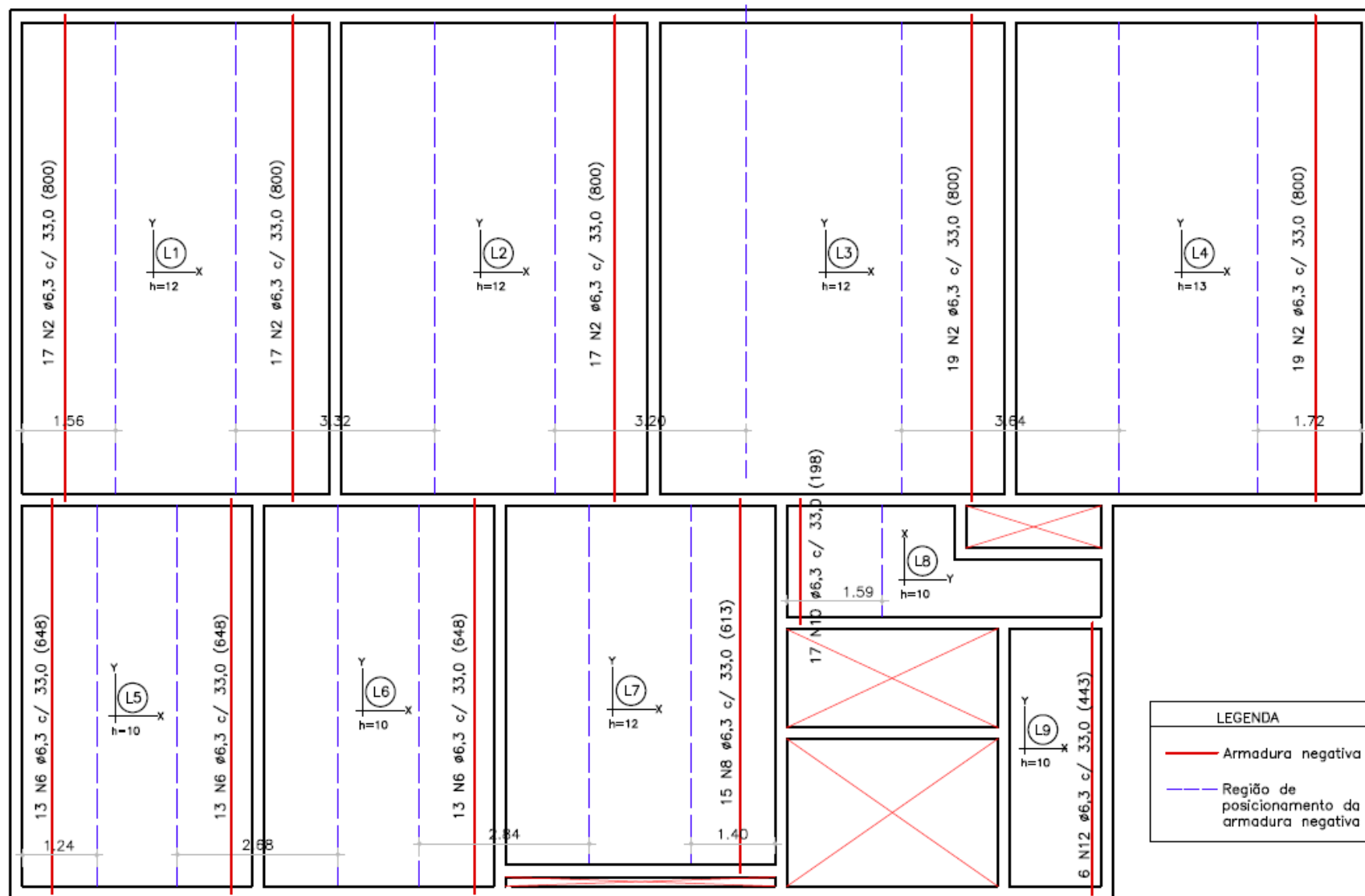
Os detalhamentos finais das armaduras das lajes do pavimento em análise estão apresentados nas figuras, a seguir:

Figura 36 - Detalhamento armadura inferior - laje maciça



Fonte: a autora

Figura 38 - Detalhamento armadura longitudinal de distribuição - laje maciça



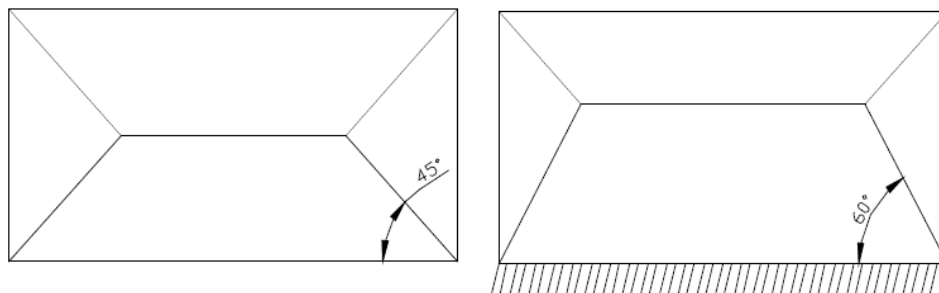
Fonte: a autora

Para o cálculo dessas reações de apoio das lajes sobre as vigas, a ABNT NBR (2014, p. 96) recomenda as seguintes aproximações:

- a) As reações de apoio são correspondentes às cargas atuantes nos triângulos ou trapézios determinados através das charneiras plásticas correspondentes à análise efetivada com os critérios da análise plástica³, sendo que essas reações podem ser, de maneira aproximada, consideradas uniformemente distribuídas sobre os elementos estruturais que lhe servem de apoio.
- b) Quando a análise plástica não for efetuada, as charneiras podem ser aproximadas por retas inclinadas, a partir dos vértices, com os seguintes ângulos:
 - 45° entre dois apoios do mesmo tipo;
 - 60° a partir do apoio considerado engastado, se o outro for considerado simplesmente apoiado;
 - 90° a partir do apoio quando a borda vizinha for livre.

Segundo Carvalho (2014, p.342) como consequência do que a norma recomenda, a laje ficará dividida em regiões, conforme mostra a figura 40, e cada uma dessas regiões carregará a viga correspondente de acordo com sua área de influência.

Figura 40 - Regiões da laje para o cálculo das reações nas vigas



Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 342)

Dessa forma, Carvalho (2014, p.343-344) apresenta algumas equações para a determinação das reações nas vigas:

³ Análise plástica: é feita para a verificação de estados limites última com a simulação de rótulas plásticas localizadas nas seções críticas. (ABNT NBR 6118, 2014, p.92)

a) Reações nas direções x e y nas vigas em bordas simplesmente apoiadas:

$$q_x = k_x \cdot p \cdot \frac{l_x}{10} \quad (5.1)$$

$$q_y = k_y \cdot p \cdot \frac{l_x}{10} \quad (5.2)$$

Em que:

k_x - Coeficiente que pode ser encontrado nas tabelas 01 do anexo H

k_y - Coeficiente que pode ser encontrado nas tabelas 01 do anexo H

p - Carregamento uniforme da laje

l_x - menor dimensão superficial da laje

b) Reações nas direções x e y nas vigas em bordas engastadas:

$$q_x' = k_x' \cdot p \cdot \frac{l_x}{10} \quad (5.3)$$

$$q_y' = k_y' \cdot p \cdot \frac{l_x}{10} \quad (5.4)$$

Em que:

k_x' - Coeficiente que pode ser encontrado nas tabelas 01, 02 e 03 do anexo H

k_y' - Coeficiente que pode ser encontrado nas tabelas 01, 02 e 03 do anexo H

p - Carregamento uniforme da laje

l_x - menor dimensão superficial da laje

Dessa forma foi feito o cálculo das reações de apoio das lajes sobre as viga, sendo os resultados apresentados na tabela 6. Na figura 01 do apêndice A é possível encontrar uma planta baixa com a posição de cada uma dessas reações.

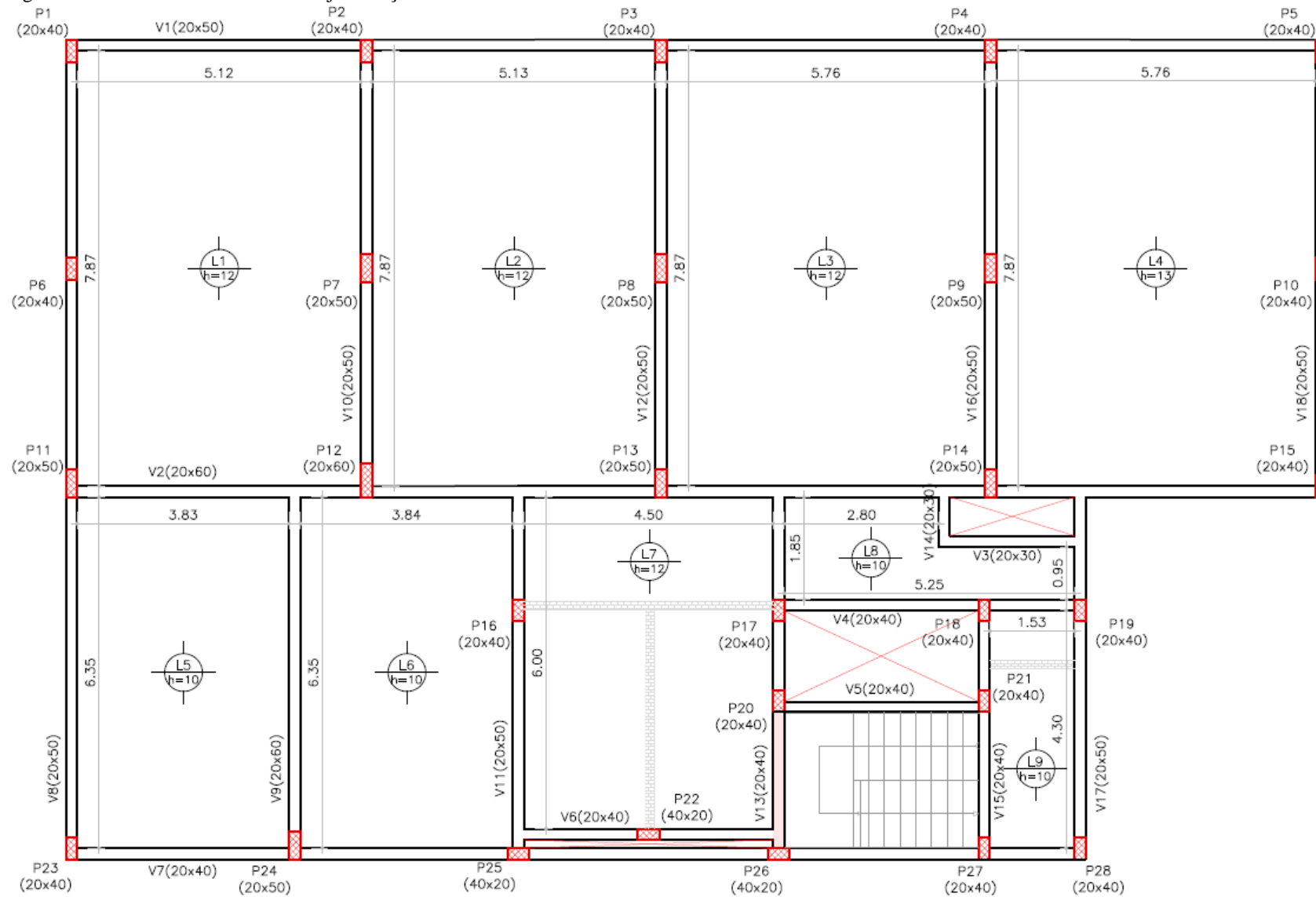
Tabela 6 - Reações de apoio das lajes sobre as vigas

Localização		Caso de Vinculação	Rel.Vãos $\lambda (l_y/l_x)$	k	Reação de apoio (kN/m)
L1	q_x	Caso 4	1,50	2,24	6,95
	$q_{x'}$			4,29	13,31
	q_y			1,83	5,68
	$q_{y'}$			3,17	9,84
L2	q_x	Caso 8	1,50	0,00	0,00
	$q_{x'}$			3,73	11,60
	q_y			1,44	4,48
	$q_{y'}$			2,50	7,77
L3	q_x	Caso 8	1,33	0,00	0,00
	$q_{x'}$			3,54	12,36
	q_y			1,44	5,03
	$q_{y'}$			2,50	8,73
L4	q_x	Caso 3	1,33	2,67	9,70
	$q_{x'}$			4,26	15,48
	q_y			1,83	6,65
	$q_{y'}$			0,00	0,00
L5	q_x	Caso 4	1,66	2,55	5,43
	$q_{x'}$			4,42	9,41
	q_y			1,83	3,90
	$q_{y'}$			3,17	6,75
L6	q_x	Caso 8	1,65	0,00	0,00
	$q_{x'}$			3,81	8,13
	q_y			1,44	3,07
	$q_{y'}$			2,50	5,34
L7	q_x	Caso 8	1,33	0,00	0,00
	$q_{x'}$			3,54	13,55
	q_y			1,44	5,51
	$q_{y'}$			2,50	9,57
L8	q_x	Caso 8	2,84	0,00	0,00
	$q_{x'}$			5,00	5,14
	q_y			1,44	1,48
	$q_{y'}$			2,50	2,57
L9	q_x	Caso 3	2,81	3,66	4,25
	$q_{x'}$			6,25	7,25
	q_y			1,83	2,12
	$q_{y'}$			0,00	0,00

Fonte: a autora

Por fim, a planta de fôrma inicial foi atualizada com as dimensões finais das lajes. Para se obter de maneira simplificada as dimensões das vigas e pilares que compõe o pavimento em análise, foi realizado o cálculo estrutural desses elementos através do software CYPECAD. O resultado final está apresentado na figura 41.

Figura 41 – Planta de fôrma final da laje maciça



Fonte: a autora

5.2 Dimensionamento da laje mista “Steel Deck”

Assim como na laje maciça, o primeiro passo para o dimensionamento da laje mista “Steel Deck” foi a elaboração da planta de fôrma com base no projeto arquitetônico, definindo os limites de cada laje e seus respectivos apoios, conforme apresentado na figura 43.

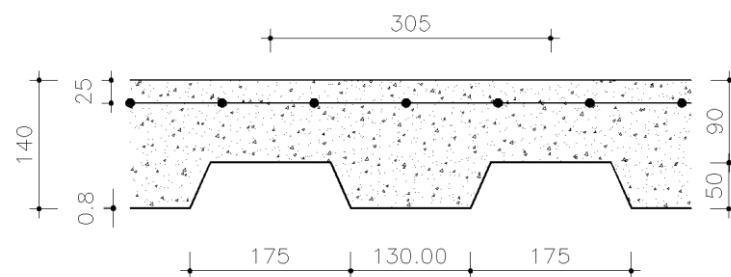
Diferentemente das lajes maciças, que trabalham nas duas direções e consequentemente distribuem seu carregamento para todas as vigas que as contornam, as lajes mistas “Steel Deck” trabalham em apenas uma direção, distribuindo seu carregamento apenas para as duas vigas no sentido de sua maior dimensão.

Por esse motivo, para o pavimento tipo em análise foi delimitado um número maior de lajes, de forma a distribuir melhor os esforços, principalmente as reações das lajes nas vigas, já que muitas vigas terão um vão livre relativamente grande, o que por si só gera vigas com seção transversal grande.

Outro ponto que deve ser observado é a espessura mínima da laje mista “Steel Deck”. O fabricante recomenda que a altura total da laje seja maior igual a 140 mm. (METFORM,[20--], p.6) e a NBR 8800 (2008, p.220) determina uma espessura mínima de 50 mm de concreto sobre a fôrma.

O pré-dimensionamento da laje mista “Steel Deck” começa com a escolha da fôrma de aço. Inicialmente foi adotada a fôrma MF-50 com espessura de 0,8 mm, conforme a figura 42, para todas as lajes.

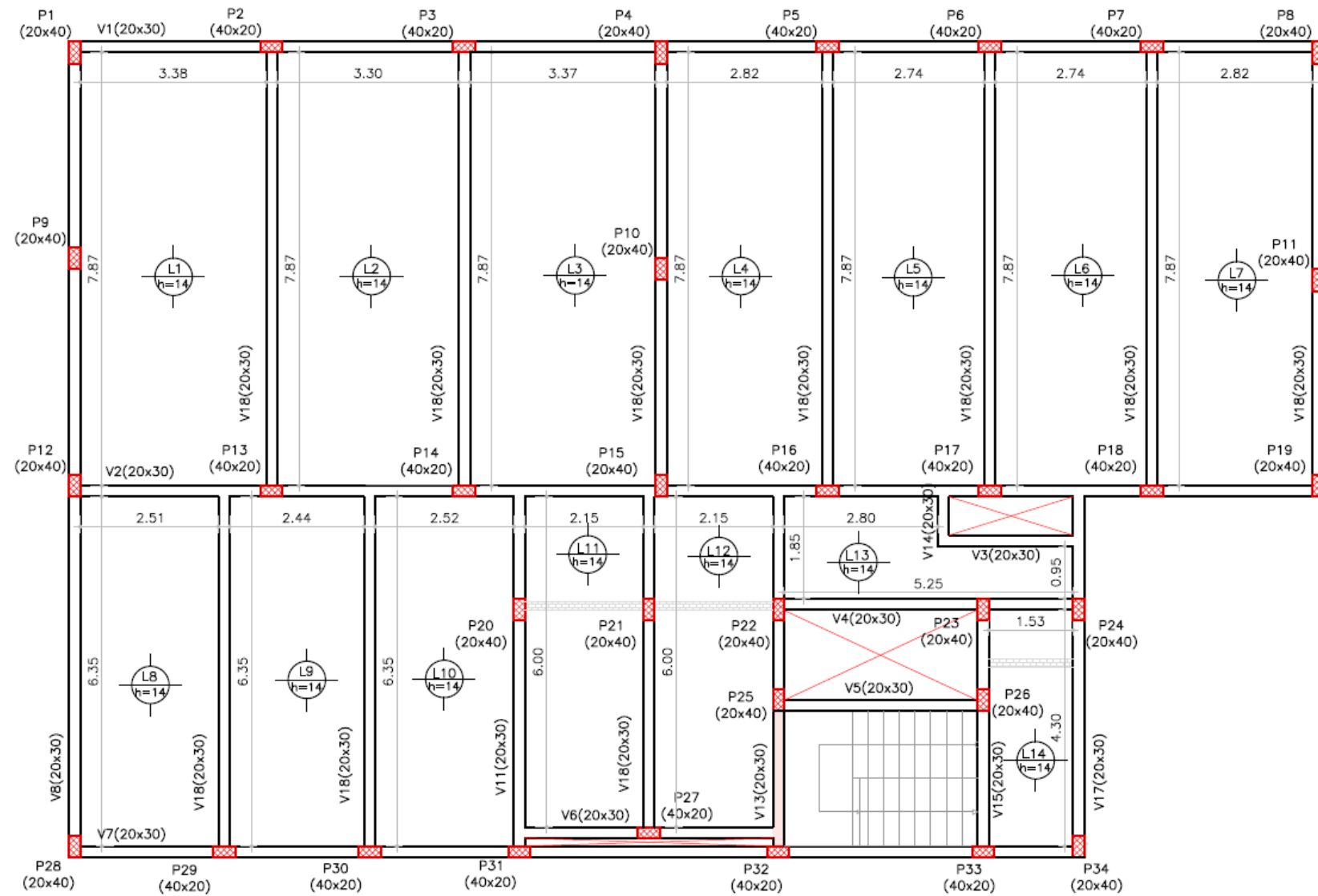
Figura 42 - Seção transversal inicial da laje mista (mm)



Fonte: a autora

Porém, verificando a tabela 01 do anexo J, para a fôrma MF-50 com espessura de 0,8 mm e altura total de 140 mm, o vão livre máximo que a fôrma de aço suporta sem escoramento é 1,35 m, valor inferior aos vãos livres das lajes do pavimento em análise, o que pode ser confirmado na figura 41. Se essa espessura fosse adotada, seria preciso executar pelo menos uma linha de escora em cada laje.

Figura 43 – Planta de fôrma inicial da laje mista “Steel Deck”



Fonte: a autora

Dessa forma, a escolha da altura e espessura da fôrma de aço ideal para cada laje foi feita de modo a atender as condições iniciais de projeto, vão máximo sem escoramento e a carga máxima suportada, e as condições ideais de execução, buscando a padronização da espessura da fôrma e altura total da laje. As espessuras adotadas e as verificações citadas acima podem ser averiguadas nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Verificação da necessidade de escoramento

Localização	Esp. da fôrma	h fôrma (mm)	e (mm)	h laje (cm)	Vão na direção da nervura (m)	Vão Máximo sem escoramento(m)	Verificação
L1	MF - 75	75,00	1,25	15	3,38	3,40	Ok!
L2	MF - 75	75,00	1,25	15	3,30	3,40	Ok!
L3	MF - 75	75,00	1,25	15	3,37	3,40	Ok!
L4	MF - 75	75,00	1,25	15	2,82	3,40	Ok!
L5	MF - 75	75,00	1,25	15	2,74	3,40	Ok!
L6	MF - 75	75,00	1,25	15	2,74	3,40	Ok!
L7	MF - 75	75,00	1,25	15	2,82	3,40	Ok!
L8	MF - 50	50,00	1,25	14	2,57	2,70	Ok!
L9	MF - 50	50,00	1,25	14	2,49	2,70	Ok!
L10	MF - 50	50,00	1,25	14	2,57	2,70	Ok!
L11	MF - 50	50,00	1,25	14	2,20	2,70	Ok!
L12	MF - 50	50,00	1,25	14	2,20	2,70	Ok!
L13	MF - 50	50,00	1,25	14	1,90	2,70	Ok!
L14	MF - 50	50,00	1,25	14	1,75	2,70	Ok!

Fonte: a autora

Tabela 8 - Verificação da carga máxima

Localização	Peso Próprio (kN/m ²)	Revestimento (kN/m ²)	Outras (kN/m ²)	Sobrecarga (kN/m ²)	Total (kN/m ²)	Carga máxima (kN/m ²)	Verificação
L1	2,79	1,06	-	2,00	5,850	6,15	Ok!
L2	2,79	1,06	-	2,00	5,850	6,15	Ok!
L3	2,79	1,06	-	2,00	5,850	6,15	Ok!
L4	2,79	1,06	-	2,00	5,850	6,15	Ok!
L5	2,79	1,06	-	2,00	5,850	6,15	Ok!
L6	2,79	1,06	-	2,00	5,850	6,15	Ok!
L7	2,79	1,06	-	2,00	5,850	6,15	Ok!
L8	2,83	1,06	-	2,00	5,890	8,93	Ok!
L9	2,83	1,06	-	2,00	5,890	8,93	Ok!
L10	2,83	1,06	-	2,00	5,890	8,93	Ok!
L11	2,83	1,06	1,10	2,00	6,986	8,93	Ok!
L12	2,83	1,06	1,10	2,00	6,986	8,93	Ok!
L13	2,83	1,06	-	2,00	5,890	8,93	Ok!
L14	2,83	1,06	1,47	2,00	7,363	8,93	Ok!

Fonte: a autora

Concluída essas duas primeiras verificações, foi dado início às verificações de resistência das lajes mistas “Steel Deck”. O primeiro esforço a ser verificado foi o momento fletor positivo, sendo que para isso foi necessário definir a posição da linha neutra, através das equações 3.28, 3.29 e 3.30 do item 3.4.2.2.1.1.

O aço utilizado na fôrma, segundo o fabricante Metform ([20--]), é o aço galvanizado ASTM A653 Grau 40 (ZAR-280) que possui tensão de escoamento $f_y = 280 \text{ MPa}$. A área da seção efetiva da fôrma também é fornecida pelo fabricante, na tabela 05 do anexo J.

A tabela 9 apresenta o cálculo da posição da linha neutra em todas as lajes.

$$N_{pa} = A_{F,ef} \cdot f_{yFd} = 17,71 \cdot \frac{28}{1,15} = 431,2 \text{ kN}$$

$$N_{cf} = \left(\frac{0,85 \cdot f_{ck}}{1,4} \right) \cdot b \cdot t_c = \left(\frac{0,85 \cdot 2,5}{1,4} \right) \cdot 100 \cdot 7,5 = 1138,39 \text{ kN}$$

$$N_{cf} = 1138,39 \text{ kN} \geq N_{pa} = 431,2 \rightarrow \text{LNP está na mesa}$$

Tabela 9 - Definição da posição da linha neutra

Localização	$A_{F,ef}$ (mm ²)	N_{pa} (kN)	N_{cf} (kN)	N_{cf} (kN)	Posição da linha neutra
L1	1771,00	431,20	1138,39	494,06	LN na mesa
L2	1771,00	431,20	1138,39	481,92	LN na mesa
L3	1771,00	431,20	1138,39	492,54	LN na mesa
L4	1771,00	431,20	1138,39	409,06	LN na mesa
L5	1771,00	431,20	1138,39	396,92	LN na mesa
L6	1771,00	431,20	1138,39	396,92	LN na mesa
L7	1771,00	431,20	1138,39	409,06	LN na mesa
L8	1587,00	386,40	1366,07	371,12	LN na mesa
L9	1587,00	386,40	1366,07	358,97	LN na mesa
L10	1587,00	386,40	1366,07	371,12	LN na mesa
L11	1587,00	386,40	1366,07	314,96	LN na mesa
L12	1587,00	386,40	1366,07	314,96	LN na mesa
L13	1587,00	386,40	1366,07	269,42	LN na mesa
L14	1587,00	386,40	1366,07	246,65	LN na mesa

Fonte: a autora

Definida a posição da linha neutra foi feita a verificação dos momentos. Para isso, foi utilizada a equação 3.1, do item 3.4.2.2.1.2, para linha neutra acima da face superior da fôrma de aço, ou seja linha neutra na mesa.

O centro de gravidade da fôrma pode ser encontrado nas tabelas 02 e 05 do anexo J e o momento solicitante de cálculo (M_{sd}) foi determinado através do software Ftool, considerando a continuidade das lajes. Os resultados podem ser consultados no apêndice B deste trabalho.

$$a = \frac{N_{pa}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b} = \frac{431,2}{0,85 \cdot \frac{2,5}{1,4} \cdot 100} = 2,84 \text{ cm}$$

$$M_{Rd} = 431,2 \cdot (d_f - 0,5 \cdot a) = 431,2 \cdot [(15 - 3,772) - 0,5 \cdot 2,84] = 4229,03 \text{ kN.cm}$$

Como $M_{sd} = 685 \text{ kN.cm} \leq M_{rd} = 4229,03 \text{ kN}$ a verificação foi cumprida.

Tabela 10 - Verificação do momento fletor positivo para linha neutra na mesa

Localização	Momento Atuante (kN.m)	M_{sd} (kN.cm)	a (cm)	Centro de gravidade (mm)	M_{rd} (kN.cm)	Verificação
L1	4,70	658,00	2,84	37,72	4229,03	Ok!
L2	2,70	378,00	2,84	37,72	4229,03	Ok!
L3	2,80	392,00	2,84	37,72	4229,03	Ok!
L4	1,90	266,00	2,84	37,72	4229,03	Ok!
L5	1,80	252,00	2,84	37,72	4229,03	Ok!
L6	1,80	252,00	2,84	37,72	4229,03	Ok!
L7	3,30	462,00	2,84	37,72	4229,03	Ok!
L8	2,60	364,00	2,55	26,36	3899,22	Ok!
L9	1,50	210,00	2,55	26,36	3899,22	Ok!
L10	1,60	224,00	2,55	26,36	3899,22	Ok!
L11	1,30	182,00	2,55	26,36	3899,22	Ok!
L12	1,30	182,00	2,55	26,36	3899,22	Ok!
L13	1,40	196,00	2,55	26,36	3899,22	Ok!
L14	2,20	308,00	2,55	26,36	3899,22	Ok!

Fonte: a autora

Como a laje mista foi considerada com continuidade, também ocorrerá momento fletor negativo sobre os apoios intermediários das lajes. Segundo Fabrizzi (2007, p.1947), essas regiões devem ser consideradas como uma laje de concreto armado, desprezando-se a fôrma

de aço. Dessa forma, foi feito o cálculo da área de aço necessária através da equação 3.15 do item 3.3.3.1, que corresponde ao cálculo da área de aço da laje maciça.

Os momentos negativos solicitantes (M_{sd}) de cálculo foram determinados através do software Ftool e podem ser consultado no apêndice B.

A tabela 11 apresenta o cálculo das áreas de aço necessárias para resistir aos momentos fletores negativos de todas as lajes.

$$K_{md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1,4 \cdot 840}{100 \cdot (15 - 4)^2 \cdot 2,5/1,4} = 0,054 \rightarrow \begin{cases} k_x = 0,083 - ok \\ k_z = 0,967 \end{cases}$$

$$A_s' = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{1,4 \cdot 840}{0,967 \cdot (15 - 4) \cdot 50/1,15} = 2,54 \text{ cm}^2/m$$

Tabela 11 - Cálculo da área de aço para momento fletor negativo

Localização	Momento Atuante (kN.m)	M_{sd} (kN.cm)	k_{Md}	K_x	k_z	Verificação K_x -limite	A_{s-calc} (cm ² /m)
L1	8,40	1176,00	0,054	0,083	0,967	Ok!	2,54
L2	5,30	742,00	0,034	0,052	0,979	Ok!	1,58
L3	5,50	770,00	0,036	0,054	0,979	Ok!	1,65
L4	3,90	546,00	0,025	0,038	0,985	Ok!	1,16
L5	3,70	518,00	0,024	0,036	0,986	Ok!	1,10
L6	3,70	518,00	0,024	0,036	0,986	Ok!	1,10
L7	5,80	812,00	0,038	0,057	0,977	Ok!	1,74
L8	4,60	644,00	0,030	0,045	0,982	Ok!	1,51
L9	3,10	434,00	0,020	0,030	0,988	Ok!	1,01
L10	3,10	434,00	0,020	0,030	0,988	Ok!	1,01
L11	2,70	378,00	0,017	0,026	0,990	Ok!	0,88
L12	2,70	378,00	0,017	0,026	0,990	Ok!	0,88
L13	2,50	350,00	0,016	0,024	0,990	Ok!	0,81
L14	0,00	0,00	0,000	0,000	1,000	x-x-x	0,00

Fonte: a autora

Com a área de aço calculada, foi possível definir as armaduras negativas de cada uma das lajes, conforme tabela 12.

$$A_{s-min}' = 0,15 \cdot h = 0,15 \cdot 15 = 2,25 \text{ cm}^2/cm$$

$$S_{m\acute{a}x} \leq \begin{cases} 2 \cdot h = 2 \cdot 10 = 20 \text{ cm} \\ 20 \text{ cm} \end{cases}$$

$$\text{AÇO CA - 50} \left\{ \begin{array}{l} \text{Ø } 6,3 \text{ mm} \rightarrow \frac{0,312}{2,54} \cdot 100 = c / 12 \\ \text{Ø } 8,0 \text{ mm} \rightarrow \frac{0,50}{2,54} \cdot 100 = c / 20 \\ \text{Ø } 10,0 \text{ mm} \rightarrow \frac{0,8}{2,54} \cdot 100 = c / 20 \\ \text{Ø } 12,5 \text{ mm} \rightarrow \frac{1,227}{2,54} \cdot 100 = c / 20 \end{array} \right.$$

$$A_{s \text{ efet.}} = 2,54 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \rightarrow \text{Ø } 10 \text{ mm } c/20$$

Tabela 12 - Determinação das armaduras para momento fletor negativo

Localização	$A_{s\text{-mín}}$ (cm^2/m)	$A_{s\text{-efet}}$ (cm^2/m)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	Ø 6,3 mm	Ø 8,0 mm	Ø 10,0 mm	Ø 12,5 mm	Armadura adotada
L1	2,25	2,54	20	12	20	20	20	Ø 10 mm c/ 20
L2	2,25	2,25	20	14	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L3	2,25	2,25	20	14	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L4	2,25	2,25	20	14	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L5	2,25	2,25	20	14	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L6	2,25	2,25	20	14	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L7	2,25	2,25	20	14	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L8	2,10	2,10	20	15	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L9	2,10	2,10	20	15	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L10	2,10	2,10	20	15	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L11	2,10	2,10	20	15	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L12	2,10	2,10	20	15	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L13	2,10	2,10	20	15	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20
L14	2,10	2,10	20	15	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20

Fonte: a autora.

Com as armaduras determinadas, foi possível calcular a área de aço adotada, valor necessário para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo ($M_{Rd,pl}$). A equação para esse cálculo é a 3.33 do item 3.4.2.2.1.3. A tabela 13 apresenta os resultados dessa verificação.

$$x = \frac{A_s \cdot f_{sd}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_c} = \frac{4,00 \cdot 50/1,15}{0,85 \cdot 2,5 \cdot 11,9} = 6,88 \text{ cm}$$

$$z = d_s - \frac{x}{2} = (15 - 2,5) - \left(\frac{6,88}{2}\right) = 9,06 \text{ cm}$$

$$M_{Rd,pl} = A_s \cdot f_{sd} \cdot z = 4,00 \cdot \frac{50}{1,15} \cdot 9,06 = 1575,88 \text{ kN.cm}$$

Como $M_{sd} = 1176 \text{ kN.cm} < M_{Rd,pl} = 1575,88 \text{ kN.cm}$, a verificação foi cumprida.

Tabela 13 - Verificação do momento fletor negativo

Localização	Momento Atuante (kN.m)	M_{sd} (kN.cm)	A_s - adotada (cm ² /m)	f_{sd} (kN/cm ²)	x (cm)	z (cm)	$M_{Rd,pl}$ (kN.cm)	Verificação
L1	8,40	1176,00	4,00	43,48	6,88	9,06	1575,88	Ok!
L2	5,30	742,00	2,50	43,48	4,30	10,35	1125,09	Ok!
L3	5,50	770,00	2,50	43,48	4,30	10,35	1125,09	Ok!
L4	3,90	546,00	2,50	43,48	4,30	10,35	1125,09	Ok!
L5	3,70	518,00	2,50	43,48	4,30	10,35	1125,09	Ok!
L6	3,70	518,00	2,50	43,48	4,30	10,35	1125,09	Ok!
L7	5,80	812,00	2,50	43,48	4,30	10,35	1125,09	Ok!
L8	4,60	644,00	2,50	43,48	3,93	9,53	1036,16	Ok!
L9	3,10	434,00	2,50	43,48	3,93	9,53	1036,16	Ok!
L10	3,10	434,00	2,50	43,48	3,93	9,53	1036,16	Ok!
L11	2,70	378,00	2,50	43,48	3,93	9,53	1036,16	Ok!
L12	2,70	378,00	2,50	43,48	3,93	9,53	1036,16	Ok!
L13	2,50	350,00	2,50	43,48	3,93	9,53	1036,16	Ok!
L14	0,00	0,00	2,50	43,48	3,93	9,53	1036,16	Ok!

Fonte: a autora

Vale ressaltar que na laje L1, foi considerada a armadura $\emptyset 10 \text{ mm c/ } 20$, de forma a atender as verificações para o momento fletor negativo. Se fosse considerado $\emptyset 8 \text{ mm c/ } 20$, a verificação não seria cumprida, o que pode ser confirmado pela tabela 14.

Tabela 14 - Verificação inicial para a laje L1 considerando armadura Ø 8 mm c/ 20

Localização	Momento Atuante (kN.m)	M _{sd} (kN.cm)	A _s - adotada (cm ² /m)	f _{sd} (kN/cm ²)	x (cm)	z (cm)	M _{Rd,pl} (kN.cm)	Verificação
L1	8,40	1176,00	2,50	43,48	4,30	8,85	962,04	Não passa!

Fonte: a autora.

Outra verificação prevista para as lajes mistas é a do do cisalhamento longitudinal. Para essa verificação, conforme exposto no item 3.4.2.2.2, será utilizado método semi-empírico m-k. Para isso será utilizada a equação 3.36.

Os valores dos coeficientes m e k foram retirados do ensaio desenvolvido por Sieg (2015, p.88). Este ensaio está sintetizado no anexo L deste trabalho.

Os valores da força cortante solicitante de cálculo ($V_{l,sd}$) foram determinados através do Software Ftool e podem ser conferidos no apêndice B deste trabalho.

A tabela 15 apresenta os resultados dessa verificação para todas as lajes do pavimento em análise.

$$m = 161 \frac{N}{mm^2} = 16100 \frac{N}{cm^2}$$

$$k = -0,066 \frac{N}{mm^2} = -6,6 \frac{N}{cm^2}$$

$$L_s = \frac{L_f}{4} = \frac{3,38}{4} = 0,845 \text{ m} = 84,5 \text{ cm}$$

$$V_{l,Rd} = \frac{b \cdot d_f \cdot \left[\left(\frac{m \cdot A_{f,ef}}{b \cdot L_s} \right) + k \right]}{\gamma_{sl}}$$

$$V_{l,Rd} = \frac{100 \cdot (15 - 3,772) \cdot \left[\left(\frac{16100 \cdot 17,71}{100 \cdot 84,5} \right) - 6,6 \right]}{1,25} = 24381,21 \text{ N} = 24,38 \text{ kN/m}$$

Como $V_{l,sd} = 12,32 \text{ kN/m} \leq V_{l,Rd} = 28,22 \text{ kN/m}$, a verificação foi cumprida.

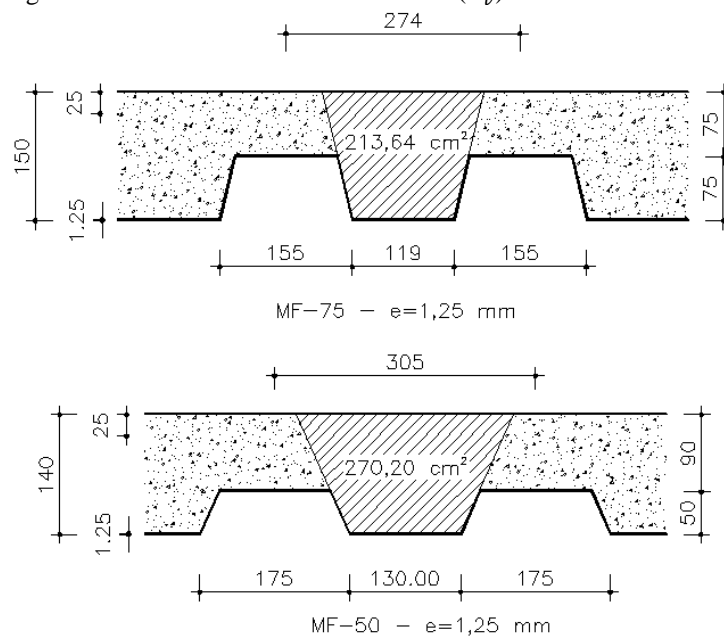
Tabela 15 - Verificação do cisalhamento longitudinal

Localização	Esforço cortante (kN)	$V_{l,sd}$ (kN/m)	Coefficiente "m" (N/cm ²)	Coefficiente "k" (N/cm ²)	L_s (cm)	$V_{l,Rd}$ (kN/m)	Verificação
L1	12,40	17,36	16100,00	-6,60	84,50	24,38	Ok!
L2	9,70	13,58	16100,00	-6,60	82,50	25,12	Ok!
L3	9,90	13,86	16100,00	-6,60	84,25	24,47	Ok!
L4	8,20	11,48	16100,00	-6,60	70,50	30,40	Ok!
L5	8,00	11,20	16100,00	-6,60	68,50	31,46	Ok!
L6	8,00	11,20	16100,00	-6,60	68,50	31,46	Ok!
L7	10,30	14,42	16100,00	-6,60	70,50	30,40	Ok!
L8	9,20	12,88	16100,00	-6,60	64,25	30,15	Ok!
L9	7,40	10,36	16100,00	-6,60	62,25	31,31	Ok!
L10	7,40	10,36	16100,00	-6,60	64,25	30,15	Ok!
L11	7,50	10,50	16100,00	-6,60	55,00	36,23	Ok!
L12	7,50	10,50	16100,00	-6,60	55,00	36,23	Ok!
L13	6,80	9,52	16100,00	-6,60	47,50	42,90	Ok!
L14	5,60	7,84	16100,00	-6,60	43,75	47,09	Ok!

Fonte: a autora

Também foi feita a verificação da necessidade de armadura transversal. Para isso foram utilizadas as equações 3.37 e 3.38 do item 3.4.2.2.3.

A área resistente de concreto (A_v) está indicada na figura 44 e a verificação para todas as lajes está apresentada na tabela 16.

Figura 44- Área resistente de concreto (A_v)

Fonte: a autora

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{1000 \cdot 0,285 \cdot (f_{ck})^{1/2} \cdot A_v}{b_n} = \frac{100 \cdot 0,285 \cdot (2,5/1,4)^{1/2} \cdot 213,64}{27,4} = 296,95 \text{ kN}$$

$$\eta = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\rho_c}{2400} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{2400}{2400} = 1$$

$$\tau_{Rd} = \frac{0,25 \cdot \eta \cdot f_{ctk,inf}}{1,4} = \frac{0,25 \cdot 1 \cdot 0,21 \cdot 25^{2/3}}{1,4} = 0,321 \text{ MPa} = 0,0321 \text{ kN/cm}^2$$

$$k_v = \left(1,6 - \frac{d}{100}\right) = \left(1,6 - \frac{(15 - 3,772)}{100}\right) = 1,49$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_v} = \frac{(17,71 \cdot 13,7)}{227,18} = 0,01 \leq 0,02$$

$$V_{V,Rd} = \frac{1000 \cdot \tau_{Rd} \cdot k_v \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho) \cdot A_v}{b_n} = \frac{100 \cdot 0,0321 \cdot 1,49 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,01) \cdot 213,64}{27,4} = 61,52 \text{ kN/m}$$

Como $V_{v,sd} = 17,36 \text{ kN/m} \leq V_{V,Rd} = 61,52 \text{ kN/m}$, não é necessário armadura transversal.

Tabela 16 - Verificação da necessidade de armadura transversal

Localização	A_v (cm ²)	b_n (cm)	$V_{R,m\acute{a}x}$ (kN/m)	η	τ_{rd} (kN/cm ²)	K_v	ρ	$V_{V,Rd}$ (kN/m)	Verificação
L1	213,64	27,4	296,95	1	0,0321	1,49	0,01	61,52	Ok!
L2	213,64	27,4	296,95	1	0,0321	1,49	0,01	61,52	Ok!
L3	213,64	27,4	296,95	1	0,0321	1,49	0,01	61,52	Ok!
L4	213,64	27,4	296,95	1	0,0321	1,49	0,01	61,52	Ok!
L5	213,64	27,4	296,95	1	0,0321	1,49	0,01	61,52	Ok!
L6	213,64	27,4	296,95	1	0,0321	1,49	0,01	61,52	Ok!
L7	213,64	27,4	296,95	1	0,0321	1,49	0,01	61,52	Ok!
L8	270,2	30,5	337,39	1	0,0321	1,49	0,01	65,79	Ok!
L9	270,2	30,5	337,39	1	0,0321	1,49	0,01	65,79	Ok!
L10	270,2	30,5	337,39	1	0,0321	1,49	0,01	65,79	Ok!
L11	270,2	30,5	337,39	1	0,0321	1,49	0,01	65,79	Ok!
L12	270,2	30,5	337,39	1	0,0321	1,49	0,01	65,79	Ok!
L13	270,2	30,5	337,39	1	0,0321	1,49	0,01	65,79	Ok!
L14	270,2	30,5	337,39	1	0,0321	1,49	0,01	65,79	Ok!

Fonte: a autora

A última verificação para a laje mista é a do deslocamento vertical. Para isso será utilizada a equação 3.43 do item 3.4.2.3.2.

O momento de inércia efetivo da fôrma (I_{ef}) pode ser encontrado nas tabelas 02 e 05 do anexo J deste trabalho.

A tabela 17 apresenta a verificação do deslocamento vertical para todas as lajes.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5 \cdot p \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_{ef}} \leq \frac{L_F}{350}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5 \cdot 6,15 \cdot 10^{-4} \cdot 338^4}{384 \cdot 2816,1 \cdot 166,67} \leq \frac{338}{350}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 0,212 \leq 0,97 \rightarrow Ok!$$

Tabela 17 - Verificação do deslocamento vertical

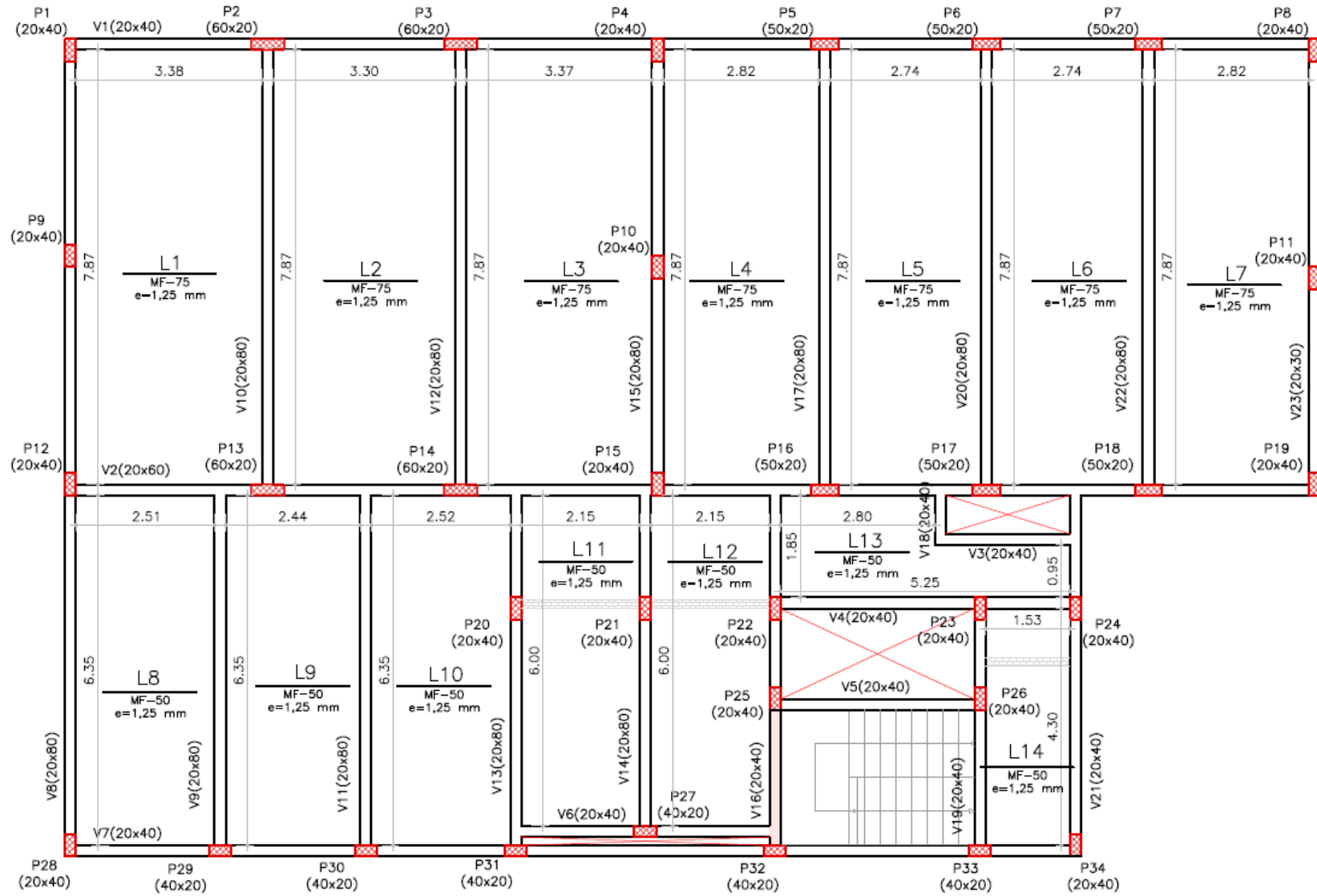
Localização	I_{ef} (mm ²)	δ (cm)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (cm)	Verificação
L1	1666741,00	0,212	0,97	Ok!
L2	1666741,00	0,192	0,94	Ok!
L3	1666741,00	0,209	0,96	Ok!
L4	1666741,00	0,103	0,81	Ok!
L5	1666741,00	0,091	0,78	Ok!
L8	786502,00	0,151	0,73	Ok!
L9	786502,00	0,133	0,71	Ok!
L10	786502,00	0,151	0,73	Ok!
L11	786502,00	0,096	0,63	Ok!
L12	786502,00	0,096	0,63	Ok!
L13	786502,00	0,045	0,54	Ok!
L14	786502,00	0,041	0,50	Ok!

Fonte: a autora

Por fim, a planta de fôrma inicial foi atualizada com as dimensões finais das lajes. Para se obter de maneira simplificada as dimensões das vigas e pilares que compõe o pavimento em análise, foi realizado o cálculo estrutural desses elementos através do CYPECAD. O resultado final está apresentado na figura 45.

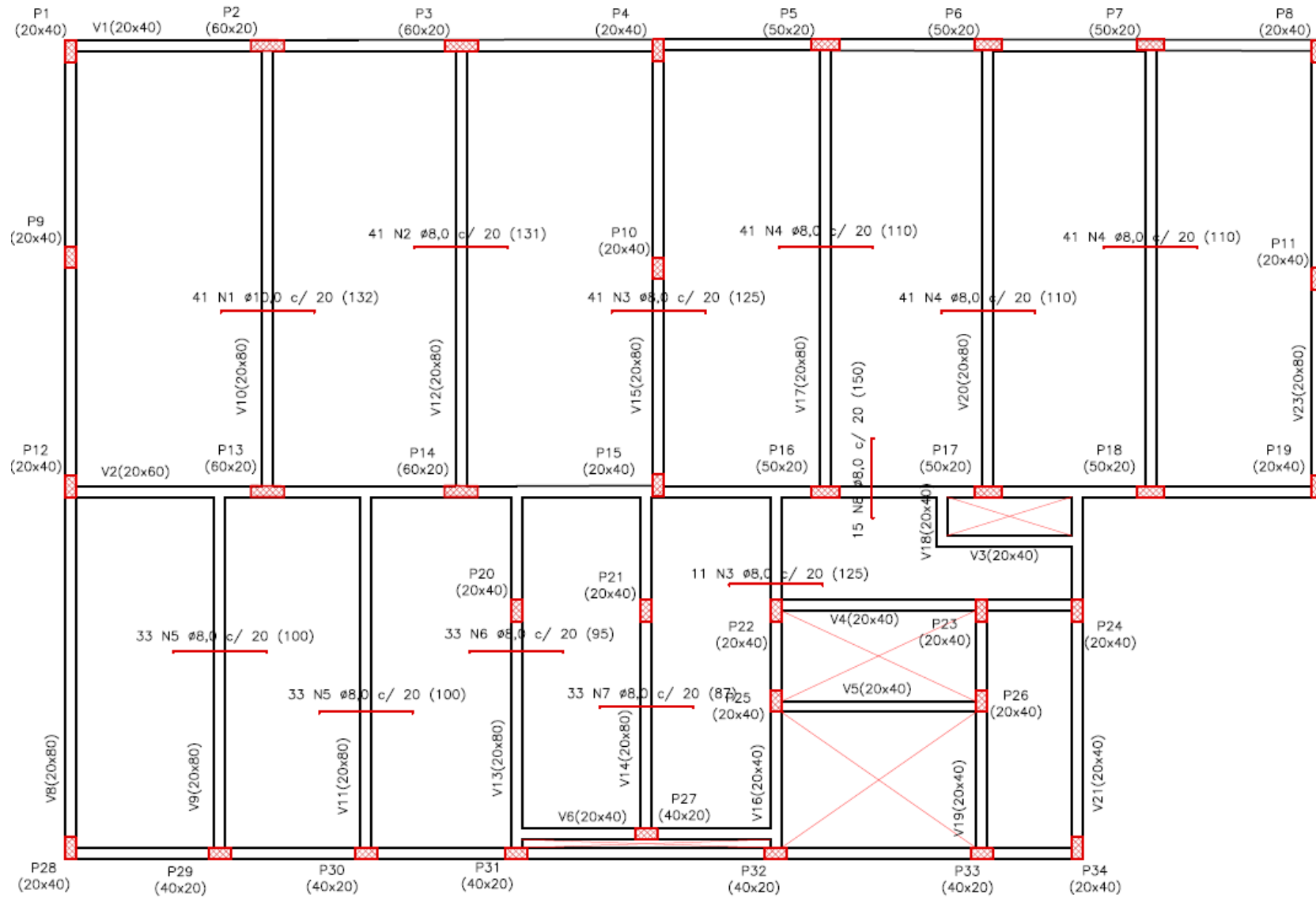
A figura 46 apresenta o detalhamento da armadura negativa da laje mista; a figura 47 o detalhamento do “Steel Deck” e a figura 48, o detalhamento da tela solda, a qual é importante para evitar a fissuração devido à retração do concreto ou variação de temperatura.

Figura 45 - Planta de fôrma final da laje mista "Steel Deck"



Fonte: a autora

Figura 46 – Detalhamento armadura negativa da laje mista “Steel Deck”



Fonte: a autora

Figura 47 – Detalhamento do Steel Deck”

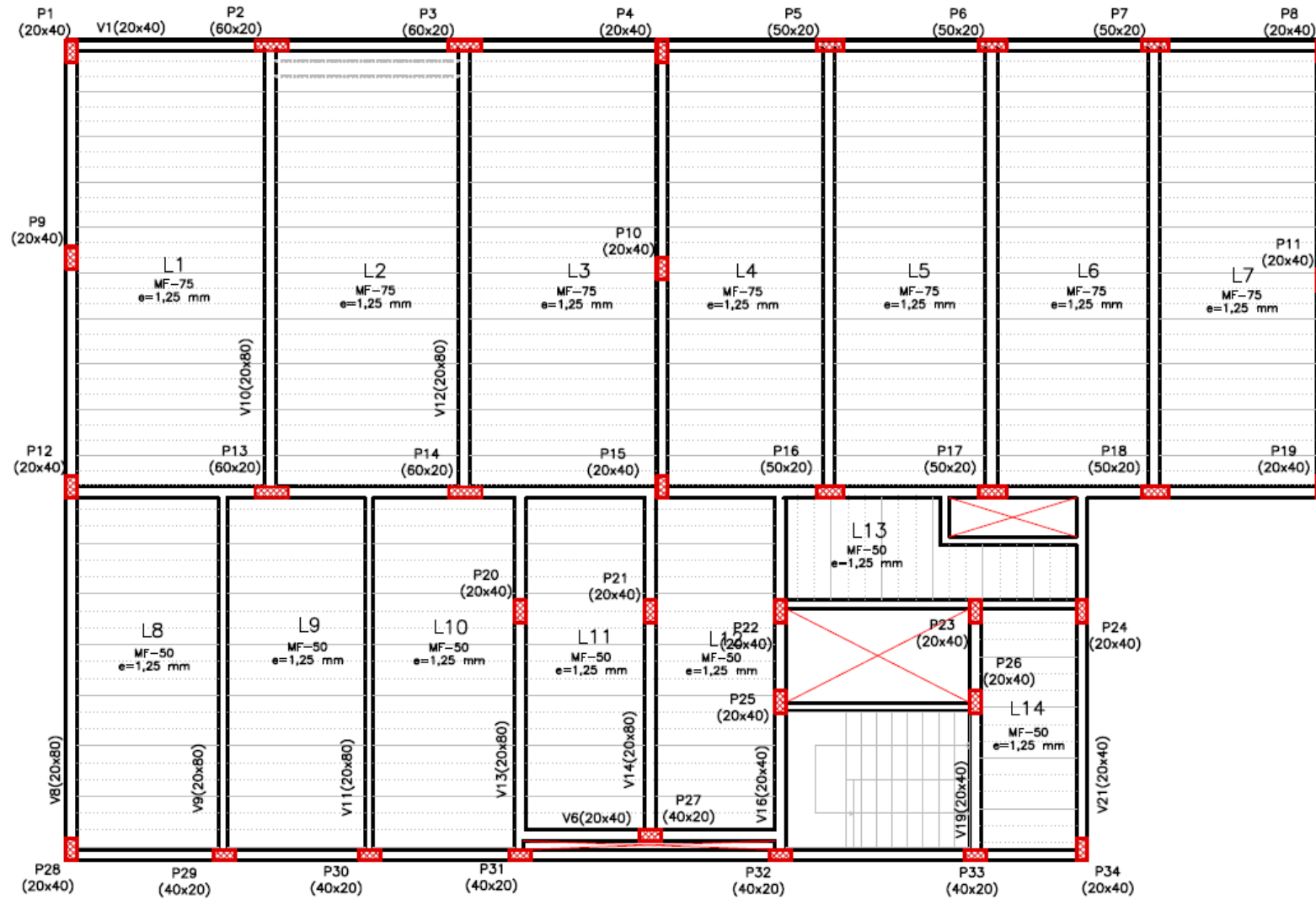


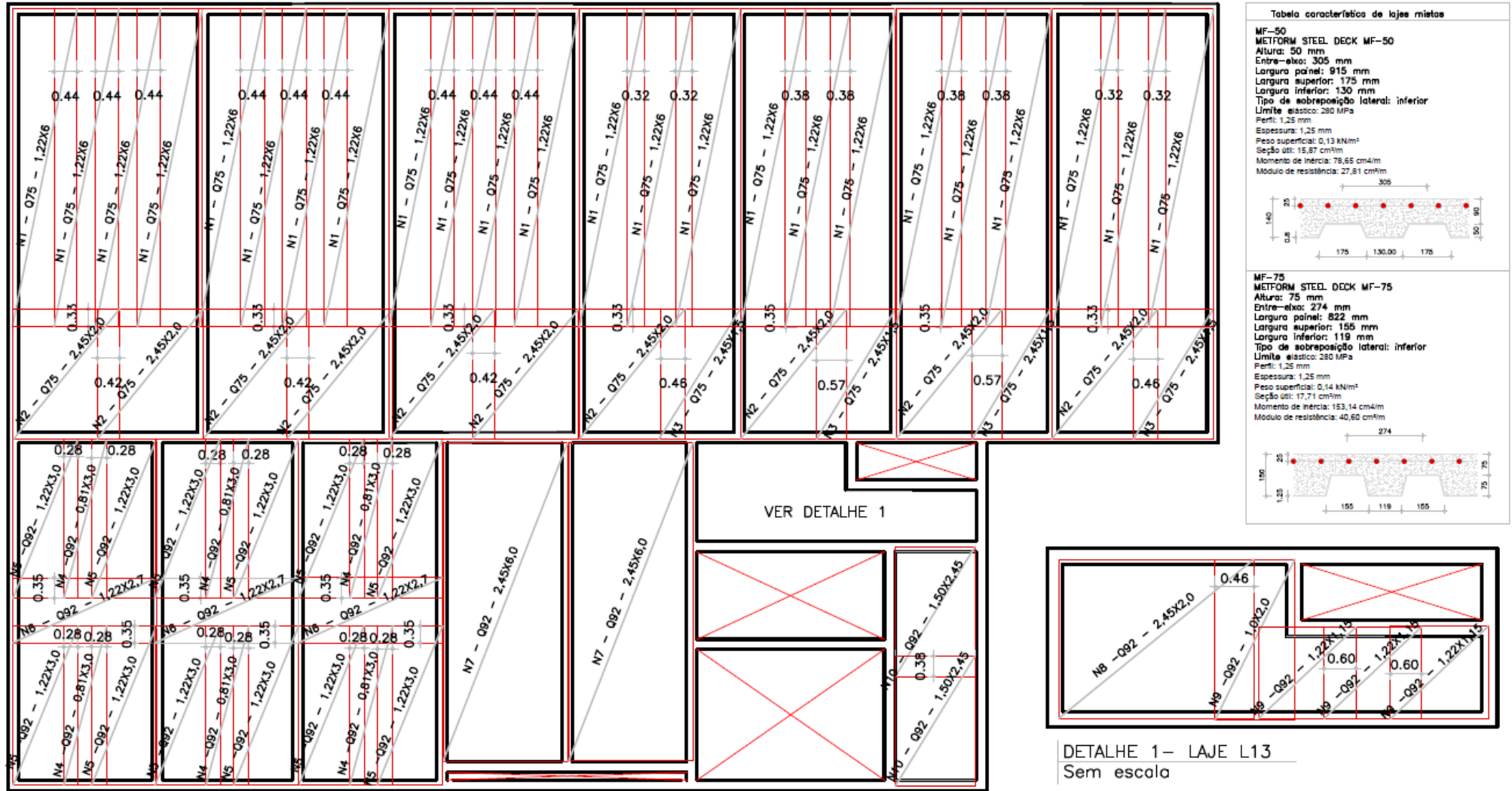
Tabela característica de lajes mistas

MF-50
METFORM STEEL DECK MF-50
 Altura: 50 mm
 Entre-eixo: 305 mm
 Largura painel: 915 mm
 Largura superior: 175 mm
 Largura inferior: 130 mm
 Tipo de sobreposição lateral: inferior
 Limite elástico: 280 MPa
 Perfil: 1,25 mm
 Espessura: 1,25 mm
 Peso superficial: 0,13 kN/m²
 Seção útil: 15,87 cm²/m
 Momento de inércia: 78,65 cm⁴/m
 Módulo de resistência: 27,81 cm³/m

MF-75
METFORM STEEL DECK MF-75
 Altura: 75 mm
 Entre-eixo: 274 mm
 Largura painel: 822 mm
 Largura superior: 155 mm
 Largura inferior: 119 mm
 Tipo de sobreposição lateral: inferior
 Limite elástico: 280 MPa
 Perfil: 1,25 mm
 Espessura: 1,25 mm
 Peso superficial: 0,14 kN/m²
 Seção útil: 17,71 cm²/m
 Momento de inércia: 153,14 cm⁴/m
 Módulo de resistência: 40,60 cm³/m

Fonte: a autora

Figura 48 - Detalhamento tela soldada



Fonte: a autora

5.3 Indicadores de consumo de material

Concluídas todas as verificações e feito todos os detalhamentos das armaduras, foi possível determinar os indicadores de consumo de material para o comparativo das lajes. Os tópicos 5.3.1 e 5.3.2 apresentam o desenvolvimento desses indicadores.

Conforme apresentado no item 4.1.2 os indicadores que serão adotados como parâmetros de análise são o número de lajes do pavimento, área de fôrma, volume de concreto, peso de aço, consumo de concreto por metro quadrado e taxa de armadura.

5.3.1 Indicadores das lajes maciças

A tabela 18 apresenta os indicadores de consumo de material das lajes maciças. Para a determinação da área de fôrma foi considerada a área total de lajes. O volume de concreto foi encontrado multiplicando-se a área de cada laje por sua espessura. Já o peso de aço é a soma das armaduras positiva, negativa e de distribuição. No apêndice C é possível encontrar as planilhas elaboradas para a determinação do peso total de aço do pavimento.

O consumo de concreto, consumo de aço e taxa de armadura foram determinados conforme as equações 4.1, 4.2 e 4.3 do item 4.1.2

Tabela 18- Indicadores de consumo das lajes maciças

Área total de laje (m ²)	258,97
Num. Lajes do Pavimento	9,00
Área de fôrma (m ²)	258,97
Concreto (m ³)	30,22
Aço-Total (kg)	2723,72
Consumo Concreto (m ³ /m ²)	0,12
Consumo Aço (kg/m ²)	10,52
Taxa de armadura (kg/m ³)	90,13

Fonte: a autora

5.3.2 Indicadores das lajes mistas “Steel Deck”

Para a determinação dos indicadores das lajes mistas “Steel Deck” foi realizado o mesmo procedimento feito para as lajes maciças.

O volume de concreto foi encontrado considerando o valor fornecido pelo fabricante da fôrma de aço, em m^3/m^2 nas tabelas 03 e 06 do anexo J.

No peso de aço foi considerado o peso da fôrma “Steel Deck”, o peso da tela soldada e o peso da armadura negativa. Para o cálculo do peso da fôrma de aço, foi utilizado o dado fornecido pelas tabela 03 e 05 do anexo J.

No apêndice D é possível encontrar as planilhas elaboradas para a determinação do peso total de aço da laje mista “Steel Deck”.

Assim como para as lajes maciças, o consumo de concreto, consumo de aço e taxa de armadura foram determinados conforme as equações 4.1, 4.2 e 4.3 do item 4.1.2

Tabela 19 – Indicadores de consumo da laje mista "Steel Deck"

Área total de laje (m^2)	256,13
Num. Lajes do Pavimento	14,00
Área de fôrma (m^2)	0,00
Concreto (m^3)	29,04
Aço-Total (kg)	4137,32
Consumo Concreto (m^3/m^2)	0,11
Consumo Aço (kg/m^2)	16,15
Taxa de armadura (kg/m^3)	142,48

Fonte: a autora

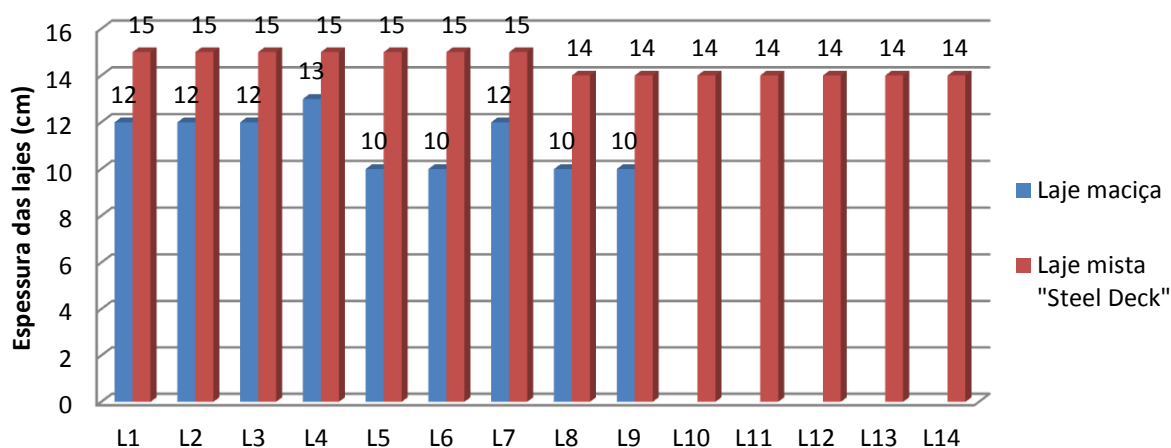
5.4 Estudo comparativo

De posse dos indicadores de consumo de material e com o pavimento calculado e detalhado, para os dois tipos de laje em estudo, foi possível analisar as influências de cada um dos dois sistemas de laje na estrutura do edifício com um todo.

Analisando inicialmente apenas as lajes, é possível perceber que a adoção do sistema lajes mistas “Steel Deck” originou um número maior de lajes, devido a limitação dos vãos

livres, e com uma espessura maior, já que o fabricante da fôrma determina uma espessura mínima de 14 cm para lajes de piso. Enquanto o pavimento de lajes maciças foi composto por 9 lajes, o de lajes “Steel Deck” necessitou de 14 lajes. O gráfico 1 representa essa variação.

Gráfico 1 – Espessura das lajes

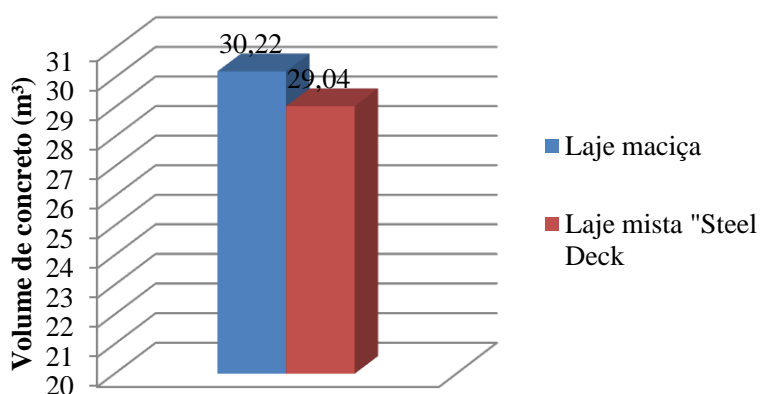


Fonte: a autora

Por outro lado, esse aumento significativo do número de lajes, não gerou grandes influências na área total de lajes, sendo que a laje mista aprestou área total de 256,13 m² e a laje maciça de 258,97 m².

Quanto ao volume de concreto, mesmo a laje maciça apresentando espessuras menores, houve uma diminuição de 4% com a utilização da laje mista “Steel Deck”, fato que se deve a geometria da fôrma de aço. O gráfico 2 ilustra essa variação no volume de concreto.

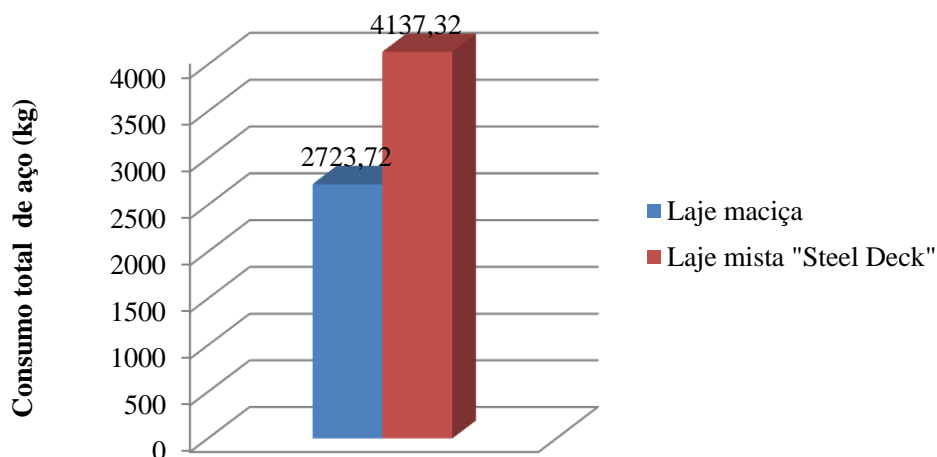
Gráfico 2 – Volume total de concreto



Fonte: a autora

Quanto ao consumo total da armadura, como pode ser visto pelo gráfico 3, houve variação significativa da laje mista para a laje maciça. Enquanto a laje maciça consumiu 2723,72 kg de aço, a laje mista consumiu 4137,32 kg, o que representou 52% a mais de aço.

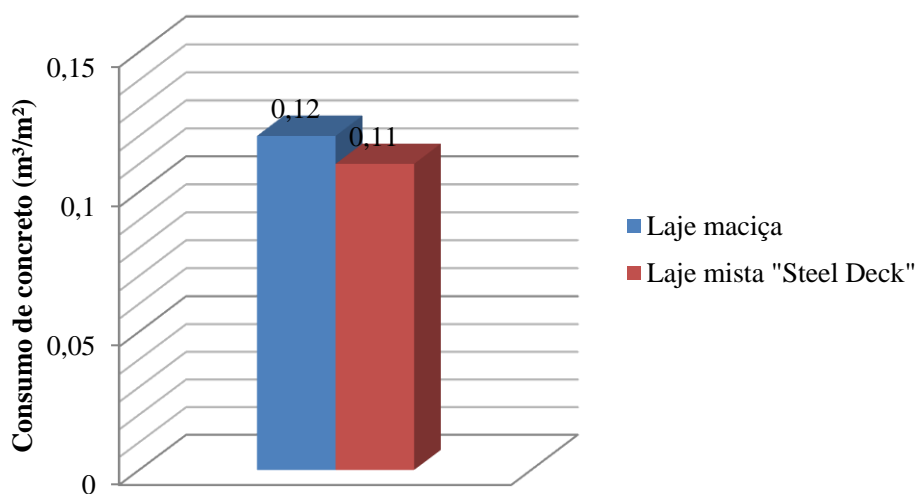
Gráfico 3 – Peso total de aço



Fonte: a autora

O consumo de concreto por metro quadrado foi similar entre as duas lajes em análise. A laje maciça apresentou espessura média de 0,12 m³ e a laje mista "Steel Deck" apresentou espessura média de 0,11 m³/m², conforme gráfico 4.

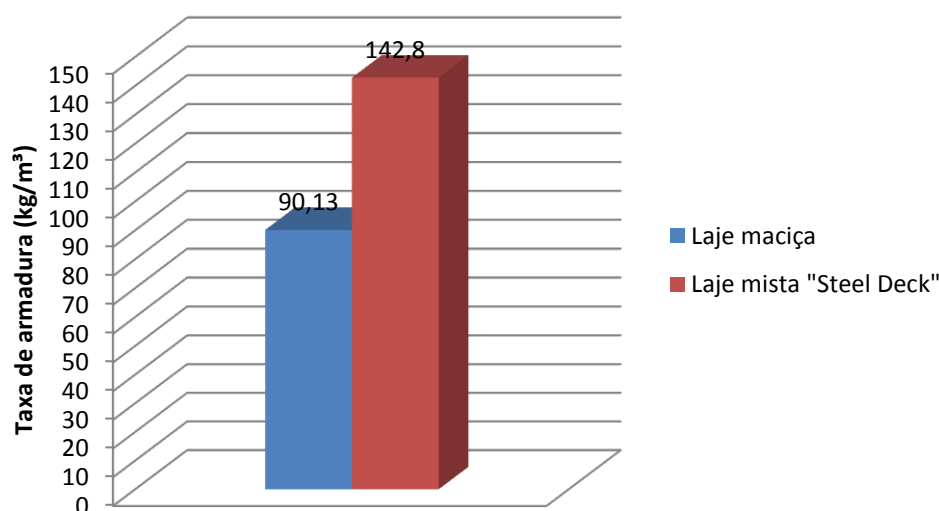
Gráfico 4 – Espessura média do pavimento (m³/m²)



Fonte: a autora

Outro indicador que apresentou variação significativa foi o consumo de aço por metro quadrado, 53% maior na laje mista “Steel Deck”, impactando diretamente na taxa de armadura, como pode ser examinado no gráfico 5.

Gráfico 5 – Taxa de armadura (kg/m³)



Fonte: a autora

O consumo de aço do pavimento composto por lajes mista “Steel deck” foi significativamente maior que na laje maciça devido ao fato de ter sido considerado o peso da fôrma de aço, já que essa trabalha como armadura positiva.

Em contrapartida, a laje mista “Steel Deck” não requer escoramento, enquanto para as lajes maciças será necessária uma área de escoramento e fôrma de 258,97 m².

Já foi demonstrado então, que do ponto de vista do consumo de material a laje mista “Steel Deck” não apresenta vantagens, já que necessita de uma quantidade de aço muito maior que a laje maciça e o consumo de concreto das duas é equivalente.

Dessa forma, foi analisado também o custo financeiro de cada sistema de laje, com o objetivo de definir qual sistema é mais viável para o pavimento da edificação em análise. A tabela 20 apresenta o custo total de cada sistema de laje. A composição do preço unitário de cada serviço pode ser encontrada detalhada no apêndice E deste trabalho. Para essa composição unitária foi utilizada a TCPO (2010) e a tabela SINAPI (2016).

Tabela 20 - Custo total de cada sistema de laje

Item	Discriminação	Unidade	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
1	Laje maciça				
1.1	Fôrma de madeira para lajes	m ²	258,97	R\$ 54,44	R\$ 14.097,25
1.2	Escoramento em madeira para lajes	m ²	258,97	R\$ 45,97	R\$ 11.905,57
1.3	Armadura até diâmetro 10 mm	kg	2723,72	R\$ 7,44	R\$ 20.254,13
1.4	Concreto estrutural	m ³	30,22	R\$ 325,04	R\$ 9.822,69
				Total	R\$ 57.287,63
2	Laje mista "Steel Deck"				
2.1	Laje mista "Steel Deck" MF-50	m ²	89,53	R\$ 136,03	R\$ 12.178,98
2.2	Laje mista "Steel Deck" MF-75	m ²	166,61	R\$ 148,79	R\$ 24.790,64
2.3	Armadura negativa	kg	192,07	R\$ 7,44	R\$ 1.428,27
				Total	R\$ 38.397,89

Fonte: a autora.

Pela análise da tabela é possível concluir que apesar de possuir um consumo maior de aço, do ponto de vista financeiro a laje mista "Steel Deck" é mais econômica. Isso se deve predominantemente a ausência de fôrma e escoramento, que representam um total de 45% do custo total das lajes. Se o escoramento e fôrma de madeira não fossem considerados nesse cálculo, a laje maciça seria mais viável, pois se custo passaria para R\$31.248,82.

6 CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento do presente trabalho foi possível perceber que existe uma diversidade considerável de sistemas estruturais de lajes para edificações e que cada um possui suas particularidades, vantagens e desvantagens. Este fato faz com que o sistema estrutural ideal para uma determinada edificação não seja o mais apropriado para uma outra, pois a definição do melhor sistema depende de uma série de fatores que vão variar de obra para obra, como por exemplo, a disponibilidade de materiais, mão de obra, velocidade de execução, uso e ocupação da edificação, entre outros.

Foi possível constatar também que houve um aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento das estruturas mistas, o que vêm proporcionando aos projetistas ferramentas de cálculo suficientemente seguras para que os mesmos tenham condições de realizar as verificações impostas pelas normas regulamentadoras de forma confiável, metodológica e simplificada, o que garante um resultado final mais apurado e preciso e dentro dos padrões de viabilidade para execução.

Por meio do dimensionamento das lajes maciças e lajes mistas “Steel Deck” foi possível estabelecer parâmetros reais para a análise da viabilidade de cada um dos sistemas, chegando a conclusão que a laje mista “Steel Deck” apresenta uma vantagem econômica, que é a execução sem a necessidade de escoramento, fazendo com que esse sistema fique consideravelmente mais barato, em torno 73% do custo total da laje maciça.

Por outro lado, apesar de possuir vantagem econômica, maior velocidade de execução e maior industrialização, o que reduz o desperdício de material, as lajes maciças “Steel Deck” requerem um número maior de vigas e pilares, o que pode encarecer a edificação quando analisada como um todo.

Outro ponto observado é que houve uma melhor distribuição dos esforços quando se adotou lajes maciças, já que as mesmas são armadas em duas direções e distribui suas ações para todas as vigas do seu contorno, enquanto as lajes mistas “Steel Deck” distribuem as ações apenas para as vigas na direção de sua maior dimensão. Esse fato faz com que as vigas e pilares que recebem essas ações sejam mais solicitados e demandem seções transversais mais rígidas, aumentando assim o consumo de concreto e aço.

Dessa forma, é possível concluir que o sistema estrutural de laje mais apropriado para a edificação em estudo, é aquele que vai atender, integradamente, as limitações arquitetônicas, a segurança estrutural, o projeto executivo e o cronograma financeiro e de execução da obra.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, maio, 2014.

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, nov., 1980.

_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, mar, 2003.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e de concreto de edifícios. Rio de Janeiro, maio, 2008.

_____. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados à frio. Rio de Janeiro, ago., 2010.

_____. **NBR 14859**: Laje pré-fabricada - Requisitos. Parte 1: Lajes Unidirecionais. Rio de Janeiro, janeiro, 2016.

AUBUQUERQUE, A.T. **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

BANDEIRA, M.S. **Análise não linear de lajes de concreto armado pelo método dos elementos finitos**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2006.

BASTOS, P.S. **Lajes de Concreto**. 2015. Notas de aula – Departamento de engenharia civil da Universidade Estadual Paulista – UNESP. Bauru, 2015.

CARVALHO, R.C. **Análise não linear de pavimentos de edifícios de concreto através da analogia de grelhas**. 1994. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 1994.

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

CARVALHO, R.C; PINHEIRO, L.M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: volume 2. 1ed. São Paulo: Pini, 2009.

CATÁLOGO DIGITAL DE DETALHAMENTO DA CONSTRUÇÃO. **Lajes maciças de concreto armado**. 2012. Disponível em:
<<https://cddcarqfeevale.wordpress.com/2012/04/03/lajes-macicas-de-concreto-armado/>>.
Acesso em 04 abr. 2016.

COTTA, I.F.S. **Cálculo e dimensionamento de estruturas metálicas: estruturas mistas – lajes mistas**. 2009. Notas de aula (Aula 22). Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR. 2009.

CYPECAD. Versão 2016. [S.I]: CYPE Software para Engenharia e Construção, 2016.

DELIBERATO, C. **Diretrizes para o projeto e execução de lajes mistas de concreto e chapas metálicas trapezoidais (“Steel Deck”)**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo, 2006.

DIOGENES, A. G. et al. **Recomendações para dimensionamento de lajes com nervuradas inclinadas**. 2012. Anais do 54º congresso brasileiro de concreto - CBC2012. Maceió, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Bruxelas, 2004.

FABRIZZI, M.A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – São Carlos, 2007.

FARIA, A. **Estruturas de concreto armado: Lajes maciças – Critérios normativos**. Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG. Varginha, 2015.

FARIA, A. **Tabela de Dimensionamento de Seção Retangular - NBR 6118:2014 - Concreto Classes I ($\leq 50,0$ MPa) e II ($> 50,0$ MPa e $\leq 90,0$ MPa)**. Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG. Varginha, 2015.

FARIA, M.P. **Estruturas para edifício em concreto armado: uma análise comparativa de soluções com lajes convencionais, lisas e nervuradas**. 2010. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

GERDAU. **Aço para construção civil**: catálogo. São Paulo, mar, 2016. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/catalogo-construcao-civil.pdf>> Acesso em 30 mai 2016.

LEMOS, P.P. **Sistema de laje mista *steel deck***: análise comparativa com o sistema de lajes zero em concreto armado. 2013. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

LIMA, Y.D.C. **Alternativas de sistemas de lajes para edifício em aço**: um estudo comparativo. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2009.

LOPES, A.F.O. **Estudo técnico comparativo entre lajes maciças e nervuradas com diferentes tipos de materiais de enchimento**. 2012. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Acadêmico do Agreste – CAA, Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2012.

MARTHA, L.F. **Ftool – Two-Dimensional Frame Analysis Tool**. Versão Educacional 3.01. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio. 2015. Disponível em: <http://www.alis-sol.com.br/ftool/index_pt.html> Acesso em 14 out. 2016.

MBP COBERTURAS E FECHAMENTOS. **Steel deck MBP**: catálogo. Rio de Janeiro. 10 p. [20--].

METFORM. **Steel deck**: catálogo. São Paulo. 8 p. [20--].

NETO, A.S.S. **Análise do comportamento e da resistência de um sistema de lajes mistas com ancoragem de extremidade com considerações sobre a fôrma de aço isolada e o atrito nos apoios**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. 2001.

PINHEIRO, L.M. et al. **Lajes Maciças – Capítulo 11. 2010**. Departamento de Engenharia de Estruturas- Universidade de São Paulo – USP. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/11%20Lajes%20Macicas.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

QUEIROZ, G. et al. **Estruturas mistas – volume 1**. 2 ed. Rio de Janeiro: Instituto do Aço Brasil/ CBCA, 2012.

RABELLO, F. T. **Análise comparativa das normas para a punção em lajes de concreto armado**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

SIEG, A. P. A. **Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço incorporada**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

SILVA, M.A.F. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

SIMÕES, R. **Dimensionamento de estruturas mistas Aço- Betão**. [20--]. Notas de aula – Mestrado em construção metálica e mista. Universidade de Coimbra. Portugal, [20--]. Disponível em: <http://www.labciv.eng.uerj.br/pgeciv/files/chapa_08.pdf>. Acesso em 01 mai. 2016.

SINAPI. Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil. **Preço de insumos**. Minas Gerais, abril, 2016. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_648> .Acesso em 28 out 2016.

SMIRIGLIO, G.S. **Análise de um projeto de pavimento, feito em lajes maciças convencionais e em lajes lisas**. 2015. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, mar 2015.

TCPO – Tabela de composição de preços para orçamento. 14 ed. São Paulo, Pini, 2012.

APÊNDICE A – Planilhas de dimensionamento das lajes maciças

Tabela 1 - Dados iniciais para dimensionamento das lajes maciças

Dados Preliminares		Revestimento		Paredes (Apoiadas sobre a laje)	
f_{ck} (MPa)	25,00	Esp. Argam. Regularização (cm)	2,00	Esp. Bloco Cerâmico (cm)	15,00
$g_{concreto}$ (kN/m ³)	25,00	$g_{Argam.regul.}$ (kN/m ³)	18,00	$\gamma_{Bloco\ cerâmico}$ (kN/m ³)	13,00
d' (cm)	4,00	Espessura Revestimento (cm)	1,00	Esp. Argamassa (cm)	1,500
$a_E = 1,2$ para basalto e diabásio		$g_{Revest.}$ (kN/m ³)	28,00	$\gamma_{Argamassa.}$ (kN/m ³)	19,00
$a_E = 1,0$ para granito e gnaisse	1,00	Esp. Argam. Revestimento (cm)	2,00		
$a_E = 0,9$ para calcáreo		$g_{Arg.revest.}$ (kN/m ³)	21,00	E_{ci} (MPa)	28000
$a_E = 0,8$ para arenito				E_{cs} (MPa)	24150
				$k_{x-limite}$	0,45

Fonte: a autora

Tabela 2 – Cálculo das ações atuantes nas lajes maciças

Localização	$h_{adotado}$ (cm)	Peso Próprio (kN/m ²)	Revestimento (kN/m ²)	Outras (kN/m ²)	Sobrecarga - NBR 6120 (kN/m ²)	Total (kN/m ²)	Caso de Vinculação
L1	12	3,00	1,060	0,00	2,00	6,060	Caso 4
L2	12	3,00	1,060	0,00	2,00	6,060	Caso 8
L3	12	3,00	1,060	0,00	2,00	6,060	Caso 8
L4	13	3,25	1,060	0,00	2,00	6,310	Caso 3
L5	10	2,50	1,060	0,00	2,00	5,560	Caso 4
L6	10	2,50	1,060	0,00	2,00	5,560	Caso 8
L7	12	3,00	1,060	2,40	2,00	8,462	Caso 8
L8	10	2,50	1,060	0,00	2,00	5,560	Caso 8
L9	10	2,50	1,060	1,69	2,00	7,249	Caso 3

Fonte: a autora

Tabela 3 - Verificação da flecha elástica*

Localização	Vão da Laje		Rel.Vãos $\lambda (I_y/I_x)$	α Centro Laje	Flecha (cm) Centro Laje	Flecha Limite (cm) (l/250)	Verificação
	I_x (m)	I_y (m)					
L1	5,17	7,92	1,53	4,53	0,47	2,068	Ok!
L2	5,18	7,92	1,53	2,53	0,26	2,072	Ok!
L3	5,81	7,92	1,36	2,48	0,41	2,324	Ok!
L4	5,81	7,92	1,36	4,50	0,61	2,324	Ok!
L5	3,88	6,40	1,65	4,77	0,25	1,552	Ok!
L6	3,89	6,40	1,65	2,78	0,15	1,556	Ok!
L7	4,55	6,05	1,33	2,48	0,22	1,820	Ok!
L8	1,90	5,30	2,79	3,07	0,01	0,760	Ok!
L9	1,75	4,50	2,57	6,38	0,02	0,700	Ok!

Fonte: a autora

*Nota: verificação considerando a dimensão final das lajes.

Tabela 4 - Cálculo da área de aço necessária

Localização		Caso de Vinculação	Rel.Vãos λ (I_y/I_x)	μ	Momento Atuante (kN.cm/m)	k_{Md}	K_x	k_z	Verificação $K_{x-limite}$	A_{s-calc} (cm ² /m)
L1	M_x	Caso 4	1,53	4,93	798,55	0,098	0,153	0,939	ok	3,42
	$M_{x'}$			10,82	1752,59	0,215	0,371	0,852	ok	8,28
	M_y			2,38	385,51	0,047	0,071	0,971	ok	1,60
	$M_{y'}$			8,09	1310,40	0,161	0,264	0,894	ok	5,90
L2	M_x	Caso 8	1,53	3,48	565,86	0,069	0,106	0,957	ok	2,38
	$M_{x'}$			8,07	1312,22	0,161	0,264	0,894	ok	5,91
	M_y			1,47	239,03	0,029	0,044	0,982	ok	0,98
	$M_{y'}$			5,69	925,22	0,113	0,180	0,928	ok	4,01
L3	M_x	Caso 8	1,36	3,55	726,19	0,089	0,138	0,945	ok	3,09
	$M_{x'}$			7,70	1575,13	0,193	0,326	0,869	ok	7,29
	M_y			1,72	351,85	0,043	0,065	0,974	ok	1,45
	$M_{y'}$			5,75	1176,23	0,144	0,234	0,906	ok	5,22
L4	M_x	Caso 3	1,36	5,36	1141,69	0,111	0,175	0,930	ok	4,39
	$M_{x'}$			10,71	2281,24	0,221	0,384	0,847	ok	9,64
	M_y			2,34	498,42	0,048	0,073	0,971	ok	1,84
	$M_{y'}$			0,00	0,00	0,000	0,000	1,000	x-x-x	x-x-x
L5	M_x	Caso 4	1,65	5,16	431,90	0,094	0,147	0,941	ok	2,46
	$M_{x'}$			11,16	934,12	0,203	0,347	0,861	ok	5,82
	M_y			2,24	187,49	0,041	0,062	0,975	ok	1,03
	$M_{y'}$			2,14	179,12	0,039	0,059	0,977	ok	0,98

Fonte: a autora

Tabela 4 - Cálculo da área de aço necessária (Continuação...)

Localização		Caso de Vinculação	Rel.Vãos λ (I_y/I_x)	μ	Momento Atuante (kN.cm/m)	k_{Md}	K_x	k_z	Verificação $K_{x-limite}$	A_{s-calc} (cm ² /m)
L6	M_x	Caso 8	1,65	3,94	331,49	0,072	0,111	0,956	ok	1,86
	$M_{x'}$			8,20	689,90	0,150	0,245	0,902	ok	4,10
	M_y			1,37	115,26	0,025	0,037	0,985	ok	0,63
	$M_{y'}$			5,62	472,84	0,103	0,162	0,935	ok	2,71
L7	M_x	Caso 8	1,33	3,55	621,88	0,135	0,218	0,913	ok	2,74
	$M_{x'}$			7,70	1348,86	0,165	0,273	0,891	ok	6,09
	M_y			1,72	301,30	0,037	0,056	0,978	ok	1,24
	$M_{y'}$			5,75	1007,27	0,123	0,197	0,921	ok	4,40
L8	M_x	Caso 8	2,79	4,18	83,90	0,018	0,027	0,989	ok	0,46
	$M_{x'}$			8,33	167,20	0,036	0,055	0,978	ok	0,92
	M_y			1,09	21,88	0,005	0,007	0,997	ok	0,12
	$M_{y'}$			5,64	113,20	0,025	0,037	0,985	ok	0,62
L9	M_x	Caso 3	2,57	7,61	168,93	0,037	0,055	0,978	ok	0,93
	$M_{x'}$			12,86	285,48	0,062	0,095	0,962	ok	1,59
	M_y			1,48	32,85	0,007	0,011	0,996	ok	0,18
	$M_{y'}$			0,00	0,00	0,000	0,000	1,000	x-x-x	x-x-x

Fonte: a autora

Tabela 5 - Determinação das armaduras

Localização		A_{s-min} (cm^2/m)	A_{s-efet} (cm^2/m)	S_{max} (cm)	Ø 6,3 mm	Ø 8,0 mm	Ø 10,0 mm	Ø 12,5 mm	Armadura adotada
L1	M_x	1,21	3,42	20	9	15	20	20	Ø 10,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,80	8,28		4	6	10	15	Ø 10,0 mm c/ 10,0
	M_y	1,21	1,60		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,80	5,90		5	8	14	20	Ø 10,0 mm c/ 14
L2	M_x	1,21	2,38	20	13	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,80	5,91		5	8	14	20	Ø 10,0 mm c/ 14,0
	M_y	1,21	1,21		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,80	4,01		8	12	20	20	Ø 10,0 mm c/ 20,0
L3	M_x	1,21	3,09	20	10	16	20	20	Ø 10,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,80	7,29		4	7	11	17	Ø 10,0 mm c/ 11,0
	M_y	1,21	1,45		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,80	5,22		6	10	16	20	Ø 10,0 mm c/ 16,0
L4	M_x	1,31	4,39	20	7	11	18	20	Ø 10,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,95	9,64		3	5	8	13	Ø 10,0 mm c/ 8,0
	M_y	1,31	1,84		17	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,95	x-x-x		x-x-x	x-x-x	x-x-x	x-x-x	Ø 6,3 mm c/ 20,0
L5	M_x	1,01	2,46	20	13	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,50	5,82		5	9	14	20	Ø 10,0 mm c/ 14,0
	M_y	1,01	1,03		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,50	1,50		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0

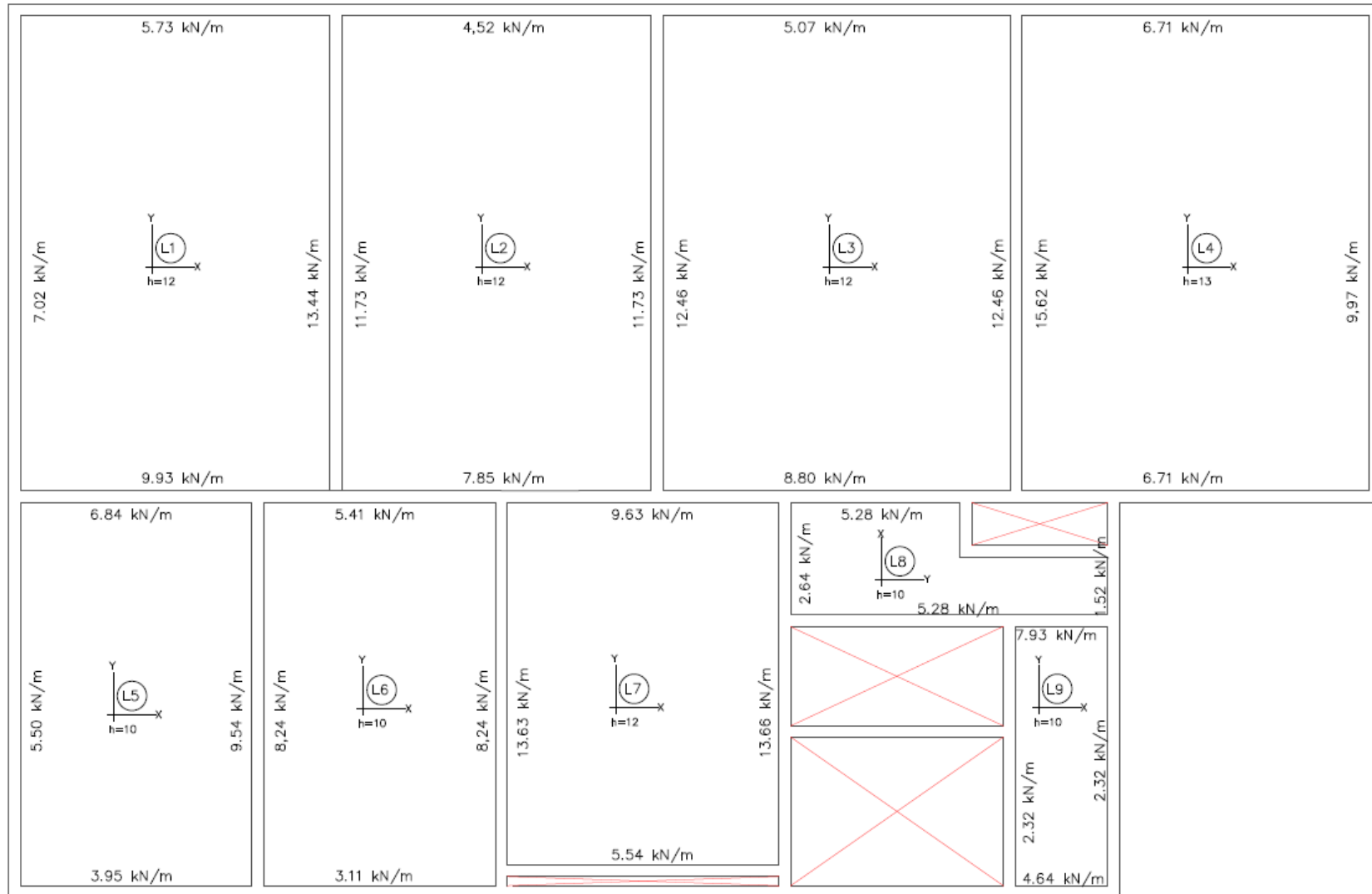
Fonte: a autora

Tabela 5 - Determinação das armaduras (continuação...)

Localização		A_{s-min} (cm^2/m)	A_{s-efet} (cm^2/m)	$S_{máx}$ (cm)	Ø 6,3 mm	Ø 8,0 mm	Ø 10,0 mm	Ø 12,5 mm	Armadura adotada
L6	M_x	1,01	1,86	20	17	20	20	20	Ø 8,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,50	4,10		8	12	19	20	Ø10,0 mm c/ 19,0
	M_y	1,01	1,01		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,50	2,71		11	18	20	20	Ø 10,0 mm c/ 20,0
L7	M_x	1,21	2,74	20	11	18	20	20	Ø 10,0 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,80	6,09		5	8	13	20	Ø 10,0 mm c/ 13,0
	M_y	1,21	1,24		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,80	4,40		7	11	19	20	Ø 10,0 mm c/ 19,0
L8	M_x	1,01	1,01	20	20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,50	1,50		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	M_y	1,01	1,01		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,50	1,50		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
L9	M_x	1,01	1,01	20	20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{x'}$	1,50	1,59		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	M_y	1,01	1,01		20	20	20	20	Ø 6,3 mm c/ 20,0
	$M_{y'}$	1,50	x-x-x		x-x-x	x-x-x	x-x-x	x-x-x	Ø 6,3 mm c/ 20,0

Fonte: a autora

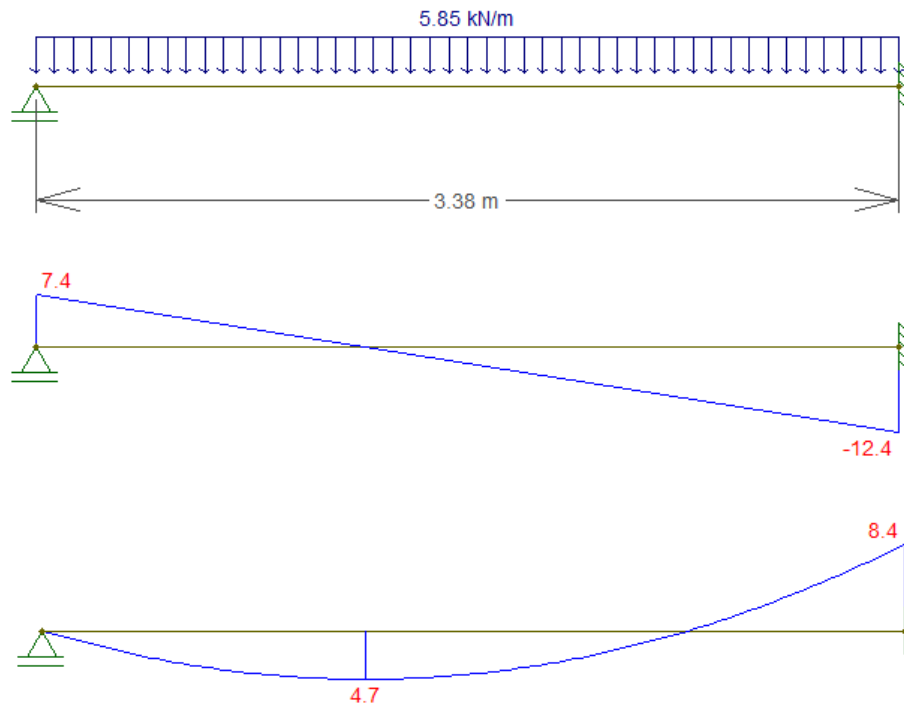
Figura 01 – Reações de apoio - laje maciça



Fonte: a autora

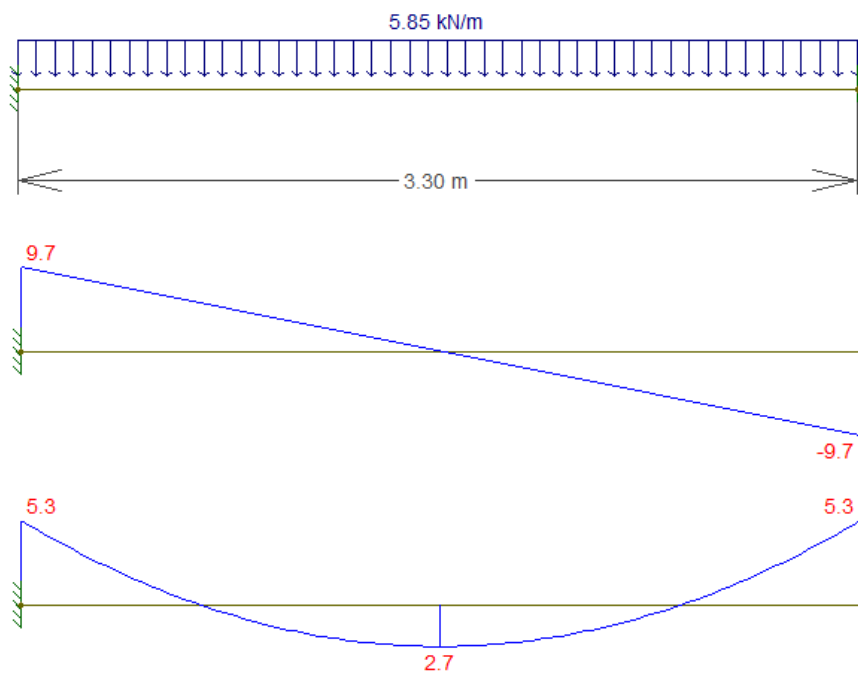
APÊNDICE B – Diagramas de esforço cortante e momento fletor das lajes mistas “Steel Deck”

Figura 01 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L1 (kN/m)



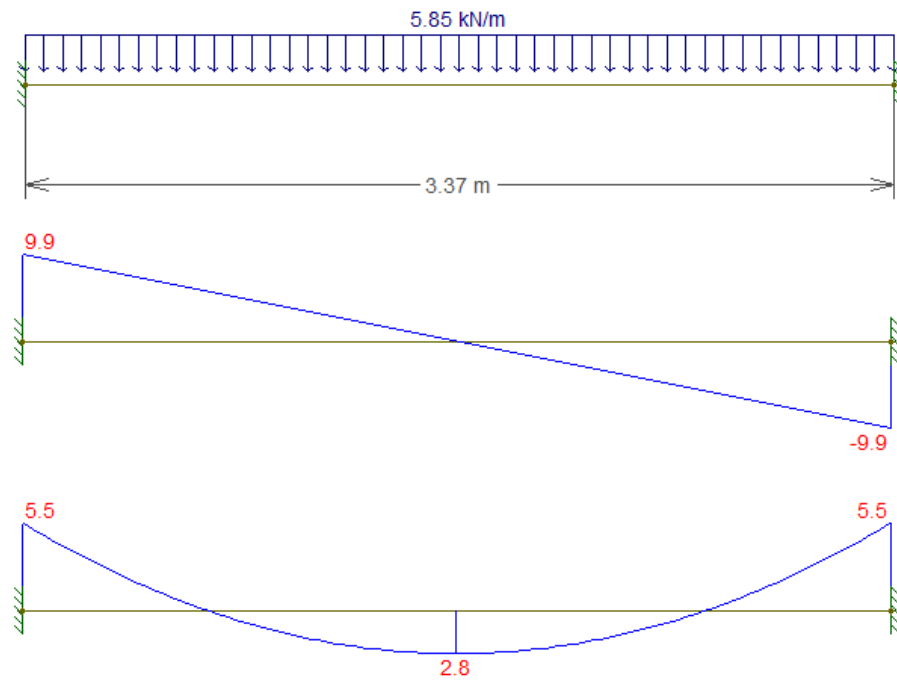
Fonte: a autora

Figura 02 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L2 (kN/m)



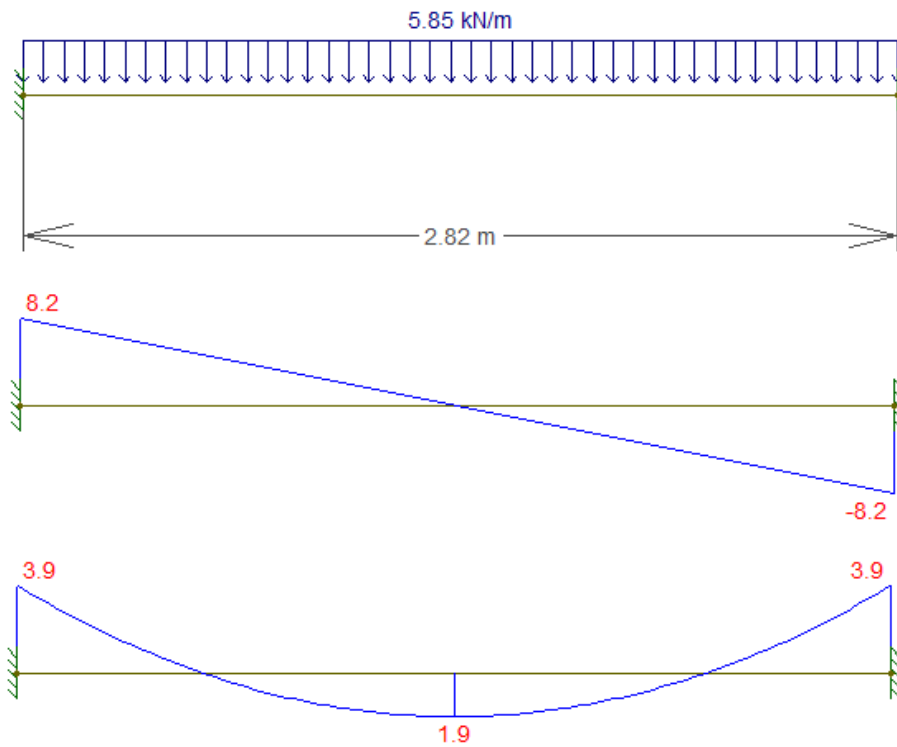
Fonte: a autora

Figura 49 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L3 (kN/m)



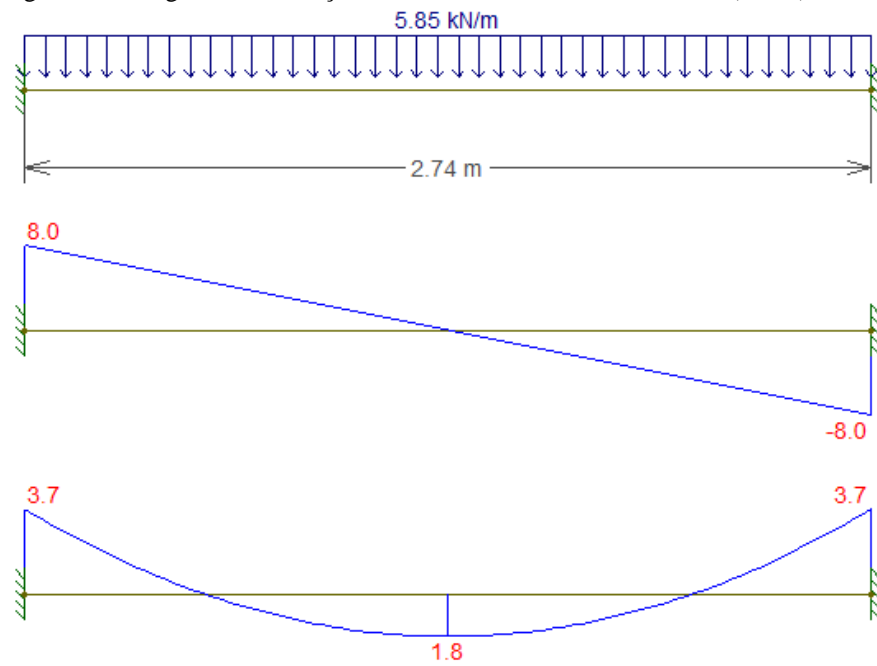
Fonte: a autora

Figura 50 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L4 (kN/m)



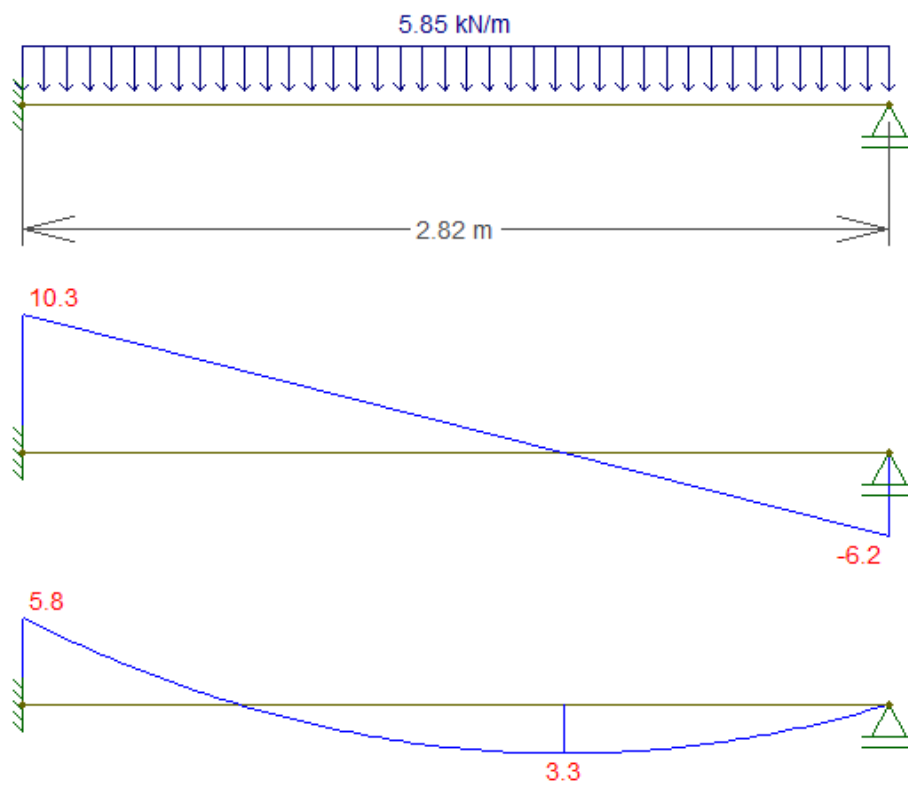
Fonte: a autora

Figura 05 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L5 e L6 (kN/m)



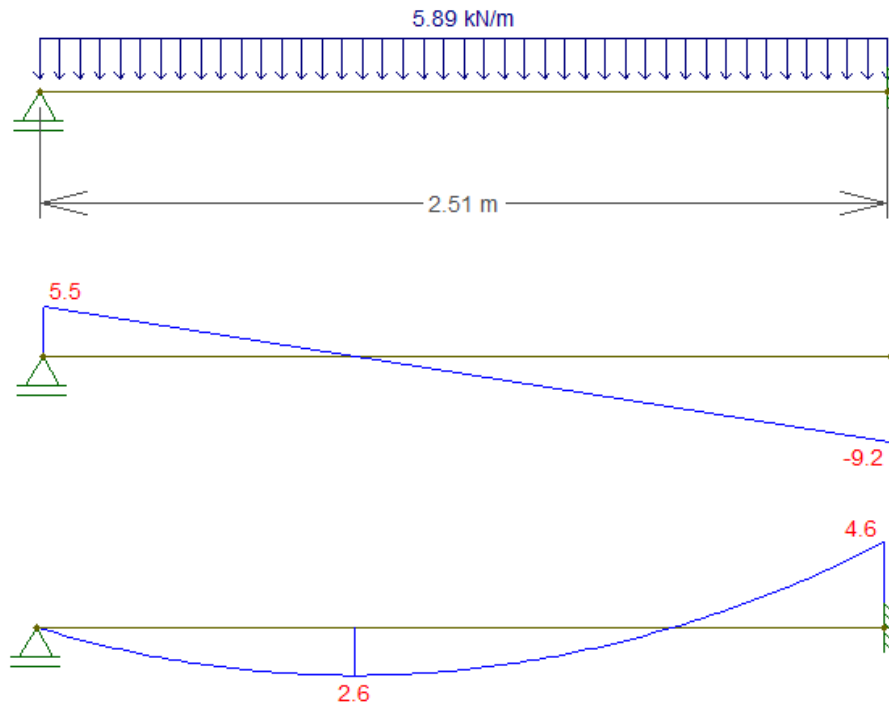
Fonte: a autora

Figura 06 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L7 (kN/m)



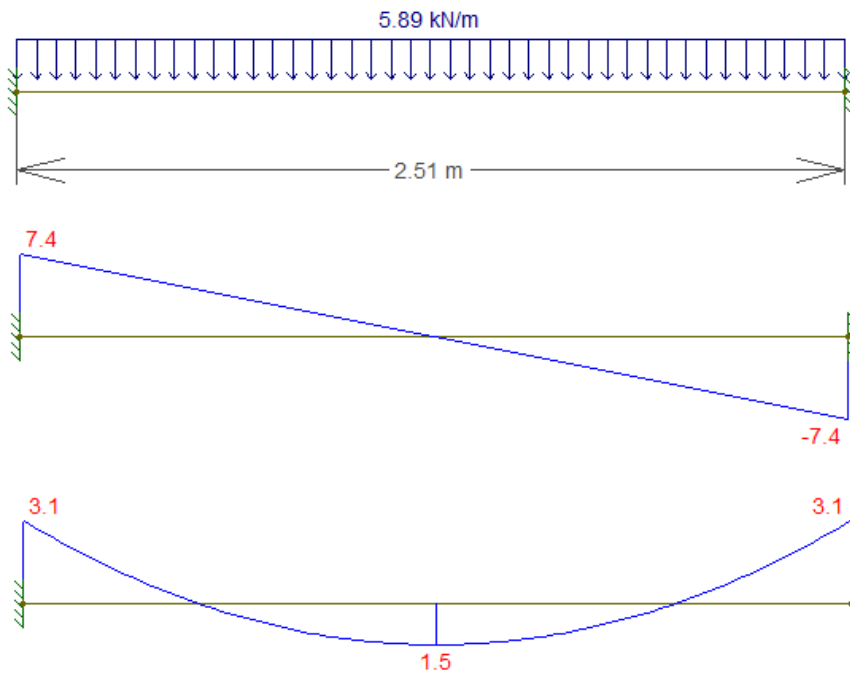
Fonte: a autora

Figura 07 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L8 (kN/m)



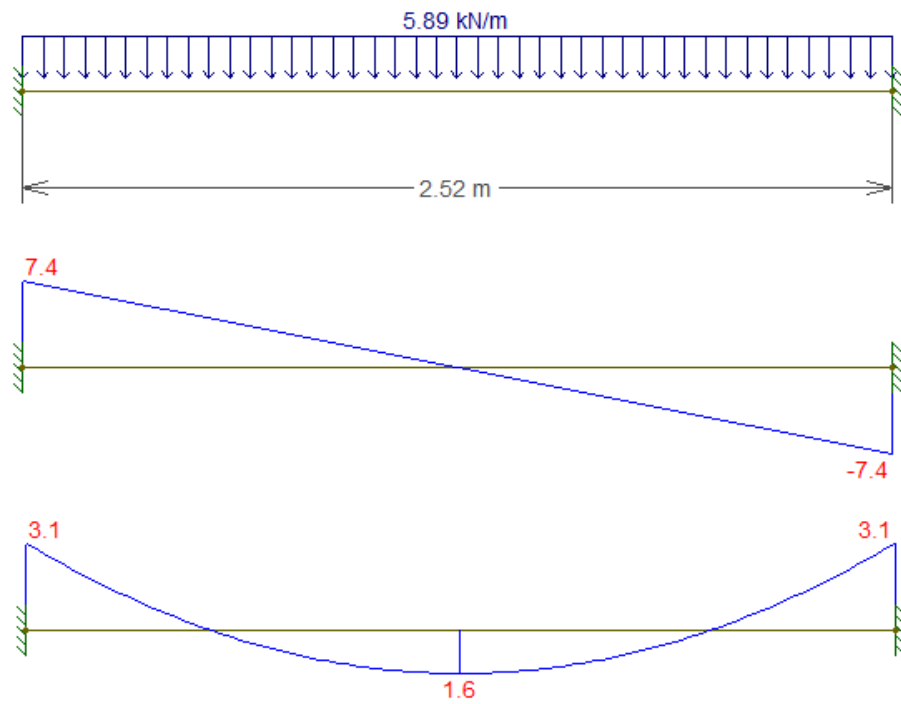
Fonte: a autora

Figura 51 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L9 (kN/m)



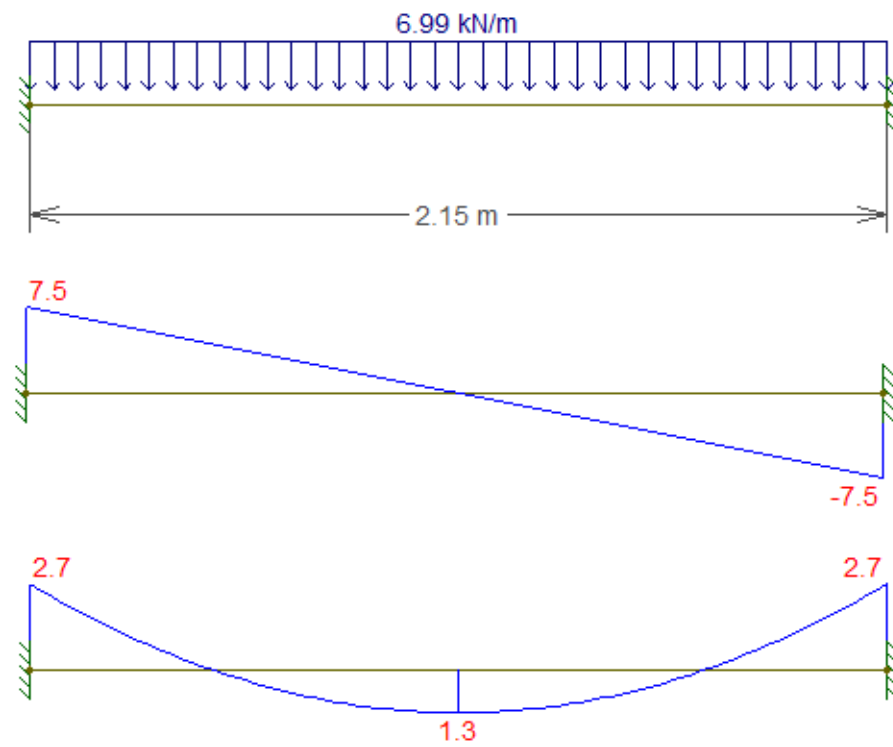
Fonte: a autora

Figura 09 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L10 (kN/m)



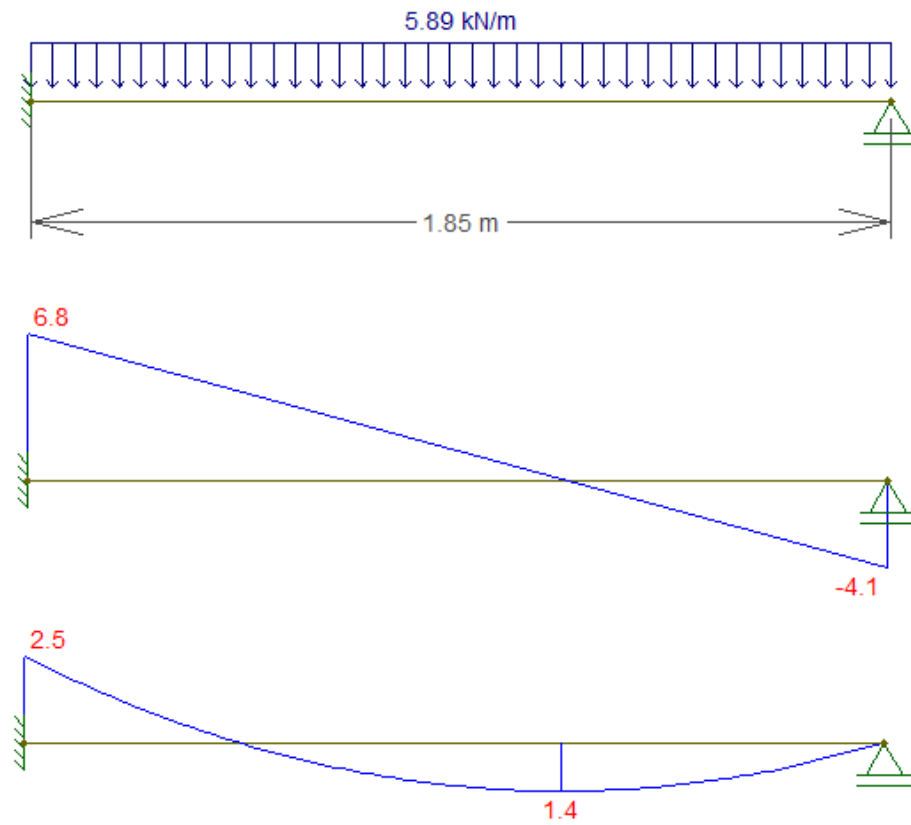
Fonte: a autora

Figura 10 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L11 e L12 (kN/m)



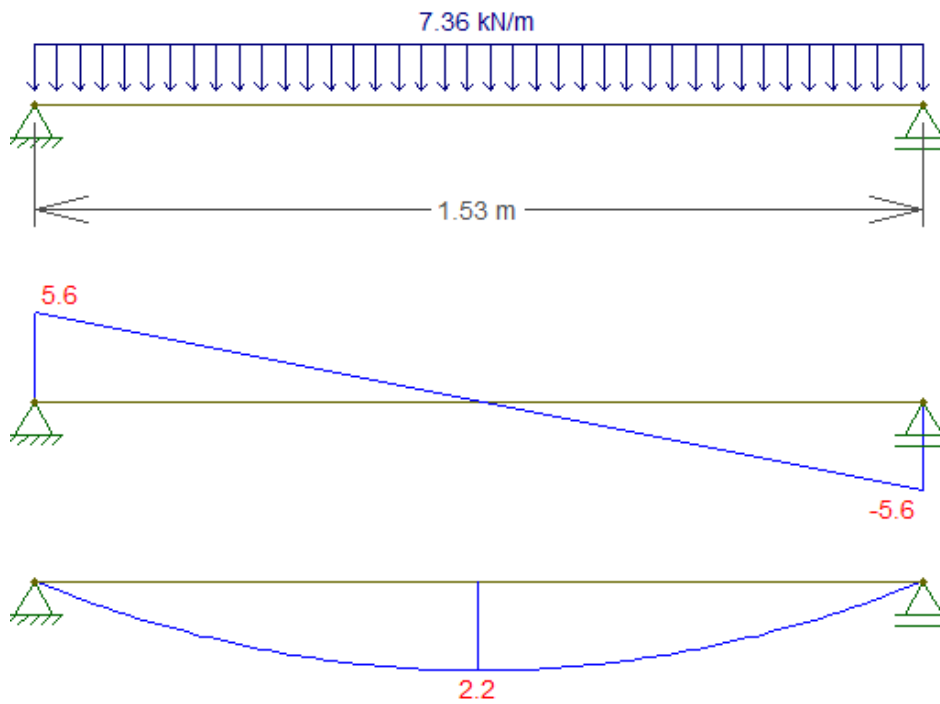
Fonte: a autora

Figura 11 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L13 (kN/m)



Fonte: a autora

Figura 12 - Diagrama de esforço cortante e momento fletor L14 (kN/m)



Fonte: a autora

APÊNDICE C – Planilhas para a determinação do peso total de aço das lajes maciças

Tabela 01 – Determinação do peso de aço da armadura positiva

Localização	Vão da Laje		Armadura Adotada				Comprimento das Barras		Quantidade de Barras		Peso Armadura Positiva (Kg)	
	l _x (m)	l _y (m)	l _x (m)		l _y (m)		l _x (m)	l _y (m)	x	y	l _x (m)	l _y (m)
			Ø (mm)	S (cm)	Ø (mm)	S (cm)						
L1	5,12	7,87	10,00	20,00	6,30	20,00	5,32	8,00	41,00	27,00	134,58	52,89
L2	5,13	7,87	8,00	20,00	6,30	20,00	5,29	8,00	41,00	27,00	85,67	52,89
L3	5,76	7,87	10,00	20,00	6,30	20,00	5,96	8,00	41,00	30,00	150,77	58,77
L4	5,76	7,87	10,00	20,00	8,00	20,00	5,96	8,03	41,00	30,00	150,77	95,16
L5	3,83	6,35	8,00	20,00	6,30	20,00	3,99	6,48	33,00	21,00	52,01	33,32
L6	3,84	6,35	8,00	20,00	6,30	20,00	4,00	6,48	33,00	21,00	52,14	33,32
L7	4,50	6,00	10,00	20,00	6,30	20,00	4,70	6,13	31,00	24,00	89,90	36,02
L8	1,85	5,25	6,30	20,00	6,30	20,00	1,98	5,38	28,00	11,00	13,56	14,49
L9	1,53	4,30	6,30	20,00	6,30	20,00	1,66	4,43	23,00	9,00	9,33	9,76
											Peso total (kg)	1125,35

Fonte: a autora

Tabela 02 - Determinação do peso de aço da armadura negativa

Barra	l* (m)	l* (m)	Comprimento das Barras			Total (m)	Trecho (m)	Armadura Adotada			Peso (Kg)
			Reto (cm)		Dobra (m)			Ø (mm)	S (cm)	Quantidade	
			0,25 . l* (m)	0,125 . l* (m)							
N1	7,92	-	2,00	0,00	0,28	2,28	5,17	6,30	10,00	53	29,61
N1	7,92	-	2,00	0,00	0,28	2,28	5,18	10,00	14,00	38	53,46
N1	7,92	-	2,00	0,00	0,28	2,28	5,81	10,00	11,00	54	75,97
N1	7,92	-	2,00	0,00	0,28	2,28	5,81	10,00	8,00	74	104,10
N2	5,17	-	1,00	0,00	0,28	1,28	7,92	10,00	14,00	58	45,81
N3	5,17	5,18	1,00	1,00	0,06	2,06	7,92	10,00	14,00	58	73,72
N3	5,18	5,81	1,00	1,00	0,06	2,06	7,92	10,00	16,00	51	64,82
N3	5,81	5,81	1,00	1,00	0,60	2,60	7,92	10,00	16,00	51	81,81
N2	5,81	-	1,00	0,00	0,28	1,28	7,92	10,00	20,00	41	32,38
N4	6,40	7,92	2,00	1,00	0,06	3,06	5,17	10,00	14,00	38	71,74
N4	6,40	7,92	2,00	1,00	0,06	3,06	5,18	10,00	13,00	41	77,41
N5	7,92	1,90	2,00	0,00	0,06	2,06	5,81	10,00	11,00	54	68,64
N1	7,92	-	2,00	0,00	0,28	2,28	5,81	10,00	8,00	74	104,10
N2	3,88	-	1,00	0,00	0,28	1,28	6,40	10,00	20,00	33	26,06
N3	3,88	3,89	1,00	0,00	0,06	1,06	6,40	10,00	20,00	33	21,58
N3	3,89	4,55	1,00	1,00	0,06	2,06	6,05	10,00	18,00	35	44,49
N3	4,55	5,30	1,00	1,00	0,06	2,06	1,90	10,00	18,00	12	15,25
N9	1,90	-	0,48	0,00	0,28	0,76	5,30	6,30	20,00	28	5,18
N11	1,00	4,50	0,25	1,00	0,06	1,31	1,75	6,30	20,00	10	3,21
N10	5,30	-	1,00	0,00	0,28	1,28	1,00	6,30	20,00	6	1,88
N1	6,40	-	2,00	0,00	0,28	2,28	3,88	10,00	14,00	29	40,80
N1	6,40	-	2,00	0,00	0,28	2,28	3,89	10,00	14,00	29	40,80
N1	6,05	-	2,00	0,00	0,28	2,28	4,55	10,00	13,00	36	50,64
N2	4,55	-	1,00	0,00	0,28	1,28	4,00	10,00	18,00	24	18,95
N12	1,75	-	0,44	0,00	0,28	0,72	4,50	6,30	20,00	24	4,22
N12	1,75	-	0,44	0,00	0,28	0,72	4,50	6,30	20,00	24	4,22
N13	4,50	-	1,00	0,00	0,28	1,28	1,58	6,30	20,00	9	2,82
										Peso total (Kg)	1163,66

Fonte: a autora

Tabela 03 - Determinação do peso de aço da armadura de distribuição

Localização	Vão da Laje		Armaura principal		ρ_{\min} (cm ² /m)	Direção X			Direção Y		
	l_x (m)	l_y (m)	$A_{s,x}$ (cm ² /m)	$A_{s,y}$ (cm ² /m)		0,2* $A_{s,x}$	Mínima	0,5* ρ_{\min}	0,2 * $A_{s,y}$	Mínima	0,5* ρ_{\min}
L1	5,12	7,87	3,35	1,57	0,15	0,67	0,90	0,08	0,31	0,90	0,04
L2	5,13	7,87	2,33	1,21	0,15	0,47	0,90	0,08	0,24	0,90	0,04
L3	5,76	7,87	3,04	1,43	0,15	0,61	0,90	0,08	0,29	0,90	0,04
L4	5,76	7,87	4,31	1,80	0,15	0,86	0,90	0,08	0,36	0,90	0,04
L5	3,83	6,35	2,40	1,01	0,15	0,48	0,90	0,08	0,20	0,90	0,04
L6	3,84	6,35	1,81	1,01	0,15	0,36	0,90	0,08	0,20	0,90	0,04
L7	4,50	6,00	2,69	1,22	0,15	0,54	0,90	0,08	0,24	0,90	0,04
L8	1,85	5,25	1,01	1,01	0,15	0,20	0,90	0,08	0,20	0,90	0,04
L9	1,53	4,30	1,01	1,01	0,15	0,20	0,90	0,08	0,20	0,90	0,04

Localização	As distribuição		Armadura Adotada				Comprimento das Barras				Quantidade de Barras		Peso Armadura Positiva (Kg)	
	X (cm ² /m)	Y (cm ² /m)	l_x (m)	l_y (m)	l_x (m)	l_y (m)	x	y	l_x (m)	l_y (m)				
L1	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	5,25	8,00	25,00	17,00	32,13	33,30		
L2	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	5,26	8,00	25,00	17,00	32,19	33,30		
L3	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	5,89	8,00	25,00	19,00	36,05	37,22		
L4	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	5,89	8,00	25,00	19,00	36,05	37,22		
L5	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	3,96	6,48	21,00	13,00	20,35	20,63		
L6	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	3,97	6,48	21,00	13,00	20,41	20,63		
L7	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	4,63	6,13	20,00	15,00	22,67	22,51		
L8	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	1,98	5,38	17,00	7,00	8,23	9,22		
L9	0,90	0,90	6,30	33,00	6,30	33,00	1,66	4,43	15,00	6,00	6,09	6,51		

Peso total (kg) 434,71

APÊNDICE D – Planilhas para a determinação do peso total de aço das lajes mistas “Steel Deck”

Tabela 01 – Determinação do volume de concreto das lajes mistas “Steel Deck”

Localização	Lx (m)	Ly (m)	Área (m²)	Especific. Fôrma	Consumo de concreto (m²/m)	Concreto (m³)
L1	3,38	7,87	26,60	MF - 75	0,11	2,99
L2	3,30	7,87	25,97	MF - 75	0,11	2,92
L3	3,37	7,87	26,52	MF - 75	0,11	2,98
L4	2,82	7,87	22,19	MF - 75	0,11	2,50
L5	2,74	7,87	21,56	MF - 75	0,11	2,43
L6	2,74	7,87	21,56	MF - 75	0,11	2,43
L7	2,82	7,87	22,19	MF - 75	0,11	2,50
L8	2,51	6,35	15,94	MF - 50	0,12	1,83
L9	2,44	6,35	15,49	MF - 50	0,12	1,78
L10	2,52	6,35	16,00	MF - 50	0,12	1,84
L11	2,15	6,00	12,90	MF - 50	0,12	1,48
L12	2,15	6,00	12,90	MF - 50	0,12	1,48
L13	1,85	5,25	9,71	MF - 50	0,12	1,12
L14	1,53	4,30	6,58	MF - 50	0,12	0,76
					Volume conc. (m³)	29,04

Fonte: a autora

Tabela 02 – Determinação do peso da tela soldada

Localização	Especific. Fôrma	Tela soldada	Composição	Peso (kg/m ²)	Aço (kg)
L1	MF - 75	Q - 75	Ø3,8 x Ø3,8 - 150 x 150	1,21	32,19
L2	MF - 75	Q - 75	Ø3,8 x Ø3,8 - 150 x 151	1,21	31,42
L3	MF - 75	Q - 75	Ø3,8 x Ø3,8 - 150 x 152	1,21	32,09
L4	MF - 75	Q - 75	Ø3,8 x Ø3,8 - 150 x 153	1,21	26,85
L5	MF - 75	Q - 75	Ø3,8 x Ø3,8 - 150 x 154	1,21	26,09
L6	MF - 75	Q - 75	Ø3,8 x Ø3,8 - 150 x 155	1,21	26,09
L7	MF - 75	Q - 75	Ø3,8 x Ø3,8 - 150 x 156	1,21	26,85
L8	MF - 50	Q - 92	Ø4,2 x Ø4,2 - 150 x 150	1,48	23,59
L9	MF - 50	Q - 92	Ø4,2 x Ø4,2 - 150 x 150	1,48	22,93
L10	MF - 50	Q - 92	Ø4,2 x Ø4,2 - 150 x 150	1,48	23,68
L11	MF - 50	Q - 92	Ø4,2 x Ø4,2 - 150 x 150	1,48	19,09
L12	MF - 50	Q - 92	Ø4,2 x Ø4,2 - 150 x 150	1,48	19,09
L13	MF - 50	Q - 92	Ø4,2 x Ø4,2 - 150 x 150	1,48	14,37
L14	MF - 50	Q - 92	Ø4,2 x Ø4,2 - 150 x 150	1,48	9,74
				Peso total Tela soldada (m²)	334,09

Fonte: a autora

Tabela 03 – Determinação do peso do “Steel Deck”

Localização	Especific. Fôrma	Espessura (mm)	Peso "Steel Deck" (kg/m ²)	Peso (kg)
L1	MF - 75	1,25	14,63	389,17
L2	MF - 75	1,25	14,63	379,96
L3	MF - 75	1,25	14,63	388,02
L4	MF - 75	1,25	14,63	324,69
L5	MF - 75	1,25	14,63	315,48
L6	MF - 75	1,25	14,63	315,48
L7	MF - 75	1,25	14,63	324,69
L8	MF - 50	1,25	13,11	208,95
L9	MF - 50	1,25	13,11	203,13
L10	MF - 50	1,25	13,11	209,79
L11	MF - 50	1,25	13,11	169,12
L12	MF - 50	1,25	13,11	169,12
L13	MF - 50	1,25	13,11	127,33
L14	MF - 50	1,25	13,11	86,25
Peso total "Steel Deck" (kg)				3611,16

Fonte: a autora

Tabela 04 – Determinação do peso da armadura negativa

Barra	l* (m)	l* (m)	Comprimento Reto		Dobra (m)	Total (m)	Trecho (m)	Ø (mm)	S (mm)	Quantidade	Peso (kg)
			0,25 . l* (m)	0,125 . l* (m)							
N1	3,38	3,3	0,85	0,41	0,06	1,32	7,87	10	20	41	33,33
N2	3,3	3,37	0,83	0,42	0,06	1,31	7,87	8	20	41	21,15
N3	3,37	2,82	0,84	0,35	0,06	1,26	7,87	8	20	41	20,32
N4	2,82	2,74	0,71	0,34	0,06	1,11	7,87	8	20	41	17,94
N4	2,74	2,74	0,69	0,34	0,06	1,09	7,87	8	20	41	17,61
N4	2,74	2,82	0,69	0,35	0,06	1,10	7,87	8	20	41	17,77
N5	2,51	2,44	0,63	0,31	0,06	0,99	6,35	8	20	33	12,94
N5	2,44	2,52	0,61	0,32	0,06	0,99	6,35	8	20	33	12,84
N6	2,52	2,15	0,63	0,27	0,06	0,96	6,35	8	20	33	12,50
N7	2,15	2,15	0,54	0,27	0,06	0,87	6,35	8	20	33	11,29
N3	2,15	5,25	0,54	0,66	0,06	1,25	1,85	8	20	11	5,45
N8	1,85	7,87	0,46	0,98	0,06	1,51	2,80	8	20	15	8,92
										Peso total Armadura negativa (kg)	192,07

Fonte: a autora

APÊNDICE E – Planilhas de composição de preço unitário

Tabela 01 – CPU para laje mista chapa metálica MF-50, com capa de concreto

FCK=25Mpa - unidade: m²

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	UNID.	QUANT.	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL	
1	Mão-de-obra					
1.1	Montador de estrutura metálica	h	0,17	R\$ 8,70	R\$	1,48
1.2	Pedreiro	h	0,82	R\$ 14,81	R\$	12,14
1.3	Servente	h	0,85	R\$ 9,67	R\$	8,22
				Subtotal 1	R\$	21,84
2	Materiais					
2.1	Fôrma metálica MF-50 trapezoidal para laje (espessura:1,25 mm)	m ²	1,00	R\$ 78,68	R\$	78,68
2.2	Tela de aço CA-60 Q-92 (diâmetro do fio: 4,2 mm / dimensões da trama: 150x 150 mm / tipo da malha: quadrangular)	kg	1,05	R\$ 5,12	R\$	5,38
2.3	Concreto dosado em central convencional brita 1 e 2 (resistência: 25 Mpa), incluindo bombeamento	m ³	0,11	R\$ 266,67	R\$	30,13
				Subtotal 2	R\$	114,19
3.	Ferramentas/equipamentos					
3.1	-				R\$	-
				Subtotal 3	R\$	-
4	Outros					
4.1	-				R\$	-
				Subtotal 4	R\$	-
				CUSTO UNITÁRIO	R\$	136,03

Fonte: a autora

**Tabela 02 – CPU para laje mista chapa metálica MF-75, com capa de concreto
FCK=25Mpa - unidade: m²**

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	UNID.	QUANT.	VALOR UNIT.		VALOR TOTAL	
1	Mão-de-obra						
1.1	Montador de estrutura metálica	h	0,17	R\$	8,70	R\$	1,48
1.2	Pedreiro	h	0,82	R\$	14,81	R\$	12,14
1.3	Servente	h	0,85	R\$	9,67	R\$	8,22
					Subtotal 1	R\$	21,84
2	Materiais						
2.1	Fôrma metálica MF-50 trapezoidal para laje (espessura:1,25 mm)	m ²	1,00	R\$	90,56	R\$	90,56
2.2	Tela de aço CA-60 Q-75 (diâmetro do fio: 3,8 mm / dimensões da trama: 150x 150 mm / tipo da malha: quadrangular)	kg	1,05	R\$	5,96	R\$	6,26
2.3	Concreto dosado em central convencional brita 1 e 2 (resistência: 25 Mpa), incluindo bombeamento	m ³	0,11	R\$	266,67	R\$	30,13
					Subtotal 2	R\$	126,95
3.	Ferramentas/equipamentos						
3.1	-					R\$	-
					Subtotal 3	R\$	-
4	Outros						
4.1	-					R\$	-
					Subtotal 4	R\$	-
CUSTO UNITÁRIO						R\$	148,79

Tabela 03– CPU para fôrma feita em obra para LAJES, com chapa compensada plastificada, e = 12 mm (3 reaproveitamentos)

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	UNID.	QUANT.	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
1	Mão-de-obra				
1.1	Ajudante de carpinteiro	h	0,21	R\$ 11,13	R\$ 2,29
1.2	Carpinteiro de fôrmas	h	0,82	R\$ 14,81	R\$ 12,20
				Subtotal 1	R\$ 14,50
2	Materiais				
2.1	Chapa compensada plastificada (espessura: 12 mm)	m ²	0,42	R\$ 18,39	R\$ 7,65
2.2	Pontalete 3" x 3" (altura: 75.00 mm / largura: 75.00 mm)	m	2,60	R\$ 9,41	R\$ 24,47
2.3	Tábua 1" x 8" (espessura: 25 mm / largura: 200 mm)	m	0,89	R\$ 8,83	R\$ 7,82
2.4	Desmoldante de fôrmas de madeira para concreto	l	0,02	R\$ 5,08	R\$ 0,10
2.5	Prego 15 x 15 com cabeça (comprimento: 34,5 mm /diâmetro da cabeça: 2,4 mm)	kg	0,05	R\$ 8,67	R\$ 0,43
				Subtotal 2	R\$ 39,94
3.	Ferramentas/equipamentos				
3.1	-				R\$ -
				Subtotal 3	R\$ -
4	Outros				
4.1	-				R\$ -
				Subtotal 4	R\$ -
				CUSTO UNITÁRIO	R\$ 54,44

Tabela 04– CPU para armadura de aço para estruturas em geral, CA-25, diâmetro até 10 mm, corte e dobra na obra - unidade: kg

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	UNID.	QUANT.	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL	
1	Mão-de-obra					
1.1	Ajudante de armador	h	0,08	R\$ 11,13	R\$	0,89
1.2	Armador	h	0,08	R\$ 14,81	R\$	1,18
				Subtotal 1	R\$	2,08
2	Materiais					
2.1	Espaçador circular de plástico para pilares, fundo e laterais de vigas, lajes, pisos e estacas	un	11,40	R\$ 0,10	R\$	1,14
2.2	Barra de aço CA-50 3/8" (bitola: 10,00 mm / massa linear: 0,617 kg/m)	kg	1,10	R\$ 3,71	R\$	4,08
2.3	Arame recozido (diâmetro do fio: 1,25 mm / bitola: 18 BWG)	kg	0,02	R\$ 7,00	R\$	0,14
				Subtotal 2	R\$	5,36
3.	Ferramentas/equipamentos					
3.1	-				R\$	-
				Subtotal 3	R\$	-
4	Outros					
4.1	-				R\$	-
				Subtotal 4	R\$	-
				CUSTO UNITÁRIO	R\$	7,44

Tabela 05 – CPU para concreto estrutural dosado em central - unidade: m³

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	UNID.	QUANT.	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
1	Mão-de-obra				
1.1	Servente	h	1,65	R\$ 11,13	R\$ 18,36
1.2	Pedreiro	h	4,50	R\$ 14,81	R\$ 66,65
				Subtotal 1	R\$ 85,01
2	Materiais				
2.1	Concreto dosado em central convencional brita 1 e 2	m ³	1,05	R\$ 228,60	R\$ 240,03
				Subtotal 2	R\$ 240,03
3.	Ferramentas/equipamentos				
3.1	-				R\$ -
				Subtotal 3	R\$ -
4	Outros				
4.1	-				R\$ -
				Subtotal 4	R\$ -
				CUSTO UNITÁRIO	R\$ 325,04

Tabela 06 – CPU para escoramento em madeira para lajes – unidade: m²

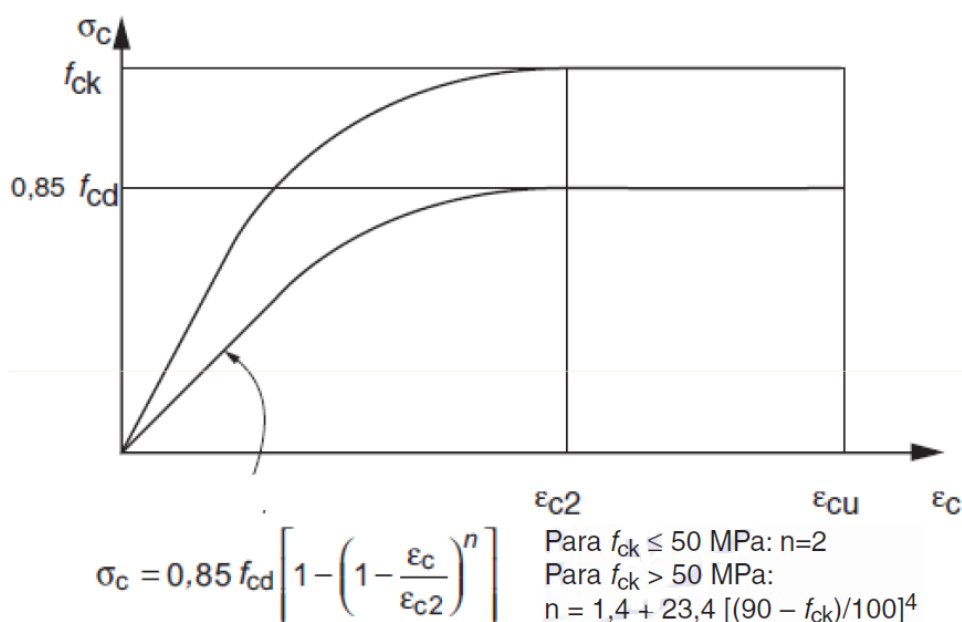
ITEM	DISCRIMINAÇÃO	UNID.	QUANT.	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
1	Mão-de-obra				
1.1	Carpinteiro	h	0,21	R\$ 11,13	R\$ 2,28
1.2	Ajudante de carpinteiro	h	0,05	R\$ 14,81	R\$ 0,76
				Subtotal 1	R\$ 3,04
2	Materiais				
2.1	Prego 17 x 27 com cabeça dupla (comprimento: 62,1 mm 7 diâmetro da cabeça: 3.0 mm)	kg	0,03	R\$ 8,02	R\$ 0,24
2.2	Pontaletes 3" x 3" (altura: 75.00 mm / largura: 75.00 mm)	m	3,40	R\$ 9,41	R\$ 31,99
2.3	Sarrafo 1" x 3" (altura: 75 mm / espessura: 25 mm)	m	0,36	R\$ 3,87	R\$ 1,39
2.4	Tábua 1" x 8" (espessura: 25 mm / largura: 200 mm)	m	1,30	R\$ 7,16	R\$ 9,31
				Subtotal 2	R\$ 42,94
3.	Ferramentas/equipamentos				
3.1	-				R\$ -
				Subtotal 3	R\$ -
4	Outros				
4.1	-				R\$ -
				Subtotal 4	R\$ -
				CUSTO UNITÁRIO	R\$ 45,97

ANEXO A – Diagramas tensão-deformação

1 Compressão

Para análises no estado-limite último, pode ser empregado o diagrama tensão-deformação idealizado mostrado na figura 01.

Figura 01 – Diagrama tensão-deformação idealizado



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, p.26)

Os valores a serem adotados para os parâmetros ϵ_{c2} (deformação específica do encurtamento do concreto no início do patamar plástico) e ϵ_{cu} (deformação específica do encurtamento do concreto na ruptura) são definidos a seguir: (ABNT NBR 6118, 2014, p.26)

- para concretos de classe até C50:

$$\epsilon_{c2} = 2,0 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$$

- para concretos de classe até C55 a C90:

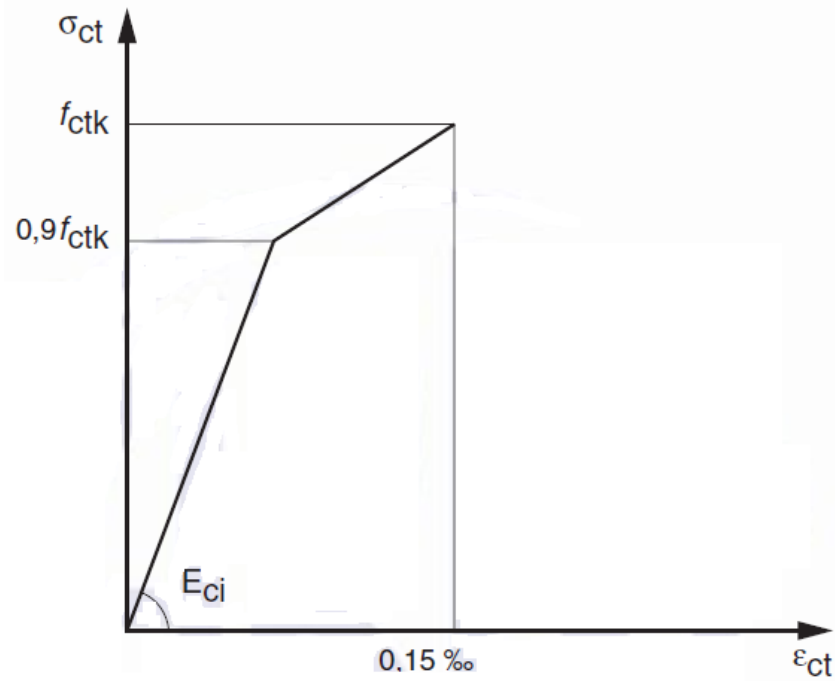
$$\epsilon_{c2} = 2,0 \text{ ‰} + 0,085 \text{ ‰} \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53}$$

$$\epsilon_{cu} = 2,6 \text{ ‰} + 3,5 \text{ ‰} \cdot [(90 - f_{ck})/100]^4$$

2 Tração

Para o concreto não fissurado, pode ser adotado o diagrama tensão-deformação bilinear de tração, indicado na figura 02.

Figura 01 – Diagrama tensão-deformação bilinear de tração



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, p.27)

ANEXO B – Tabela de peso específico dos materiais de construção

Tabela 01 – Peso específico dos materiais de construção

	Materiais	Peso específico aparente (kN/m ³)
Rochas	Arenito	26
	Basalto	30
	Gnaisse	30
	Granito	28
	Mármore e Calcário	28
Blocos artificiais	Blocos de argamassa	22
	Cimento amianto	20
	Lajotas cerâmicas	18
	Tijolos furados	13
	Tijolos maciços	18
	Tijolos sílico-calcáreos	20
Revestimentos e concretos	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cimento e areia	21
	Argamassa de gesso	12,5
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25
Madeiras	Pinho, Cedro	5
	Louro, imbuia, pau óleo	6,5
	Guajuvirá, guatambu, grápia	8
	Angico, cabriúva, ipê róseo	10
Metais	Aço	78,5
	Alumínio e ligas	28
	Bronze	85
	Chumbo	114
	Cobre	89
	Ferro fundido	72,5
	Estanho	74
	Latão	85
	Zinco	75
Materiais diversos	Alcatrão	12
	Asfalto	13
	Borracha	17
	Papel	15
	Plástico	21
	Vidro plano	26

Fonte: ABNT NBR 6120 (1980, p.2)

ANEXO C – Tabela de ações de uso

Tabela 01 – Valores mínimos das ações verticais

Local		Ação (kN/m ²)
Arquibancadas	-	4
Balcões	Mesma carga da peça com a qual se comunicam e as previstas em 2.2.1.5	-
Bancos	Escritórios e banheiro	2
Bibliotecas	Salas de diretoria e de gerência	1,5
	Sala de leitura	2,5
	Sala para depósito de livros	4
	Sala com estantes de livros, a ser determinada, ou 2,5 kN/m ² por metro de altura, observando, porém o valor mínimo de	6
Casa de máquinas	(incluindo o peso das máquinas) a ser determinada em cada caso, porém com o valor mínimo de	7,5
Cinemas	Plateia com assentos fixos	3
	Estúdio e plateia com assentos móveis	4
	Banheiro	2
Clubes	Sala de refeições e de assembleia com assentos fixos	3
	Sala de assembleia com assentos móveis	4
	Salão de danças e salão de esportes	5
	Sala de bilhar e banheiro	2
Corredores	Com acesso ao público	3
	Sem acesso ao público	2
Cozinhas residenciais não	A ser determinada em cada caso e na falta de valores experimentais conforme o indicado em 2.2.1.3	3
Depósitos	A ser determinada em cada caso e na falta de valores experimentais conforme o indicado em 2.2.1.3	-
Edifícios residenciais	Dormitórios, Sala, copa, cozinha e banheiro.	1,5
	Dispensa, área de serviço e lavadeira.	2
Escadas	Com acesso ao público	3
	Sem acesso ao público	2,5
Escolas	Anfiteatro com assentos fixos	3
	Corredor e sala de aula	3
	outras salas	2
Escritórios	Salas de uso geral e banheiro	2
Forros	Sem acesso a pessoas	0,5
Galerias de arte	A ser determinada em cada caso, porém com o mínimo	3
Galerias de lojas	A ser determinada em cada caso, porém com o mínimo	3

Fonte: ABNT NBR 6120 (1980, p.3-4)

Tabela 01 – Valores mínimos das ações verticais (continuação...)

Local		Ação (kN/m²)
Garagens e estacionamentos	Para veículos de passageiros ou semelhantes com carga máxima de 25 kN por veículo, valores de ϕ indicados em 2.2.1.6	3
Ginásios de esportes	-	5
Hospitais	Dormitórios, enfermarias, salas de recuperação, sala de cirurgia, sala de raio X e banheiro	2
	Corredor	3
Laboratórios	Incluindo equipamentos, a ser determinada, porém com o mínimo de	3
Lavadeiras	Incluindo equipamentos	3
Lojas	-	4
Restaurantes	-	3
Teatros	Palco	5
	Demais dependências: cargas iguais às especificadas para cinemas	-
Terraços	Sem acesso ao público	2
	Com acesso ao público	3
	Inacessível a pessoas	0,5
	Destinados a heliportos elevados: as cargas deverão ser fornecidas pelo órgão competente do ministério da aeronáutica	-
Vestíbulo	Sem acesso ao público	1,5
	Com acesso ao público	3

Fonte: ABNT NBR 6120 (1980, p.3-4)

ANEXO D – Coeficiente α para o cálculo da flecha elástica nas lajes maciças

A tabela 01 apresenta os coeficientes α para o cálculo de flechas elásticas. Para encontrar o coeficiente correto, de acordo com Carvalho (2014, p.331) deve-se calcular o parâmetro λ , dado por:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$$

Em que:

l_y – maior dimensão da superfície da placa;

l_x -menor dimensão da superfície da placa.

Tabela 01 - Coeficientes α para o cálculo de flechas elásticas em lajes retangulares submetidas a carregamento uniformemente distribuído.

λ	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
1,00	4,67	3,20	3,20	2,42	2,21	2,21	1,84	1,81	1,46
1,05	5,17	6,61	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	4,20	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	10,45	9,19	5,26	4,97	8,06	2,88	4,63	2,81	2,76
1,80	10,71	9,52	5,36	5,07	8,43	2,89	4,75	2,83	2,80
1,85	10,96	9,82	5,43	5,16	8,77	2,89	4,87	2,85	2,83
1,90	11,21	10,11	5,50	5,23	9,08	2,90	4,98	2,87	2,85
1,95	11,44	10,39	5,58	5,31	9,41	2,90	5,08	2,89	2,88
2,00	11,68	10,68	5,66	5,39	9,72	2,91	5,19	2,91	2,91
∞	15,35	15,35	6,38	6,38	15,35	3,07	6,38	3,07	3,07

Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 332)

ANEXO E – Coeficientes $\mu_x, \mu_y, \mu'_x, \mu'_y$ para o cálculo de momentos máximos nas lajes maciças

Para encontrar o coeficiente correto deve-se utilizar o parâmetro λ , dado por:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$$

Em que:

l_y – maior dimensão da superfície da placa;

l_x – menor dimensão da superfície da placa.

Tabela 01 - Coeficientes $\mu_x, \mu_y, \mu'_x, \mu'_y$ para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas. (Casos 1,2 e 3)

λ	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	μ_x	μ_y	μ_x	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y
1,00	4,41	4,41	3,07	3,94	8,52	3,94	8,52	3,07
1,05	4,80	0,45	3,42	3,78	8,79	4,19	8,91	2,84
1,10	5,18	4,49	3,77	3,90	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	0,48	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	5,60	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	4,18	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
∞	12,57	3,77	9,18	3,80	12,20	7,61	12,76	1,48

Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 333-334)

Tabela 02 - Coeficientes $\mu_x, \mu_y, \mu'_x, \mu'_y$ para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas. (Casos 4,5 e 6)

λ	Caso 4				Caso 5			Caso 6		
	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_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	4,15	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	4,50	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	3,99	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
∞	7,06	12,50	1,95	8,20	12,58	4,13	11,88	4,18	8,33	0,97

Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 334-335)

Tabela 03 - Coeficientes $\mu_x, \mu_y, \mu'_x, \mu'_y$ para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas. (Casos 7,8 e 9)

λ	Caso 7				Caso 8				Caso 9			
	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	$\mu_{y'}$	μ_x	$\mu_{x'}$	μ_y	$\mu_{y'}$
1,00	2,13	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	6,45	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	5,70	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	7,70	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	5,70
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	2,36	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
∞	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: (CARVALHO, 2014, p. 335-336)

ANEXO F – Coeficientes Ψ_2 e Ψ_3 pré-dimensionamento da altura da laje maciça

O coeficiente Ψ_2 depende das condições de vinculação e dimensões da laje:

Tabela 01 - Coeficientes Ψ_2 utilizado no pré-dimensionamento da altura das lajes

λ	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
1,00	1,50	1,70	1,70	1,80	1,90	1,90	2,00	2,00	2,20
1,05	1,48	1,67	1,69	1,78	1,87	1,89	1,97	1,99	2,18
1,10	1,46	1,64	1,67	1,76	1,83	1,88	1,94	1,97	2,15
1,15	1,44	1,61	1,66	1,74	1,80	1,87	1,91	1,96	2,13
1,20	1,42	1,58	1,64	1,72	1,76	1,86	1,88	1,94	2,10
1,25	1,40	1,55	1,63	1,70	1,30	1,85	1,85	1,93	2,08
1,30	1,38	1,52	1,61	1,68	1,69	1,84	1,82	1,91	2,05
1,35	1,36	1,49	1,60	1,66	1,66	1,83	1,79	1,90	2,03
1,40	1,34	1,46	1,58	1,64	1,62	1,82	1,76	1,88	2,00
1,45	1,32	1,43	1,57	1,62	1,59	1,81	1,30	1,87	1,98
1,50	1,30	1,40	1,55	1,60	1,55	1,80	1,70	1,85	1,95
1,55	1,28	1,37	1,54	1,58	1,52	1,79	1,67	1,84	1,93
1,60	1,26	1,34	1,52	1,56	1,48	1,78	1,64	1,82	1,90
1,65	1,24	1,31	1,51	1,54	1,45	1,77	1,61	1,81	1,88
1,70	1,22	1,28	1,49	1,52	1,41	1,76	1,58	1,79	1,85
1,75	1,20	1,25	1,48	1,50	1,38	1,75	1,55	1,78	1,83
1,80	1,18	1,22	1,46	1,48	1,34	1,74	1,52	1,76	1,80
1,85	1,16	1,19	1,45	1,46	1,31	1,73	1,49	1,75	1,78
1,90	1,14	1,16	1,43	1,44	1,27	1,72	1,46	1,73	1,75
1,95	1,12	1,13	1,42	1,42	1,24	1,71	1,43	1,72	1,73
2,00	1,10	1,10	1,40	1,40	1,20	1,70	1,40	1,70	1,7

Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 339)

Tabela 02 - Coeficientes Ψ_3 utilizado no pré-dimensionamento da altura das lajes

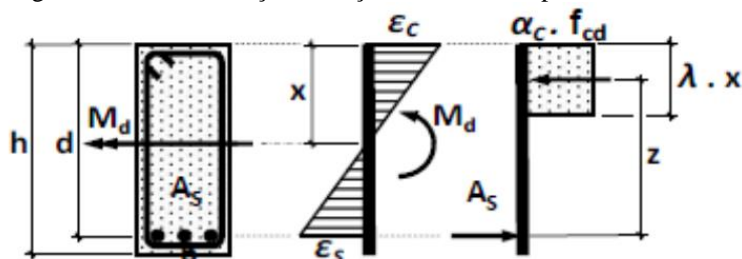
Aço	Lajes maciças
CA25	35,00
CA32	33,00
CA40	30,00
CA50	25,00
CA60	20,00

Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 340)

ANEXO G – KMD, K_x e K_z para o cálculo da armadura longitudinal da laje maciça

Para encontrar o valor de K_z a ser utilizado para o cálculo da área de aço da laje maciça, deve-se encontrar o KMD e o K_x pelas fórmulas abaixo e pela figura 01.

Figura 01 - Caracterização da seção na flexão simples



Fonte: (FARIA, 2015)

a) Equação adimensional relacionada ao momento de cálculo (M_d):

$$KMD = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

Em que:

$M_d = M \cdot 1,4$ – Momento fletor solicitante de cálculo

b_w – largura da seção transversal de vigas de seção retangular ou da nervura (parte mais estreita da seção transversal), para lajes maciças adotar 100 cm

d – altura útil

$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$ – Tensão de compressão no concreto de cálculo

f_{ck} – Tensão de compressão característica do concreto

b) Equação adimensional relacionada ao braço de alavanca (K_z):

$$K_z = 1 - 0,4 \cdot k_x$$

c) Equação adimensional que relaciona as deformações com a altura da linha neutra (K_x):

$$K_x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

Em que:

ε_c – Deformação no concreto

ε_s – Deformação no aço

A tabela 01 apresenta os valores de K_x , K_z , ε_c e ε_s para as variações do KMD:

Tabela 01 – Valores para o cálculo de armadura longitudinal de seções retangulares para concretos até a classe C50

KMD	K_x	K_z	ε_c (%)	ε_s (%)
0,0100	0,0148	0,9941	0,1502	10,0000
0,0200	0,0298	0,9881	0,3068	10,0000
0,0400	0,0603	0,9759	0,6414	10,0000
0,0500	0,0758	0,9697	0,8205	10,0000
0,0550	0,0837	0,9665	0,9133	10,0000
0,0600	0,0916	0,9634	1,0083	10,0000
0,0650	0,0996	0,9602	1,1056	10,0000
0,0700	0,1076	0,9570	1,2054	10,0000
0,0750	0,1156	0,9537	1,3077	10,0000
0,0800	0,1238	0,9505	1,4126	10,0000
0,0850	0,1320	0,9472	1,5203	10,0000
0,0900	0,1402	0,9439	1,6308	10,0000
0,0950	0,1485	0,9406	1,7444	10,0000
0,1000	0,1569	0,9372	1,8611	10,0000
0,1100	0,1739	0,9305	2,1044	10,0000
0,1150	0,1824	0,9270	2,2314	10,0000
0,1200	0,1911	0,9236	2,3621	10,0000
0,1250	0,1998	0,9201	2,4967	10,0000
0,1300	0,2086	0,9166	2,6355	10,0000
0,1350	0,2174	0,9130	2,7786	10,0000
0,1400	0,2264	0,9094	2,9263	10,0000
0,1450	0,2354	0,9058	3,0787	10,0000
0,1500	0,2445	0,9022	3,2363	10,0000
0,1550	0,2537	0,8985	3,3991	10,0000
0,1600	0,2630	0,8948	3,5000	9,8104
0,1650	0,2723	0,8911	3,5000	9,3531
0,1700	0,2818	0,8873	3,5000	8,9222
0,1750	0,2913	0,8835	3,5000	8,5154
0,1800	0,3009	0,8796	3,5000	8,1306
0,1850	0,3107	0,8757	3,5000	7,7662
0,1900	0,3205	0,8718	3,5000	7,4204
0,2000	0,3405	0,8638	3,5000	6,7793
0,2050	0,3507	0,8597	3,5000	6,4814
0,2100	0,3609	0,8556	3,5000	6,1971

Fonte: (CARVALHO, 2014, p.142-143)

Tabela 01 – Valores para o cálculo de armadura longitudinal de seções retangulares para concretos até a classe C50 (continuação...)

KMD	K_x	K_z	ϵ_c (‰)	ϵ_s (‰)
0,2150	0,3713	0,8515	3,5000	5,9255
0,2200	0,3819	0,8473	3,5000	5,6658
0,2250	0,3925	0,8430	3,5000	5,4170
0,2300	0,4033	0,8387	3,5000	5,1785
0,2350	0,4142	0,8343	3,5000	4,9496
0,2400	0,4253	0,8299	3,5000	4,7297
0,2450	0,4365	0,8254	3,5000	4,5181
0,2500	0,4479	0,8208	3,5000	4,3144
0,2550	0,4594	0,8162	3,5000	4,1181
0,2600	0,4711	0,8115	3,5000	3,9287
0,2650	0,4830	0,8068	3,5000	3,7459
0,2700	0,4951	0,8020	3,5000	3,5691
0,2750	0,5074	0,7970	3,5000	3,3981
0,2800	0,5199	0,7921	3,5000	3,2324
0,2850	0,5326	0,7870	3,5000	3,0719
0,2900	0,5455	0,7818	3,5000	2,9162
0,2950	0,5587	0,7765	3,5000	2,7649
0,3000	0,5721	0,7712	3,5000	2,6179
0,3050	0,5858	0,7657	3,5000	2,4748
0,3100	0,5998	0,7601	3,5000	2,3355
0,3150	0,6141	0,7544	3,5000	2,1997
0,3200	0,6287	0,7485	3,5000	2,0672
0,3300	0,6590	0,7364	3,5000	1,8110
0,3400	0,6910	0,7236	3,5000	1,5652
0,3500	0,7249	0,7100	3,5000	1,3283
0,3600	0,7612	0,6955	3,5000	1,0983
0,3700	0,8003	0,6799	3,5000	0,8732
0,3800	0,8433	0,6627	3,5000	0,6506

Fonte: (CARVALHO, 2014, p.142-143)

ANEXO H – Coeficientes k_x, k_y, k'_x, k'_y para o cálculos das reações de apoio nas lajes maciças

Para encontra o coeficiente correto deve-se utilizar o parâmetro λ , dado por:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$$

Em que:

l_y – maior dimensão da superfície da placa;

l_x -menor dimensão da superfície da placa.

Tabela 01 - Coeficientes k_x, k_y, k'_x, k'_y para o cálculo das reações de apoio de lajes retangulares uniformemente carregadas. (Casos 1,2 e 3)

λ	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	K x	K y	K x	K y	K y'	K x	K x'	K 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
∞	5,00	2,50	5,00	2,50	4,33	3,66	6,25	1,83

Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 344-345)

Tabela 02 - Coeficientes k_x, k_y, k'_x, k'_y para o cálculo das reações de apoio de lajes retangulares uniformemente carregadas. (Casos 4, 5 e 6)

λ	Caso 4				Caso 5		Caso 6	
	kx	k x'	k y	k y'	k x	k y'	k x'	μy
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	2,24	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
∞	3,66	6,33	1,83	3,17	5,00	4,33	5,00	1,44

Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 345-346)

Tabela 03 - Coeficientes k_x, k_y, k'_x, k'_y para o cálculo das reações de apoio de lajes retangulares uniformemente carregadas. (Casos 7, 8 e 9)

λ	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	3,81	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	4,04	1,44	2,50	3,75	2,50
∞	3,66	6,34	3,17	5,00	1,44	2,50	5,00	2,50

Fonte: (CARVALHO, 2014, p. 346-347)

ANEXO I – Coeficientes de ponderação das ações para lajes mistas Steel Deck

Tabela 01 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{a d}					
	Efeito da temperatura ^b	Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação		
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50		
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30		
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00		

^a Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

^d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008, p.18)

Tabela 02 – Valores dos fatores de combinação Ψ_0 e de redução Ψ_1 e Ψ_2 para as ações variáveis

Ações		γ_{fz} ^a		
		Ψ_0	Ψ_1 ^d	Ψ_2 ^e
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^{b)}	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	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
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4

^a Ver alínea c) de 4.7.5.3.

^b Edificações residenciais de acesso restrito.

^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.

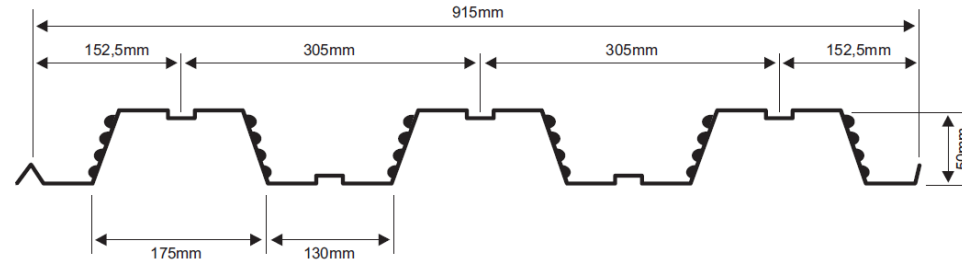
^d Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar Ψ_1 igual a 1,0.

^e Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para Ψ_2 o valor zero.

Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008, p.19)

ANEXO J – Tabelas de especificações para laje *Steel Deck* – MF-50 e MF-75

Figura 01 – Dimensões da fôrma M-50



Fonte: (METFORM, [20--], p.4)

Tabela 01 – Tabela de ações e vãos máximos – MF-50

	Altura total da laje (mm)	Espessura Steel Deck (mm)	Vãos Máximos sem Escoramento					Peso Próprio (kN/m²)	M. Inércia Laje Mista (10⁶mm⁴/m)	Vãos Máximos sem Escoramento														
			Simples (mm)	Duplos (mm)	Triplos (mm)	Balço (mm)	1.800			1.900	2.000	2.100	2.200	2.300	2.400	2.500	2.600	2.650	2.700	2.800	2.900	3.000	3.100	3.200
Lajes de Forro	100	0,80	2.050	2.800	2.900	900	1,85	5,25	9,31	8,14	7,14	6,28	5,54	4,89	4,32	3,82	3,38	3,18	2,99	2,63	2,32	2,03	1,78	1,54
		0,95	2.550	3.150	3.250	1.100	1,86	5,61	11,68	10,24	9,01	7,96	7,04	6,25	5,55	4,94	4,40	4,15	3,92	3,49	3,10	2,75	2,44	2,16
		1,25	3.200	3.800	3.800	1.450	1,89	6,26	16,43	14,45	12,76	11,31	10,06	8,97	8,02	7,18	6,44	6,10	5,78	5,19	4,67	4,19	3,77	3,38
Lajes de Piso	110	0,80	1.800	2.700	2.800	900	2,08	6,89	10,56	9,23	8,10	7,13	6,29	5,55	4,91	4,34	3,84	3,61	3,39	3,00	2,64	2,32	2,02	1,76
		0,95	2.400	3.050	3.150	1.050	2,10	7,35	13,25	11,62	10,23	9,03	8,00	7,10	6,31	5,61	5,00	4,72	4,45	3,96	3,53	3,13	2,78	2,46
		1,25	3.050	3.650	3.650	1.400	2,13	8,19	18,64	16,39	14,48	12,84	11,42	10,18	9,10	8,15	7,31	6,93	6,57	5,90	5,31	4,77	4,29	3,85
Lajes de Piso	120	0,80	1.650	2.600	2.700	850	2,32	8,85	11,81	10,33	9,06	7,98	7,03	6,21	5,50	4,86	4,30	4,05	3,80	3,36	2,96	2,60	2,27	1,98
		0,95	2.250	2.900	3.000	1.050	2,33	9,43	14,82	13,00	11,44	10,10	8,95	7,94	7,06	6,28	5,60	5,28	4,99	4,44	3,95	3,51	3,12	2,76
		1,25	2.950	3.550	3.550	1.350	2,36	10,49	20,00	18,33	16,20	14,36	12,77	11,40	10,19	9,13	8,19	7,76	7,36	6,61	5,95	5,35	4,81	4,32
Lajes de Piso	130	0,80	1.490	2.500	2.600	850	2,55	11,16	13,06	11,42	10,02	8,82	7,78	6,88	6,08	5,38	4,76	4,48	4,21	3,72	3,28	2,88	2,52	2,19
		0,95	2.050	2.800	2.900	1.000	2,57	11,87	16,39	14,37	12,65	11,18	9,90	8,79	7,81	6,96	6,20	5,85	5,52	4,92	4,38	3,89	3,46	3,06
		1,25	2.800	3.400	3.400	1.350	2,60	13,19	20,00	20,00	17,91	15,89	14,13	12,61	11,28	10,10	9,06	8,59	8,14	7,32	6,59	5,92	5,33	4,79
Lajes de Piso	140	0,80	1.350	2.450	2.500	800	2,79	13,85	14,31	12,52	10,99	9,67	8,53	7,54	6,67	5,90	5,23	4,91	4,62	4,08	3,60	3,16	2,77	2,41
		0,95	1.850	2.750	2.800	1.000	2,80	14,72	17,96	15,75	13,87	12,25	10,85	9,63	8,57	7,63	6,80	6,42	6,06	5,40	4,81	4,27	3,79	3,36
		1,25	2.700	3.300	3.300	1.300	2,83	16,32	20,00	20,00	19,63	17,41	15,49	13,82	12,36	11,08	9,94	9,42	8,93	8,03	7,23	6,50	5,85	5,26
Lajes de Piso	150	0,80	1.250	2.300	2.450	800	3,02	16,93	15,57	13,61	11,95	10,52	9,28	8,20	7,26	6,42	5,69	5,35	5,03	4,44	3,92	3,44	3,02	2,63
		0,95	1.700	2.650	2.750	950	3,04	17,98	19,54	17,13	15,08	13,33	11,80	10,48	9,32	8,30	7,40	6,98	6,59	5,88	5,23	4,66	4,13	3,66
		1,25	2.600	3.200	3.250	1.250	3,07	19,90	20,00	20,00	18,94	16,85	15,04	13,45	12,05	10,82	10,25	9,72	8,74	7,86	7,08	6,37	5,72	
Lajes de Piso	160	0,80	1.150	2.200	2.300	800	3,26	20,45	16,82	14,71	12,91	11,37	10,03	8,87	7,84	6,95	6,15	5,78	5,44	4,81	4,24	3,73	3,26	2,84
		0,95	1.600	2.550	2.650	950	3,27	21,69	20,00	18,51	16,30	14,40	12,76	11,33	10,07	8,97	8,00	7,55	7,13	6,35	5,66	5,04	4,47	3,96
		1,25	2.550	3.100	3.150	1.250	3,30	23,97	20,00	20,00	20,00	18,21	16,25	14,53	13,03	11,69	11,08	10,51	9,45	8,50	7,65	6,89	6,19	
Lajes de Piso	170	0,80	1.050	2.050	2.150	750	3,49	24,43	18,07	15,81	13,88	12,22	10,78	9,53	8,43	7,47	6,61	6,22	5,85	5,17	4,56	4,01	3,51	3,06
		0,95	1.500	2.500	2.600	900	3,51	25,87	20,00	19,89	17,51	15,47	13,71	12,17	10,83	9,64	8,60	8,12	7,66	6,83	6,09	5,42	4,81	4,26
		1,25	2.450	3.050	3.050	1.200	3,54	28,55	20,00	20,00	20,00	20,00	19,57	17,46	15,62	14,00	12,57	11,91	11,29	10,16	9,14	8,23	7,41	6,66

Fonte: (METFORM, [20--], p.4-5)

Tabela 02 – Propriedades físicas para a largura de 1,00 m – MF - 50

Esp. Nominal (mm)	Esp. projeto (mm)	Altura total (mm)	Peso (kg/m ²)	Reações máximas de apoio		Módulo de Resistência (mm ³)	Inércia para Deformação (mm ⁴)	Área de aço (mm ²)	Centro de Gravidade (mm)
				Externo kN	Interno kN				
0,80	0,76	52,26	8,39	4,95	14,67	14.599	449.419	997	26,13
0,95	0,91	52,41	9,97	6,51	20,89	18.778	562.372	1.193	26,21
1,25	1,21	52,71	13,11	11,41	35,43	27.791	786.502	1.587	26,36

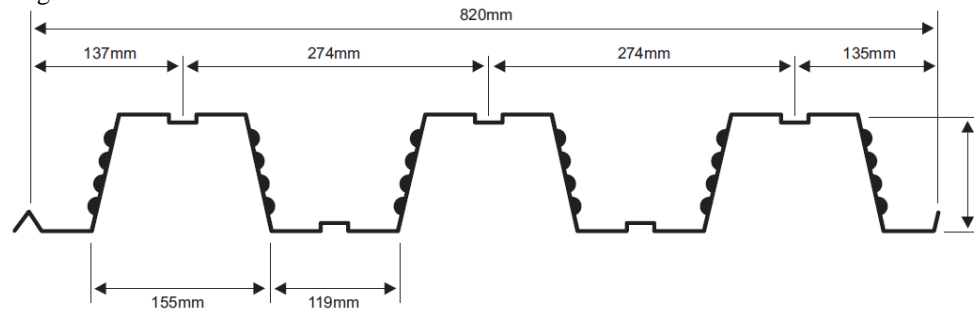
Fonte: (METFORM, [20--], p.5)

Tabela 03 – Consumo de concreto e armadura em tela soldada – MF - 50

Altura total da laje (mm)	Consumo de Concreto (m ³ /m ²)	Tipo de armadura para retração, em tela soldada		
		Denominação	Composição	Peso (kg/m ²)
100	0,0750	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
110	0,0850	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
120	0,0950	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
130	0,1050	Q - 92	ø4,2 x ø4,2 - 150x150	1,48
140	0,1150	Q - 92	ø4,2 x ø4,2 - 150x150	1,48
150	0,1250	Q - 113	ø3,8 x ø3,8 - 100x100	1,80
160	0,1350	Q - 113	ø4,2 x ø4,2 - 100x100	1,80
170	0,1450	Q - 138	ø3,8 x ø3,8 - 100x100	2,20

Fonte: (METFORM, [20--], p.4)

Figura 02 – Dimensões da fôrma MF-75



Fonte: (METFORM, [20--], p.4)

Tabela 04 – Tabela de ações e vãos máximos – MF-75

Lajes de Forro	Altura total da laje (mm)	Espessura Seal Deck (mm)	Vãos Máximos sem Escoramento				Peso Próprio (kN/m ²)	M. Inércia Laje Mista (10 ⁴ m ⁴ /m)	Vãos Máximos sem Escoramento															
			Simples (mm)	Duplos (mm)	Triplos (mm)	Balanco (mm)			2.000	2.100	2.200	2.300	2.400	2.500	2.600	2.700	2.800	2.900	3.000	3.150	3.300	3.500	3.750	4.000
Lajes de Forro	130	0,80	2.350	3.200	3.300	1.150	2,27	10,66	11,87	10,56	9,42	8,43	7,56	6,79	6,11	5,51	4,96	4,47	4,03	3,45	2,94	2,37	1,77	1,29
		0,95	3.000	3.650	3.750	1.350	2,28	11,34	14,19	12,69	11,38	10,25	9,25	8,36	7,58	6,88	6,25	5,69	5,18	4,51	3,92	3,26	2,56	2,00
		1,25	3.650	4.300	4.400	1.650	2,32	12,74	18,83	16,94	15,31	13,88	12,62	11,50	10,51	9,63	8,84	8,13	7,48	6,63	5,88	5,03	4,15	3,42
	140	0,80	2.200	3.100	3.200	1.150	2,50	13,17	13,16	11,71	10,45	9,35	8,39	7,54	6,78	6,11	5,51	4,97	4,48	3,83	3,27	2,63	1,98	1,44
		0,95	2.850	3.500	3.600	1.350	2,52	13,99	15,74	14,07	12,63	11,37	10,26	9,28	8,41	7,64	6,94	6,32	5,76	5,01	4,36	3,62	2,85	2,23
		1,25	3.500	4.150	4.250	1.600	2,55	15,68	20,00	18,79	16,98	15,39	14,00	12,76	11,67	10,69	9,81	9,02	8,31	7,36	6,53	5,59	4,61	3,81
	150	0,80	2.000	3.000	3.100	1.100	2,74	16,06	14,46	12,86	11,48	10,28	9,22	8,28	7,45	6,72	6,06	5,46	4,93	4,22	3,60	2,90	2,18	1,59
		0,95	2.650	3.400	3.500	1.300	2,75	17,04	17,28	15,45	13,87	12,49	11,27	10,20	9,24	8,39	7,63	6,95	6,33	5,51	4,80	3,98	3,14	2,45
		1,25	3.400	4.000	4.100	1.550	2,79	19,05	20,00	20,00	18,65	16,91	15,38	14,02	12,82	11,75	10,78	9,91	9,13	8,09	7,18	6,15	5,07	4,19
Lajes de Piso	160	0,80	1.850	2.900	3.000	1.100	2,97	19,35	15,75	14,02	12,51	11,20	10,04	9,03	8,12	7,32	6,60	5,95	5,37	4,60	3,93	3,17	2,38	1,73
		0,95	2.500	3.300	3.400	1.250	2,99	20,51	18,83	16,84	15,11	13,61	12,28	11,11	10,07	9,15	8,32	7,57	6,90	6,01	5,23	4,35	3,43	2,68
		1,25	3.250	3.900	4.000	1.500	3,02	22,90	20,00	20,00	20,00	18,42	16,76	15,28	13,97	12,80	11,75	10,81	9,95	8,82	7,83	6,71	5,54	4,58
170	0,80	1.700	2.800	2.900	1.050	3,21	23,07	17,04	15,17	13,54	12,12	10,87	9,77	8,80	7,93	7,15	6,45	5,82	4,98	4,26	3,43	2,58	1,88	
	0,95	2.350	3.200	3.300	1.250	3,23	24,44	20,00	18,22	16,36	14,72	13,29	12,03	10,91	9,90	9,01	8,20	7,47	6,51	5,67	4,71	3,72	2,91	
	1,25	3.150	3.800	3.900	1.450	3,26	27,24	20,00	20,00	20,00	19,94	18,14	16,54	15,12	13,86	12,72	11,70	10,78	9,55	8,49	7,27	6,00	4,96	
180	0,80	1.550	2.750	2.850	1.050	3,44	27,25	18,34	16,32	14,57	13,04	11,70	10,52	9,47	8,53	7,69	6,94	6,26	5,37	4,59	3,70	2,78	2,03	
	0,95	2.200	3.100	3.200	1.200	3,46	28,84	20,00	19,61	17,60	15,84	14,30	12,94	11,74	10,66	9,69	8,83	8,04	7,00	6,10	5,07	4,01	3,14	
	1,25	3.050	3.700	3.800	1.450	3,50	32,10	20,00	20,00	20,00	20,00	19,51	17,80	16,28	14,92	13,70	12,60	11,60	10,28	9,14	7,83	6,47	5,35	
190	0,80	1.450	2.650	2.750	1.000	3,68	31,92	19,63	17,47	15,60	13,96	12,53	11,26	10,14	9,14	8,24	7,44	6,71	5,75	4,91	3,96	2,98	2,18	
	0,95	2.100	3.050	3.150	1.200	3,70	33,75	20,00	20,00	18,84	16,96	15,32	13,86	12,57	11,41	10,38	9,45	8,62	7,50	6,54	5,44	4,30	3,36	
	1,25	3.000	3.600	3.700	1.400	3,73	37,52	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	19,06	17,43	15,97	14,67	13,49	12,43	11,02	9,79	8,39	6,93	5,73
200	0,80	1.400	2.600	2.650	1.000	3,91	37,10	20,00	18,62	16,63	14,88	13,35	12,00	10,81	9,74	8,79	7,93	7,16	6,13	5,24	4,23	3,19	2,33	
	0,95	1.950	2.950	3.050	1.150	3,93	39,19	20,00	20,00	20,00	20,00	18,08	16,33	14,78	13,40	12,17	11,07	10,08	9,19	8,00	6,97	5,80	4,59	3,59
	1,25	2.900	3.500	3.650	1.400	3,97	43,51	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	18,58	17,03	15,64	14,38	13,25	11,75	10,44	8,94	7,39	6,12

Fonte: (METFORM, [20--], p.6-8)

Tabela 05 – Propriedades físicas para a largura de 1,00 m – MF - 75

Esp. Final (mm)	Esp. projeto (mm)	Altura total (mm)	Peso (kg/m ²)	Reações máximas de apoio		Módulo de Resistência (mm ³)	Inércia para Deformação (mm ⁴)	Área de aço (mm ²)	Centro de Gravidade (mm)
				Externo kN	Interno kN				
0,80	0,76	74,98	9,37	6,76	21,01	22.710	1.017.138	1.112	37,49
0,95	0,91	75,13	11,12	8,90	29,70	28.788	1.254.749	1.332	37,57
1,25	1,21	75,43	14,63	14,62	49,53	40.599	1.666.741	1.771	37,72

Fonte: (METFORM, [20--], p.7)

Tabela 06 – Consumo de concreto e armadura em tela soldada – MF - 75

Altura total da laje (mm)	Consumo de Concreto (m ³ /m ²)	Tipo de armadura para retração, em tela soldada		
		Denominação	Composição	Peso (kg/m ²)
130	0,0925	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
140	0,1025	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
150	0,1125	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
160	0,1225	Q - 92	ø4,2 x ø4,2 - 150x150	1,48
170	0,1325	Q - 113	ø3,8 x ø3,8 - 100x100	1,80
180	0,1425	Q - 113	ø3,8 x ø3,8 - 100x100	1,80
190	0,1525	Q - 138	ø4,2 x ø4,2 - 100x100	2,20
200	0,1625	Q - 138	ø4,2 x ø4,2 - 100x100	2,20

Fonte: (METFORM, [20--], p.6)

ANEXO K – Coeficientes de majoração das ações

Tabela 01 – Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalque de apoios e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0,0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0,0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0,0	1,2	0,9	0,0	0,0

Em que:

D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis em geral e T é a temperatura.

a – para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Fonte: (ABNT NBR 6118, 2014, p.65)

Tabela 02 – Coeficiente γ_2

Ações	γ_2			
	ψ_0	ψ_1^a	ψ_2	
Cargas acidentais de edifícios	Locais que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas (b)	0,5	0,4	0,3
	Locas em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas (c)	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	0,0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

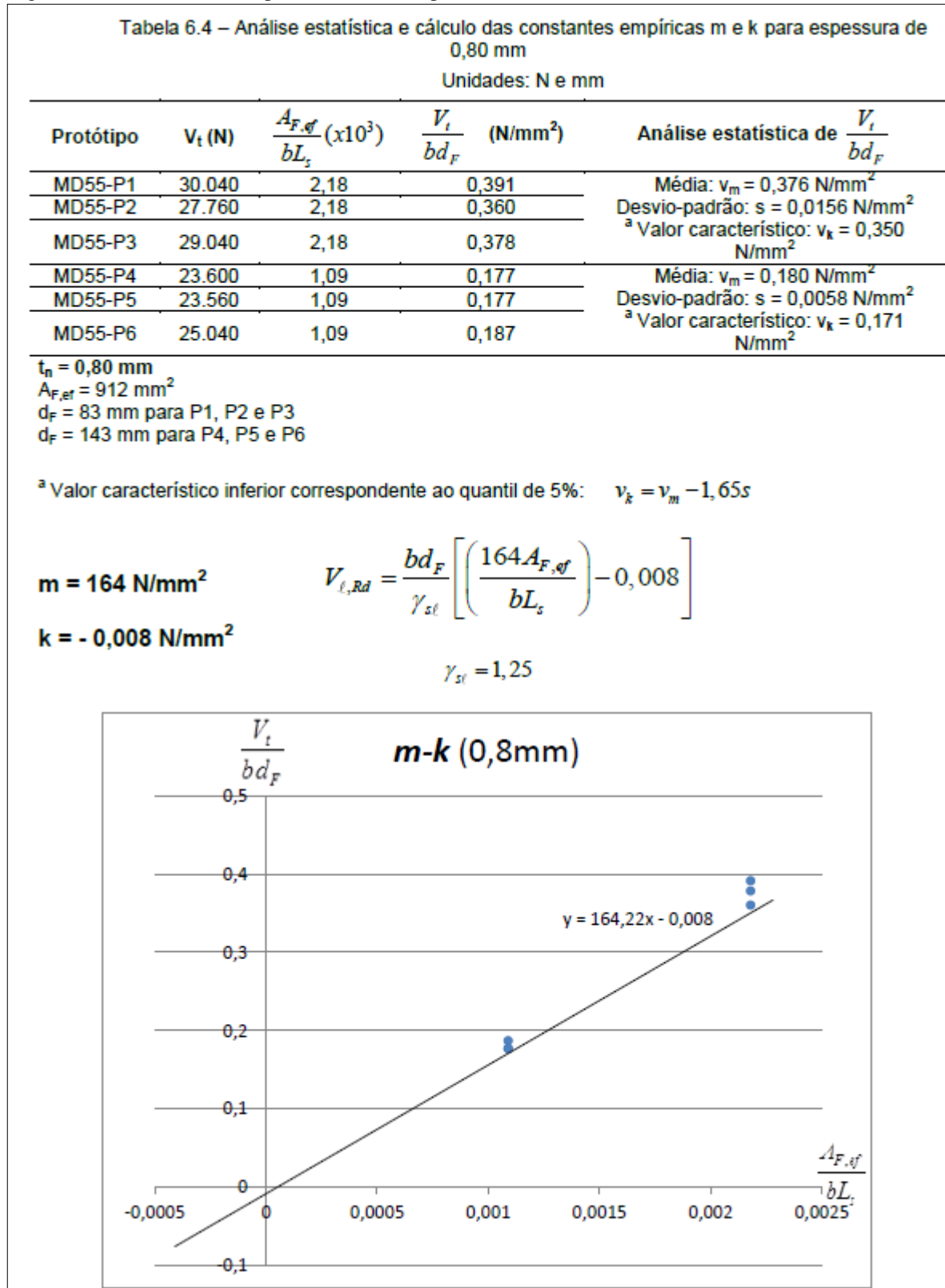
a – Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver seção 23.

b – Edifícios residenciais

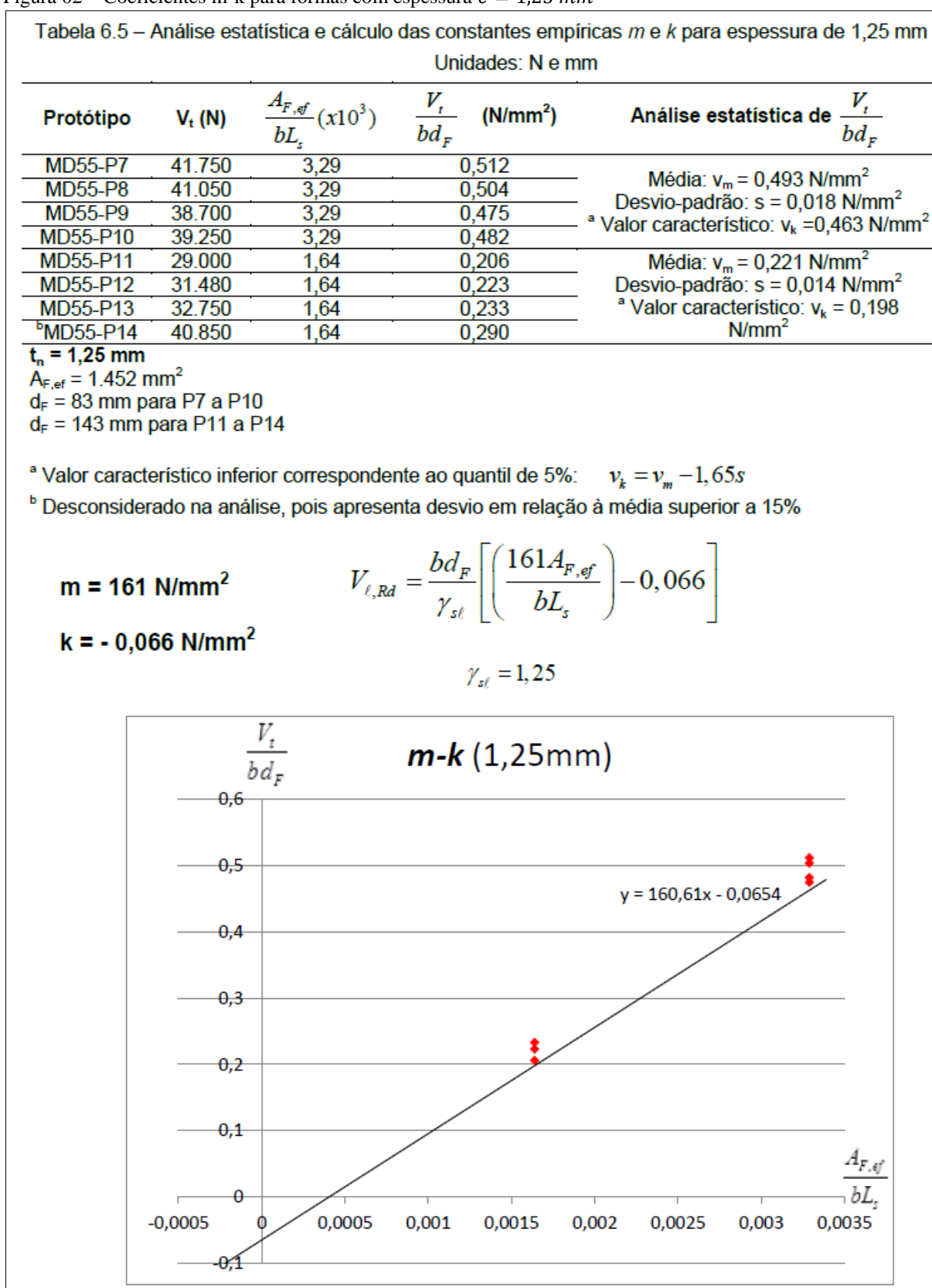
c- Edifícios comerciais, de escritório, estações e edifícios públicos.

Fonte: (ABNT NBR 6118, 2014, p.65)

ANEXO L – Coeficientes m-k

Figura 01 – Coeficientes m-k para fôrmas com espessura $e = 0,8 \text{ mm}$ 

Fonte: (SIEG, 2015, p. 87)

Figura 02 – Coeficientes m-k para fôrmas com espessura $e = 1,25 \text{ mm}$ 

Fonte: (SIEG, 2015, p. 87)