

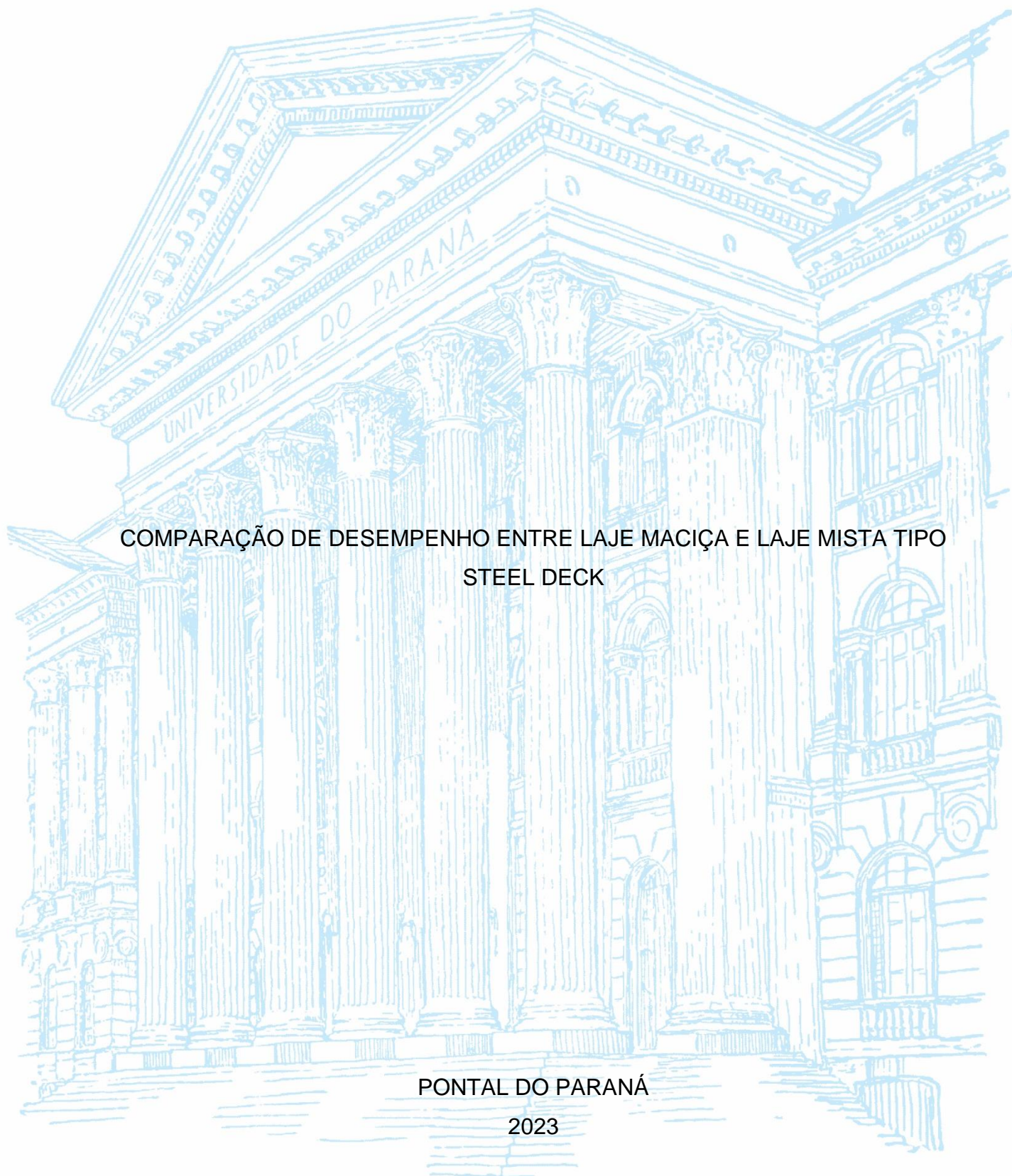
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINE RIBEIRO DE LIMA SEMOKOVSKI

COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE LAJE MACIÇA E LAJE MISTA TIPO
STEEL DECK

PONTAL DO PARANÁ

2023



CAROLINE RIBEIRO DE LIMA SEMOKOVISKI

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE LAJE MACIÇA E LAJE MISTA TIPO
STEEL DECK**

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão da disciplina TCC II do curso de Engenharia Civil do Campus Avançado Pontal do Paraná – Centro de Estudos do Mar, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Machado Kroetz

PONTAL DO PARANÁ

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

Caroline Ribeiro de Lima Semokovski

“COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE LAJE MACIÇA E LAJE MISTA TIPO STEEL DECK”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Prof. Dr. Henrique Machado Kroetz
Prof. Orientador - CPP-CEM/UFPR

Prof. Dr. Carlos Eduardo Rossigali
CPP-CEM/UFPR

Prof. Dr. Gustavo de Miranda Saleme Gidrão
UTFPR

Pontal do Paraná, 07 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **HENRIQUE MACHADO KROETZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/12/2023, às 16:52, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS EDUARDO ROSSIGALI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/12/2023, às 17:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo de Miranda Saleme Gidrão, Usuário Externo**, em 12/12/2023, às 14:46, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **6224229** e o código CRC **BB7E72C1**.

Este trabalho é dedicado à memória do meu
amado avô, Eloy Divanzir Semokovski.
Durante toda a sua presença em minha vida,
ele não apenas me apoiou, mas também me
incentivou em todos os aspectos da minha
trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha gratidão em primeiro lugar aos meus pais, Suzana e Eduardo, que estiveram ao meu lado durante todo o período em que estive longe, dedicando seu tempo e esforço para me apoiar, proporcionando a tranquilidade necessária para que eu pudesse concluir minha graduação. À minha irmã, Natalli, que mesmo nos momentos mais sombrios, sempre encontrou maneiras de me fazer sorrir.

Agradeço também aos meus avós, Ercília e Valdemar, que sempre acreditaram em minha capacidade de alcançar o lugar em que estou hoje. À minha extensa família, que mesmo à distância, sempre me apoiou.

À minha namorada, Bruna, que me incentivou e lembrou constantemente, ao longo da jornada do TCC, que eu seria capaz de concluí-lo, mesmo com o pouco tempo que restava.

Não posso deixar de mencionar meus amigos, Bruna, Carolina, Dilson, Fabiano, Jaine, Jairo e Paola, que estiveram comigo ao longo dos seis anos de faculdade, compartilhando os melhores e os piores momentos que a graduação pode oferecer.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Henrique Machado Kroetz, por sua orientação e apoio incansáveis durante o trabalho de conclusão, mesmo após a mudança de tema apenas dois meses antes da entrega.

Por fim, expresso meu agradecimento a mim mesmo. Em meio a tantos desafios e momentos de insegurança, mantive-me forte e segui em frente com determinação, enfrentando cada obstáculo de cabeça erguida.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo comparar as lajes mistas Steel Deck com as lajes maciças de concreto armado em termos de dimensionamento, custo, tempo de execução e resíduos gerados. Inicialmente, será realizada uma revisão bibliográfica abrangente de ambos os métodos construtivos, destacando seus elementos de construção, vantagens e outras informações essenciais. Em seguida, será conduzido o dimensionamento de cada tipo de laje de acordo com suas respectivas normas técnicas, seguido pelo cálculo do custo dos materiais e da mão de obra, usando dados de lojas de construção e a tabela SINAPI. Além disso, será realizada uma análise dos resíduos gerados por cada método.

No estudo de caso analisado, que envolve uma laje do segundo andar de uma residência unifamiliar com área de 40,6m², a discrepância nos dimensionamentos resultou em uma diferença na espessura entre as lajes. A laje Steel Deck foi dimensionada com 130mm, enquanto a laje de concreto armado apresentou uma espessura de 90mm.

Palavras-chave: Laje Steel Deck. Laje de concreto armado. Análise comparativa.

ABSTRACT

This study aims to compare Steel Deck composite slabs with solid reinforced concrete slabs in terms of design, cost, construction time, and generated waste. Initially, a comprehensive literature review of both construction methods will be conducted, highlighting their building elements, advantages, and other essential information. Subsequently, the design of each type of slab will be carried out according to their respective technical standards, followed by calculating material and labor costs using data from construction stores and the SINAPI table. Additionally, an analysis of the waste generated by each method will be conducted.

In the analyzed case study, involving a second-floor slab of a single-family residence with an area of 40.6m², the disparity in dimensioning resulted in a difference in thickness between the slabs. The Steel Deck slab was designed with a thickness of 130mm, whereas the reinforced concrete slab had a thickness of 90mm.

Keywords: Steel Deck slab. Reinforced concrete slab. Comparative analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama tensão x deformação.....	21
Figura 2 – Perfis soldados série simétrica e monossimétrica	25
Figura 3 – Perfil U laminado	26
Figura 4 – Perfis formados a frio	27
Figura 5 – Perfis compostos	28
Figura 6 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.	30
Figura 7 – Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal	32
Figura 8 - Laje Steel Deck	35
Figura 9 – Desenho <i>Stud Bolts</i>	36
Figura 10 – Posicionamento armadura antifissuração.....	37
Figura 11 – Forma de madeira serrada	39
Figura 12 – Chapa compensada	39
Figura 13 – Chapa compensada resinada.....	40
Figura 14 – Chapa compensada plastificada.....	41
Figura 15 – Diagrama de tensões para momento positivo – Linha neutra plástica acima da forma de aço.....	45
Figura 16 – Largura plana dos elementos de forma	47
Figura 17 – Vão efetivo	53
Figura 18 – Laje armada em uma e duas direções	53
Figura 19 – Momento fletor negativo no engaste	57
Figura 20 - Croqui 2º andar residência unifamiliar.....	66
Figura 21 – Planta baixa de divisão de lajes	67
Figura 22 – Carregamento L1 e L3.....	69
Figura 23 – Carregamento L2 e L4.....	69
Figura 24 – Forma MF-50 com 130mm de altura e 915mm de largura	70
Figura 25 – Esforço cortante L1 e L3	70
Figura 26 – Momento fletor L1 e L3.....	71
Figura 27 – Esforço cortante L2 e L4	71
Figura 28 – Momento fletor L2 e L4.....	71
Figura 29 – Disposição das lajes 1 e 2.....	78
Figura 30 – Vinculação da L1	78
Figura 31 – Vinculação da L2.....	79
Figura 32 – Armadura negativa e positiva laje 1 e 2.....	92

Figura 33 – Materiais utilizados na execução da Laje Steel Deck.....94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de aços-caborno	20
Tabela 2 - Tabela vergalhão CA-50.....	41
Tabela 3 - Tabela de vergalhões CA-60	42
Tabela 4 – Áreas de armadura por unidade de comprimento (cm ² /m), para diferentes bitolas e espaçamentos	65
Tabela 5 – Cálculo de cargas considerando peso próprio.....	68
Tabela 6 – Cálculo de cargas sem considerar peso próprio.....	69
Tabela 7 – Valores de <i>m</i> e <i>k</i>	74
Tabela 8 – Resultado das verificações	77
Tabela 9 - Resultado de verificações para laje de concreto armado	92
Tabela 10 – Custo de material para execução laje Steel Deck	94
Tabela 11 – Custo Material para laje de concreto armado	95
Tabela 12 – Custo mão de obra Laje Steel Deck	95
Tabela 13 – Custo execução da laje maciça conforme serviço utilizado.....	96
Tabela 14 – Custo execução laje maciça conforme horas trabalhadas.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Espessuras padrão de chapas grossas de aço	22
Quadro 2 - Espessuras padrão de chapas finas de aço	23
Quadro 3 - Consumo de concreto e armadura em tela soldada para forma MF-50	50
Quadro 4 - Consumo de concreto e armadura em tela soldada para forma MF-75	51
Quadro 5 - Combinações últimas	55
Quadro 6 – Equações para cálculo de momento fletor em lajes armadas em uma direção.....	56
Quadro 7 - Valores de k para lajes armadas em uma direção.....	60
Quadro 8 - Valores de k para lajes armadas em duas direções	61
Quadro 9 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	62
Quadro 10 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e	63
Quadro 11 - Valores mínimos para armaduras em lajes de concreto armado	64
Quadro 12 - Taxas mínimas de armadura de flexão	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos.....	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	MATERIAIS	19
2.1.1	Aço.....	19
2.1.1.1	Tipos de aços estruturais	20
2.1.1.2	Propriedades dos aços.....	20
2.1.1.2.1	Ductilidade	21
2.1.1.2.2	Fragilidade	21
2.1.1.2.3	Tenacidade	21
2.1.1.2.4	Dureza.....	22
2.1.1.3	Chapas metálicas.....	22
2.1.1.4	Perfis metálicos.....	23
2.1.1.4.1	Perfis soldados.....	24
2.1.1.4.2	Perfis laminados.....	25
2.1.1.4.3	Perfis estruturais formados a frio.....	26
2.1.1.4.4	Perfis compostos.....	27
2.1.2	Concreto	28
2.1.2.1	Propriedades do concreto	29
2.1.2.1.1	Resistência do concreto à compressão.....	29
2.1.2.1.2	Resistência à tração.....	31
2.1.2.1.3	Módulo de elasticidade.....	31
2.2	TIPOS DE LAJES	32
2.2.1	Laje maciça	32
2.2.2	Laje pré-moldada	33
2.2.3	Laje mista com deck metálico	33
2.3	SISTEMA LAJE STEEL DECK	33
2.3.1	Elementos da laje Steel Deck	35
2.3.1.1	Deck metálico.....	35

2.3.1.2	Conectores de cisalhamento (<i>Stud Bolts</i>)	36
2.3.1.3	Armaduras.....	36
2.3.1.4	Concreto.....	37
2.3.2	Vantagens.....	37
2.3.3	Elementos laje de concreto armado.....	38
2.3.3.1	Forma de madeira	38
2.3.3.1.1	Madeira serrada	38
2.3.3.1.2	Madeira compensada	39
2.3.3.1.3	Compensado resinado	40
2.3.3.1.4	Chapa compensada plastificada	40
2.3.3.2	Armadura de laje de concreto armado	41
2.3.4	Vantagens.....	42
3	METODOLOGIA.....	43
3.1	CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO PROJETO DE LAJE STEEL DECK	43
3.1.1	Considerações fase final de estado-limite último.....	43
3.1.1.1	Momento fletor	43
3.1.1.2	Cisalhamento longitudinal	47
3.1.2	Cisalhamento vertical.....	48
3.1.3	Considerações fase final de estado-limite de serviço.....	50
3.1.3.1	Fissuração do concreto	50
3.1.3.2	Deslocamento vertical	51
3.2	CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO PROJETO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO.....	51
3.2.1	Características de lajes maciças	52
3.2.2	Considerações iniciais	52
3.2.3	Estado limite.....	54
3.2.3.1	Combinações últimas	54
3.2.3.2	Estado-limite último	55
3.2.3.2.1	Laje armada em uma direção.....	56
3.2.3.2.2	Laje armada em duas direções	56
3.2.3.3	Combinações de serviço	58
3.2.3.4	Estado-limite de serviço	59
3.2.3.4.1	Estado limite de deformação	59
3.2.4	Armadura longitudinal mínima	61

4	INFORMAÇÕES DO ESTUDO DE CASO	65
4.1	DIMENSIONAMENTO STEEL DECK	67
4.1.1	Determinação da espessura	68
4.1.2	Carregamentos.....	68
4.1.3	Cálculo de solicitações	70
4.1.4	Verificações.....	72
4.1.4.1	Momento fletor	72
4.1.4.2	Cisalhamento longitudinal	73
4.1.4.3	Cisalhamento vertical	75
4.1.4.4	Deslocamento máximo	75
4.1.4.5	Armadura de combate a fissuração.....	76
4.1.4.6	Resultados	76
4.2	DIMENSIONAMENTO LAJE DE CONCRETO ARMADO.....	77
4.2.1	Determinação da espessura	80
4.2.2	Carregamentos.....	80
4.2.3	Cálculo das solicitações	80
4.2.4	Dimensionamento das armaduras	85
4.2.5	Resultados	92
5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	93
5.1	ANÁLISE CUSTO DE MATERIAL	93
5.1.1	Laje Steel Deck.....	93
5.1.2	Laje Maciça de Concreto Armado	94
5.2	ANÁLISE DE MÃO DE OBRA.....	95
5.2.1	Laje Steel Deck.....	95
5.2.2	Laje de Concreto Armado	96
5.3	RESÍDUOS GERADOS	96
6	CONCLUSÃO.....	97
7	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado ainda são amplamente preferidas na construção civil devido à fácil acessibilidade dos materiais, à presença de numerosos fornecedores e à familiaridade com os métodos de execução. No entanto, no Brasil, há uma busca contínua por métodos construtivos que possam reduzir custos, prazos e resíduos gerados.

Embora as estruturas metálicas sejam comuns em obras industriais, elas estão gradualmente sendo adotadas em estruturas menores, como em construções residenciais e comerciais. No entanto, o custo elevado e a escassez de mão de obra especializada são desafios enfrentados por essa alternativa.

Diante desse cenário, o conceito de estruturas mistas, amplamente utilizado em outros países, está ganhando espaço no mercado da construção civil brasileira. Esse conceito envolve a combinação de aço e concreto em diferentes elementos estruturais. Uma solução específica focada em lajes é a utilização das Lajes Steel Deck.

As Lajes Steel Deck são lajes mistas formadas por uma estrutura metálica revestida por concreto. Inicialmente, a estrutura metálica suporta apenas os carregamentos iniciais da construção, sendo autoportante para vãos de até 4 metros, o que significa que não requer escoramento durante a execução. Após a cura do concreto, a estrutura não apenas suporta seu próprio peso, mas também atua como armadura positiva, resistindo à tração da laje, eliminando a necessidade de armadura adicional.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo comparar o dimensionamento, custo, tempo de execução e quantidade de resíduos gerados entre as Lajes Steel Deck e as lajes maciças de concreto armado. Enquanto as lajes de concreto armado possuem normas consolidadas para o dimensionamento, como a NBR 6118 (2014), o dimensionamento das Lajes Steel Deck está atualmente regulamentado pela NBR 8800 (2008), juntamente com o dimensionamento de estruturas metálicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Dimensionar, analisar e comparar custo e tempo de execução de duas soluções estruturais, Laje Steel Deck e Laje convencional de concreto armado, para o piso do segundo pavimento de um sobrado unifamiliar.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar estrutura em concreto armado e em estrutura metálica;
- Analisar custo para execução de ambas as estruturas;
- Analisar tempo de execução de ambas as estruturas;
- Analisar resíduos gerados.

1.2 JUSTIFICATIVA

A busca por métodos construtivos economicamente viáveis, que gerem menos resíduos e possam ser executados em menor tempo, é uma constante no Brasil. Apesar das conhecidas vantagens das estruturas de concreto armado, como alto desempenho, podem estar associadas a impactos ambientais consideráveis, prazos de execução mais longos em comparação a outros sistemas construtivos, e desorganização nos canteiros de obra.

O sistema misto aço-concreto, além de oferecer benefícios arquitetônicos e econômicos, apresenta vantagens notáveis, como a eliminação da necessidade de fôrmas e escoramentos, bem como a redução do peso próprio e do volume da estrutura. Nesse contexto, será analisado o método construtivo das lajes Steel Deck, visando uma abordagem mais eficiente e sustentável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão exploradas as características dos materiais usados na construção, seguido pelos tipos de lajes disponíveis. Em particular, será dada uma explicação detalhada sobre a laje Steel Deck e a laje convencional de concreto armado, incluindo seus componentes essenciais.

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Aço

O aço é uma liga de ferro e carbono, com elementos residuais resultadas de processo de fabricação de silício, manganês, fósforo, enxofre e elementos usados para melhorar características físicas e mecânicas do material (PFEIL; PFEIL, 2021).

O aço pode ser classificado em várias categorias, conforme sua aplicação. Aços utilizados em estruturas precisam ter propriedades de boa ductilidade, homogeneidade, soldabilidade e uma ótima relação entre a tensão resistente e a de escoamento.

No Brasil, a indústria siderúrgica começou a se desenvolver após a Segunda Guerra Mundial, com a construção da Usina Presidente Vargas da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em Volta Redonda, no Rio de Janeiro. Atualmente, o país possui várias usinas siderúrgicas capazes de produzir materiais para grandes estruturas. Livros como os de Dias (1993 e 2004) apresentam coleções de edifícios metálicos no Brasil, ricos em ilustrações fotográficas e desenhos. Um exemplo histórico é o Edifício Avenida Central no Rio de Janeiro, que foi o primeiro edifício alto com estrutura metálica no Brasil. Foi fabricado e montado pela extinta Fábrica de Estruturas Metálicas (FEM) da CSN em 1961.

Com o avanço da ciência da construção e da metalurgia, as estruturas metálicas passaram a adotar *designs* mais funcionais e inovadores, tornando-se verdadeiros marcos da tecnologia. No Brasil, destacam-se os vãos metálicos da Ponte Rio-Niterói com vãos laterais de 200 metros e um vão central de 300 metros, que estabeleceu um recorde mundial em termos de vigas retas.

Existem dois processos de fabricação: o primeiro envolve a produção de ferro fundido em alto-forno, seguido pelo refinamento para obtenção de aço no conversor de oxigênio. No segundo processo, o aço é produzido pela fusão de sucata de ferro em um

forno elétrico, no qual a energia é gerada por arcos voltaicos entre o ferro fundido e os eletrodos.

2.1.1.1 Tipos de aços estruturais

Os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga.

Nos aços-carbono, o aumento da resistência em comparação com o ferro puro é alcançado principalmente pela adição de carbono e, em menor medida, pelo manganês. Em estruturas de aço convencionais, são empregados aços com baixo teor de carbono. Esses aços são ideais para soldagem, pois há preocupações significativas nesse processo.

Os tipos de aços-carbono mais comuns na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), American Society for Testing and Materials (ASTM) e nas Normas Europeias (EN), estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de aços-carbono

Especificação	Teor de carbono (%)	Limite de escoamento fy (MPa)	Resistência à ruptura fu (MPa)
ABNT MR250	0,23 máx	250	400
ASTM A7		240	370-500
ASTM A36	0,25-0,29	250 (36 ksi)	400-500
ASTM A307 (parafuso)	baixo	-	415
ASTM A325 (parafuso)	médio	635 (min)	825 (min)
EN S235	baixo	235	360

Fonte: Pfeil (2021)

Os aços de baixa liga são aços-carbono com elementos de liga que ajudam nas propriedades mecânicas, como o cromo, nióbio, cobre, manganês, fósforo e entre outros. Segundo PFEIL; PFEIL (2021), alguns elementos de liga aumentam a resistência do aço na ordem de 0,2%, por meio de modificações nas microestruturas dos aços-carbonos, podendo soldar os aços sem preocupações.

2.1.1.2 Propriedades dos aços

Nesta seção estão algumas características gerais do aço.

2.1.1.2.1 Ductilidade

A ductilidade é a característica que descreve a capacidade de um material de se deformar plasticamente quando submetido a forças externas. No caso dos aços dúcteis, quando expostos a cargas concentradas, eles podem sofrer deformações permanentes que são capazes de redistribuir as tensões. Esse comportamento plástico é fundamental, por exemplo, ao considerar a distribuição uniforme da carga entre os parafusos em uma conexão parafusada.

2.1.1.2.2 Fragilidade

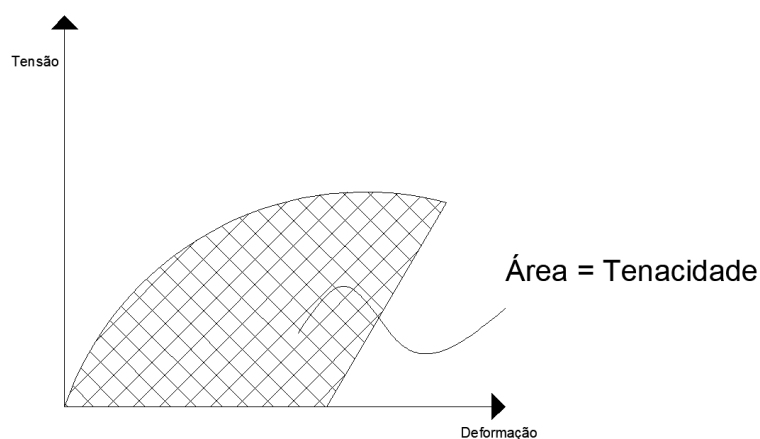
A fragilidade em aço indica a tendência do material de se romper de maneira abrupta, sem apresentar sinais marcantes de deformação plástica (PFEIL; PFEIL, 2021).

A análise das condições que levam à fragilidade dos aços é importante na engenharia de construções metálicas, uma vez que materiais frágeis tendem a falhar de forma súbita, sem avisos prévios.

2.1.1.2.3 Tenacidade

A tenacidade é uma medida da capacidade de um material absorver energia, que pode ser tanto na forma de deformações elásticas quanto plásticas, por unidade de volume antes de atingir o ponto de ruptura. Quando se trata de um teste de tração simples, a tenacidade é representada pela área total sob o gráfico do diagrama de tensão (σ) em relação à deformação (ϵ).

Figura 1 – Diagrama tensão x deformação



Fonte: A autora (2023)

2.1.1.2.4 Dureza

A dureza se refere à capacidade de um material resistir ao risco ou à abrasão. Na prática, a dureza é medida pela resistência que a superfície do material oferece à penetração de uma peça de maior dureza. Existem vários métodos para medir a dureza, como os métodos Brinell, Rockwell e Shore, cada um com suas próprias escalas e procedimentos específicos (PFEIL; PFEIL, 2021). Esses métodos foram desenvolvidos com base em relações físicas estabelecidas experimentalmente entre dureza e resistência. Portanto, os ensaios de dureza fornecem uma maneira eficaz e prática de verificar a resistência de um material, como o aço, sem a necessidade de realizar testes destrutivos mais complexos. Eles são amplamente usados na indústria para avaliar a qualidade e a durabilidade dos materiais, bem como para garantir que atendam aos requisitos específicos de uma aplicação.

2.1.1.3 Chapas metálicas

As chapas metálicas podem ser definidas como produtos planos laminados de aço com largura superior a 500mm. Elas são categorizadas em chapas grossas, quando têm espessura superior a 5mm, e chapas finas, igual ou inferior a 5mm (PIGNATTA E SILVA, 2012).

As chapas grossas são produzidas com espessuras variando entre 5 mm e 150 mm, largura de 1m a 3,8m e comprimento de 6m a 12m. As dimensões preferenciais, que são as mais econômicas, incluem largura de 2,44m, comprimento de 12m e espessuras como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Espessuras padrão de chapas grossas de aço

6,30mm	25,0mm
8,00mm	31,5mm
9,50mm	37,5mm
12,5mm	50,0mm
16,0mm	63,0mm
19,0mm	75,0mm
22,4mm	100,0mm

Fonte: Pignatta e Silva (2012)

Quadro 2 - Espessuras padrão de chapas finas de aço

0,60mm	2,25mm
0,75mm	2,65mm
0,85mm	3,00mm
0,90mm	3,35mm
1,06mm	3,75mm
1,20mm	4,25mm
1,50mm	4,50mm
1,70mm	4,75mm
1,90mm	5,00mm

Fonte: Pignatta e Silva (2012)

As chapas finas são produzidas pelas siderúrgicas com espessuras variando entre 0,6mm e 5,0mm. Elas geralmente apresentam largura-padrão entre 1,0m e 1,5m e comprimento-padrão entre 2m e 6m. As dimensões preferenciais são 1,2m por 2,0m e 1,2m por 3,0m. Além disso, as chapas finas podem ser fornecidas em bobinas, o que geralmente resulta em um custo unitário menor. As espessuras preferenciais estão especificadas no Quadro 2.

2.1.1.4 Perfis metálicos

Dentre os diversos componentes de uma estrutura metálica, como chapas de ligação, parafusos e chumbadores, os perfis que assumem importância no projeto, fabricação e montagem.

Os perfis de uso comum têm seções transversais que se assemelham às letras I, H, U e Z, recebendo nomes que refletem essas formas. Além disso, a forma da letra L é denominada de cantoneira quando se trata de um perfil angular.

Esses perfis podem ser produzidos de duas maneiras principais: por laminação direta ou através de processos de conformação a frio ou soldagem. Eles são respectivamente chamados de perfis laminados, formados a frio e soldados. Cada método de produção tem suas próprias vantagens e aplicações específicas em diferentes contextos de construção metálica.

2.1.1.4.1 Perfis soldados

Perfis soldados são estruturas compostas por chapas de aço que são unidas por meio de soldagem a arco elétrico (PIGNATTA E SILVA, 2012).

Esses perfis são amplamente utilizados na construção de estruturas de aço devido à sua grande versatilidade, permitindo diversas combinações de espessuras, alturas e larguras. Isso resulta na redução do peso total da estrutura em comparação com os perfis laminados disponíveis no mercado brasileiro (PIGNATTA E SILVA, 2012). No entanto, é importante notar que o custo de fabricação dos perfis soldados é geralmente superior ao custo de laminação dos perfis tradicionais (PFEIL; PFEIL, 2021).

A produção dos perfis soldados é realizada pelos fabricantes de estruturas metálicas por meio do corte e soldagem das chapas fabricadas pelas usinas siderúrgicas. Ao realizar a soldagem, é crucial especificar o material de solda de acordo com o tipo de aço a ser soldado. Isso implica garantir que o material de solda possua características semelhantes de resistência mecânica, resistência à corrosão, entre outras propriedades, para assegurar a integridade e a durabilidade da estrutura final.

A norma ABNT NBR 5884, intitulada “Perfil I Estrutural de Aço Soldado por Arco Elétrico”, detalha as características geométricas de uma variedade de perfis I e H soldados, além de definir tolerâncias durante o processo de fabricação. Estes perfis são classificados em duas séries: simétrica e monossimétrica.

Na série simétrica, os perfis possuem simetria em relação aos eixos X-X e Y-Y. Ela é subdividida em quatro categorias:

- Série CS: Composta por perfis tipo pilar, com relação $d/b_f = 1$.
- Série CVS: Formada por perfis tipo viga-pilar, com $1 < d/b_f \leq 1,5$.
- Série VS: Inclui perfis tipo viga, com $1,5 < d/b_f \leq 4$.
- Série PS: Contém perfis simétricos, sem dimensões especificadas na norma, mas que seguem as demais especificações brasileiras.

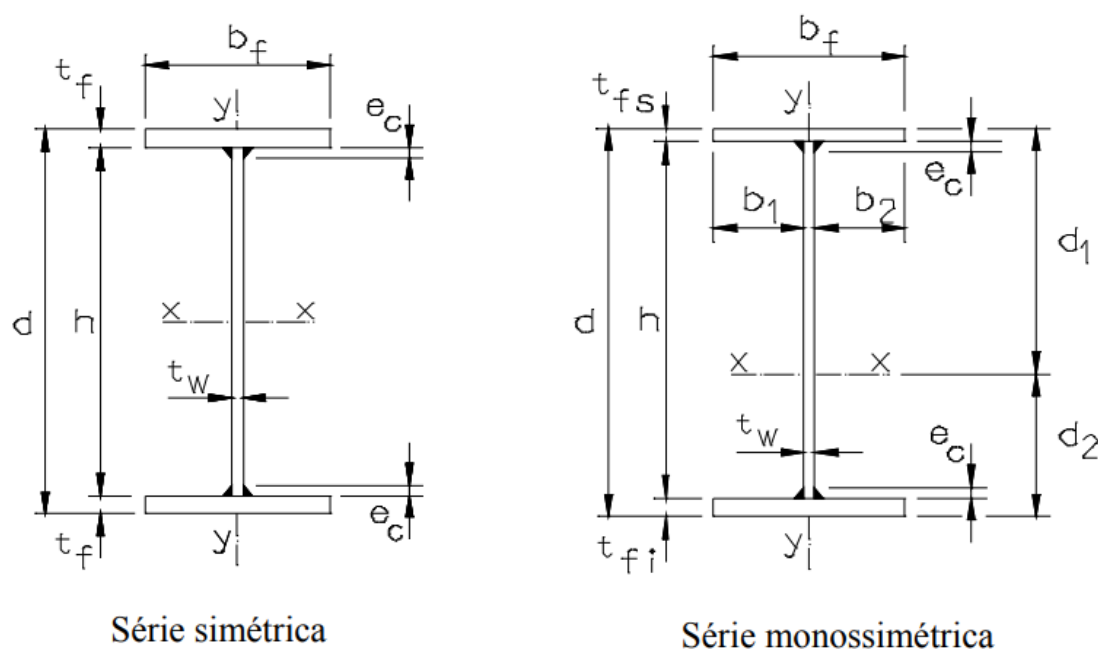
Já na série monossimétrica, os perfis não possuem simetria em relação ao eixo X-X, mas são simétricos em relação ao eixo Y-Y. Esta série também é dividida em duas categorias:

- Série VSM: Inclui perfis monossimétricos tipo viga, com $1 < d/b_f \leq 4$., onde as mesas possuem larguras idênticas e espessuras diferentes.

- Série PSM: Contém perfis monossimétricos, inclusive aqueles com larguras de mesas diferentes entre si, sem dimensões indicadas na norma, mas que seguem outras especificações brasileiras.

A designação dos perfis I soldados é feita pela série, seguida da altura em milímetros e da massa aproximada em quilogramas por metro. Por exemplo, um perfil da série CS com 300 mm de altura, 300 mm de largura de mesa e uma massa de 62,4 kg/m é designado como CS 300x62. Um perfil da série VSM com 450 mm de altura, 200 mm de largura de mesa e uma massa de 48,9 kg/m é designado como VSM 450x49.

Figura 2 – Perfis soldados série simétrica e monossimétrica



Fonte: Pignatta e Silva (2012)

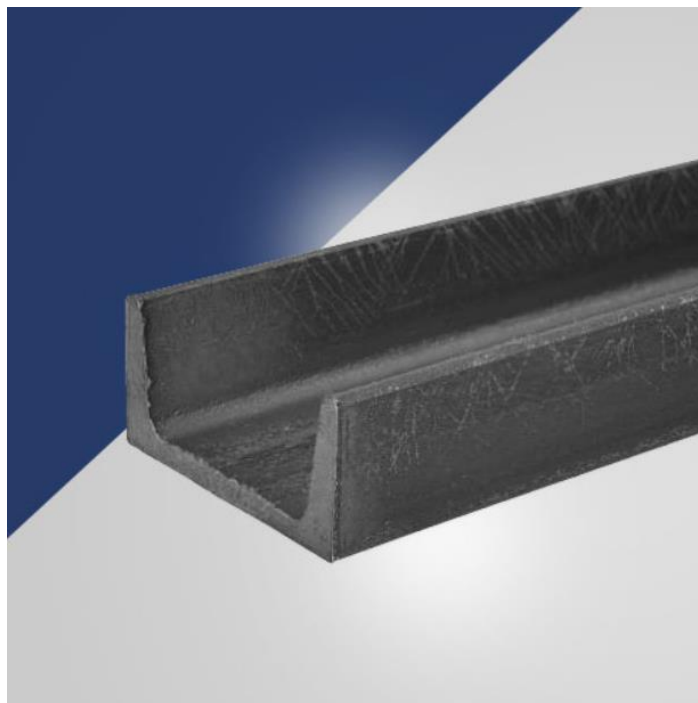
2.1.1.4.2 Perfis laminados

Perfis laminados são aqueles fabricados a quente nas usinas siderúrgicas e são os mais econômicos para utilização em edificações de estruturas metálicas, pois dispensam a fabricação “artesanal” dos perfis soldados ou dos perfis formados a frio (PIGNATTA E SILVA, 2012).

No Brasil, os perfis laminados são categorizados em duas séries: W e HP. A designação desses perfis segue o padrão da série, seguido pela altura e pela massa por unidade de comprimento. Por exemplo: W 310 x 44,5 ou HP 250 x 62.

O aço comumente utilizado na fabricação desses perfis é o ASTM A 572 Gr 50, com $f_y = 345$ MPa e $f_u = 450$ MPa.

Figura 3 – Perfil U laminado



Fonte: Aço mais (2023)

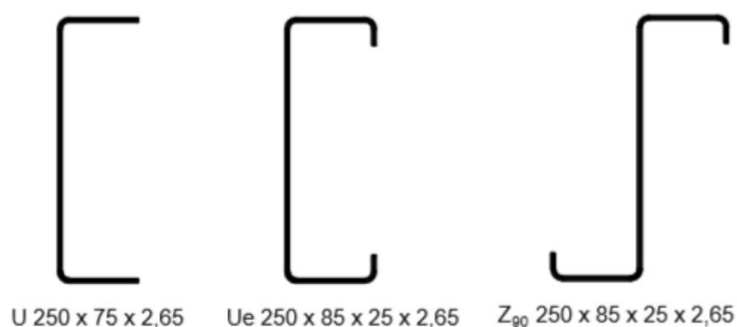
2.1.1.4.3 Perfis estruturais formados a frio

No mercado, nem sempre é possível encontrar perfis laminados com dimensões adequadas para projetos de elementos estruturais leves, como terças, montantes, diagonais de treliças, e travamentos, devido à baixa demanda por esses produtos. Em contrapartida, os perfis estruturais formados a frio, também conhecidos como perfis de chapas dobradas, oferecem a vantagem de serem fabricados nas dimensões desejadas para atender às necessidades específicas de cada aplicação (PIGNATTA E SILVA 2012).

Esses perfis formados a frio, compostos por chapas finas, possuem características ideais para uso em estruturas civis, incluindo leveza, facilidade de fabricação, manuseio e transporte, além de apresentarem resistência e ductilidade adequadas (PIGNATTA E SILVA, 2012). Em estruturas de maior porte, a utilização de perfis formados a frio duplos, em seção unicelular (tubular-retangular), também conhecidos como seção-caixão, pode resultar em estruturas mais econômicas em algumas situações específicas. Isso se deve à boa rigidez à torção, eliminando a

necessidade de travamentos adicionais e à menor área exposta, reduzindo a quantidade de tinta necessária para a pintura, e à menor área de estagnação de líquidos ou detritos, diminuindo a probabilidade de corrosão.

Figura 4 – Perfis formados a frio



Fonte: Dos Santos (2020)

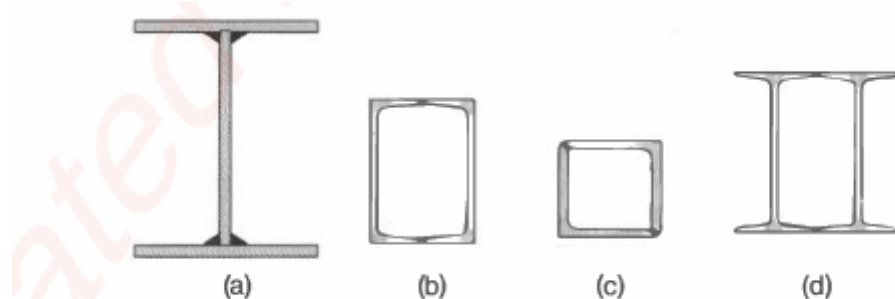
Os perfis formados a frio são criados pelo processo de dobramento a frio das chapas. Esse dobramento pode ser realizado de forma contínua ou descontínua. No processo contínuo, adequado para fabricação em série, uma chapa de aço é deslocada longitudinalmente sobre roletes em uma linha de perfilação. Gradualmente, os roletes dão à chapa a forma definitiva do perfil desejado. Quando o perfil sai da linha de perfilação, ele é cortado de acordo com o comprimento especificado no projeto.

No processo descontínuo, ideal para produção em pequenas quantidades de perfis, utiliza-se uma prensa dobradeira. Nesse processo, a matriz da dobradeira é pressionada contra a chapa de aço, forçando-a a formar uma dobra. Repetindo essa operação várias vezes na mesma chapa, a seção do perfil adquire a geometria necessária conforme especificado no projeto. Contudo, o comprimento do perfil está limitado à largura da prensa utilizada.

2.1.1.4.4 Perfis compostos

São perfis obtidos pela composição, por meio de soldagem ou aparafusamento, de chapas ou outros perfis.

Figura 5 – Perfis compostos

**Fig. 1.22** Perfis compostos de chapas (perfis soldados) ou de perfis laminados.

Fonte: Pfeil (2021)

2.1.2 Concreto

A utilização de materiais cimentícios remonta a tempos antigos. Os antigos egípcios utilizavam gesso impuro, enquanto gregos e romanos empregavam calcário calcinado. Mais tarde, aprenderam a adicionar areia, pedra fragmentada, tijolos ou telhas ao calcário e água, criando assim o primeiro concreto da história. A argamassa de cal não endurece sob a água, levando os romanos a moer cal junto com cinzas vulcânicas ou telhas de barro cozido finamente moídas para construções submersas. A reação da sílica, alumina e fragmentos de telha com a cal resultou no que conhecemos como cimento pozolânico, nome derivado da cidade de Pozzuoli, próxima ao monte Vesúvio, onde as cinzas foram inicialmente encontradas.

O termo "cimento pozolânico" ainda é utilizado para descrever cimentos obtidos pela simples moagem de materiais naturais em temperatura ambiente. Estruturas históricas como o Coliseu em Roma e a *Pont du Gard* próxima a Nimes, construídas com argamassa, e o Panteão em Roma, construído com concreto, permanecem firmes até os dias atuais. Nas ruínas de Pompeia, a argamassa se manteve em melhor estado do que as rochas brandas, resistindo melhor às condições climáticas ao longo dos anos (NEVILLE, 2016).

O concreto é um material composto, constituído por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (brita ou pedra), sendo mais comum a brita 1, e pode conter adições e aditivos químicos com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas (SANTOS COUTO et al., 2013). São exemplos de adições a cinza volante, a pozolana natural, a sílica ativa, metacaulim, entre outras. O concreto também pode conter outros materiais, como pigmentos coloridos, fibras, agregados especiais,

etc. No caso de aditivos, são largamente empregados os plastificantes e os superplastificantes, para reduzir a quantidade de água do concreto e possibilitar a trabalhabilidade necessária (SÉRGIO BASTOS, 2023).

2.1.2.1 Propriedades do concreto

Nesta seção serão abordadas as propriedades mecânicas do concreto, que são determinadas através de ensaios para controle da qualidade e atendimento às especificações.

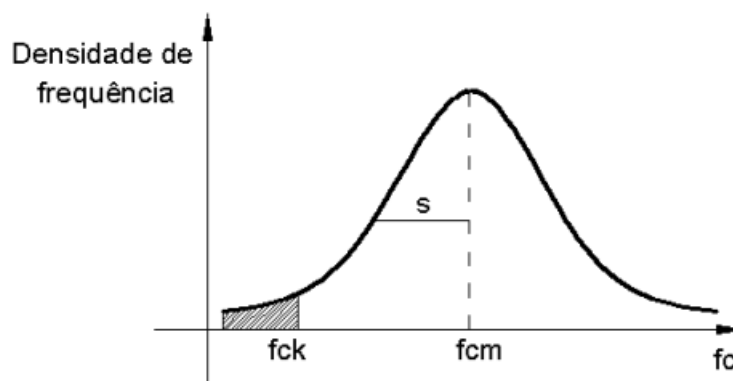
2.1.2.1.1 Resistência do concreto à compressão

A resistência à compressão simples, é uma das características mais importantes e é crucial avaliar a qualidade e a durabilidade do concreto. Para estima-la em um lote de concreto, são moldados e preparados corpos de prova de acordo com a norma NBR 5738, intitulada “Moldagem e Cura de Corpos de prova Cilíndricos ou Prismáticos de concreto”. Esses corpos de prova são posteriormente submetidos a ensaios de compressão, fornecendo dados essenciais sobre a capacidade do concreto de suportar cargas sob compressão simples, conforme ensaios da NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

O corpo de prova padrão brasileiro é o cilíndrico, com 15cm de diâmetro e 30cm de altura, e a idade de referência para o ensaio é de 28 dias (PINHEIRO, MUZARDO, SANTOS, 2004).

Após realizar ensaios em um grande número de corpos-de-prova, é possível criar um gráfico com os valores obtidos de resistência à compressão (f_c) em relação à quantidade de corpos-de-prova correspondentes a um determinado valor de f_c , o que é conhecido como densidade de frequência. A curva resultante é chamada de Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão (Figura 6).

Figura 6 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.



Fonte: PINHEIRO, MUZARDO, SANTOS (2004)

Na curva de Gauss encontra-se a resistência de concreto a compressão, f_{cm} , e resistência característica do concreto à compressão, f_{ck} . O valor de f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos de prova ensaiados. É utilizada a Equação 2.1 para encontrar f_{ck} .

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s \quad (2.1)$$

O desvio padrão s corresponde à distância entre a abscissa de f_{cm} e o ponto de inflexão da curva. O valor de 1,65 correspondente ao quantil 5%, ou seja, apenas 5% dos corpos de prova possuem $f_c < f_{ck}$. Portanto, pode se definir f_{ck} como sendo o valor da resistência que tem 5% de probabilidade de não ser alcançado, em ensaio de corpos de prova de um determinado lote de concreto.

No projeto de estruturas de concreto, o engenheiro estrutural determina a resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias, conhecida como f_{ck} , e utiliza essa informação como um parâmetro fundamental nos cálculos dos elementos estruturais, como vigas, lajes, pilares, entre outros. A escolha adequada da resistência f_{ck} é essencial para garantir que a estrutura atenda aos requisitos de segurança e durabilidade.

A NBR 8953, que é a norma brasileira que trata das classes de concreto, classifica os concretos em dois grupos principais, com base em sua resistência característica à compressão (f_{ck}):

Grupo I: Abrange as classes de concreto com resistência característica à compressão de C20, C25, C30, C35, C40, C45 e C50. Essas classes são geralmente utilizadas em aplicações convencionais de construção civil, onde as cargas e os requisitos de resistência são moderados.

Grupo II: Este grupo inclui as classes de concreto com resistência característica à compressão de C55, C60, C70, C80, C90 e C100. Essas classes são caracterizadas por terem resistências à compressão mais elevadas e são geralmente utilizadas em projetos que exigem concretos de alta resistência, como estruturas de pontes, edifícios de grande porte, obras de engenharia civil mais complexas, etc.

2.1.2.1.2 Resistência à tração

Os conceitos relacionados à resistência do concreto à tração direta (f_{ct}) são semelhantes aos mencionados no item anterior para a resistência à compressão. Assim, tem-se a resistência média do concreto à tração (f_{ctm}), que é o valor obtido pela média aritmética dos resultados dos ensaios. Além disso, existe a resistência característica do concreto à tração (f_{ctk} ou simplesmente f_{tk}), que representa o valor da resistência que tem apenas 5% de probabilidade de não ser alcançado pelos resultados de um determinado lote de concreto (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

A diferença no estudo de tração encontra-se nos tipos de ensaio. Há três ensaios normalizados: tração direta, compressão diametral e tração na flexão.

No ensaio de tração direta, f_{ct} é determinada aplicando-se tração axial, até a ruptura. O corpo de prova utilizado possui uma seção central retangular, medindo 9cm por 15cm e as extremidades são quadradas, com 15cm de lado.

O ensaio de tração na compressão diametral é o mais utilizado, também é conhecido como Ensaio Brasileiro, pois quem o desenvolveu foi Lobo Carneiro, em 1943. O corpo de prova utilizado é cilíndrico de 15cm por 30cm. Ele é posicionado horizontalmente entre os pratos da prensa e uma força é aplicada até que ocorra a sua ruptura por tração indireta, geralmente resultando em fendilhamento (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

O ensaio de tração na flexão utiliza corpo de prova com seção prismática e é submetido à flexão, com carregamentos em duas seções simétricas, até a ruptura. O ensaio também é conhecido por “carregamento nos terços”, pois as seções carregadas se encontram nos terços do vão.

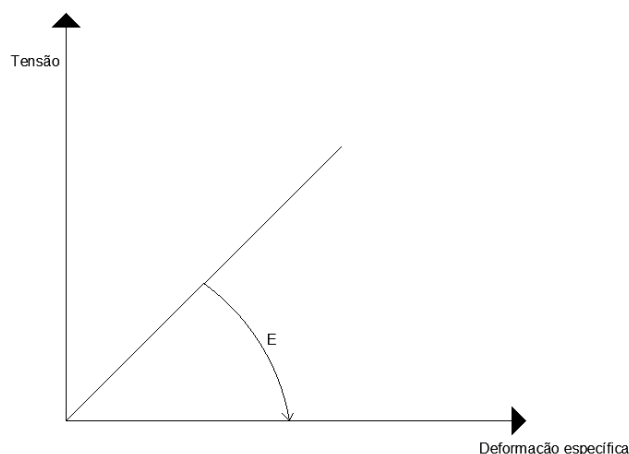
2.1.2.1.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é outro aspecto fundamental no projeto de estruturas de concreto, que diz respeito à relação entre as tensões e as deformações. Na teoria da

Resistência dos Materiais, sabe-se que essa relação, para determinados intervalos, pode ser considerada linear, seguindo a Lei de Hooke, ou seja, $\sigma = E \varepsilon$, onde σ representa a tensão, ε a deformação específica e E o Módulo de Elasticidade ou Módulo de Deformação Longitudinal (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

Para o concreto será utilizado o módulo de elasticidade de $21287,4 \cdot 10^6$.

Figura 7 – Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal



Fonte: A autora (2023)

2.2 TIPOS DE LAJES

Lajes são elementos planos com largura e comprimento bem maiores que a altura, cujo carregamento é perpendicular ao plano médio que contém a largura e comprimento.

As lajes têm grande deformabilidade. Em ensaios de laboratório elas fissuram muito, mas dificilmente se rompem. A deformação no centro da laje (flecha) deve ser controlada (ALMEIDA, 2006).

2.2.1 Laje maciça

A laje maciça é uma placa com espessura uniforme, sustentada ao longo de sua área. Esse elemento estrutural é responsável pelo recebimento de cargas de utilização aplicadas nos pisos das edificações e transmissão aos apoios (SPOHR, 2008). É fabricada no local de construção, sendo moldada *in loco*, e consiste principalmente de concreto e aço em sua composição. Uma das vantagens das lajes maciças é que elas não requerem mão de obra altamente especializada para sua construção. Além disso, seu tempo de execução é razoável, embora possa variar dependendo das condições e

do tamanho da laje, mas envolve o processo de cura do concreto para garantir sua resistência e durabilidade (CARVALHO; FILHO, 2007).

Lajes maciças são comuns em muitos tipos de construções, desde residências até edifícios comerciais e industriais. Sua simplicidade de construção e capacidade de suportar cargas tornam-nas uma escolha popular na engenharia civil (SPOHR, 2008).

2.2.2 Laje pré-moldada

Ela é composta por elementos pré-fabricados, como vigotas e lajotas de concreto ou cerâmica, que são fabricados em uma instalação especializada antes de serem transportados para o local de construção. Esses elementos pré-fabricados são então montados *in loco* para formar a laje completa.

Lajes pré-moldadas são frequentemente utilizadas em uma variedade de tipos de edifícios, incluindo edifícios comerciais, residenciais, industriais e de infraestrutura, devido à sua capacidade de acelerar o processo de construção e melhorar a precisão das estruturas.

2.2.3 Laje mista com *deck* metálico

As lajes mistas com *deck* metálico, conhecidas atualmente como Steel Deck, consistem em perfis de aço galvanizado que são incorporados à laje de concreto, geralmente moldada *in loco*. Esses perfis de aço desempenham um papel fundamental no sistema, funcionando como uma forma para a concretagem e também como uma proteção para as cargas aplicadas na parte superior da laje. Essa categoria específica de laje será abordada de maneira detalhada na Seção 2.3.

2.3 SISTEMA LAJE STEEL DECK

O conceito de laje mista ou laje com forma colaborante teve origem nos Estados Unidos na década de 1950 e passou a ser amplamente adotado, especialmente em edifícios metálicos de vários andares. Atualmente, esse tipo de laje é observado tanto em novos edifícios quanto em reformas de edifícios mais antigos nas principais cidades dos Estados Unidos, como Manhattan, Boston e Chicago (BARROS, 2014).

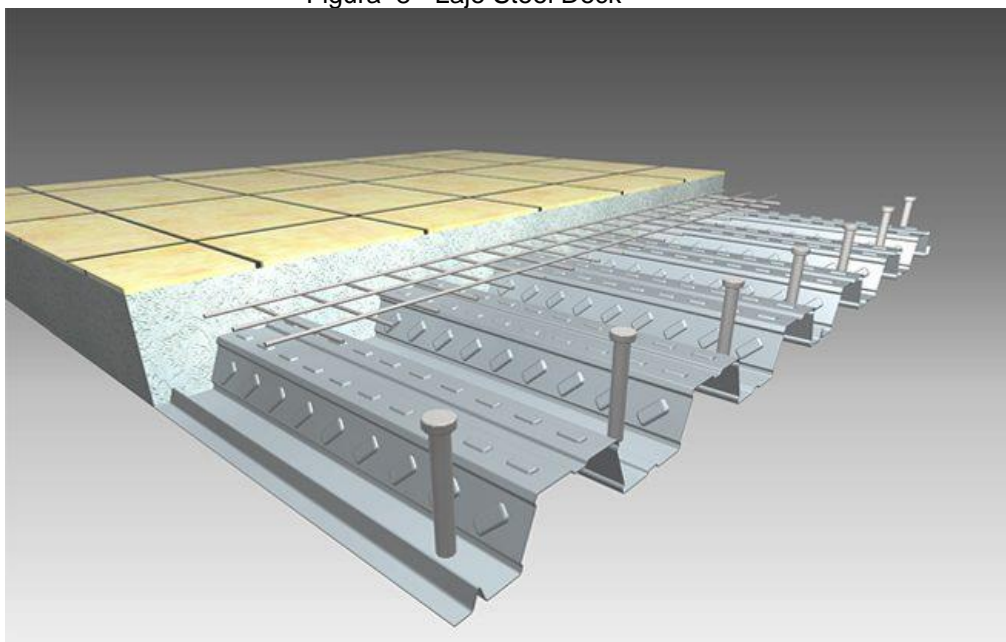
No Brasil, a introdução do sistema de Steel Deck começou na década de 1970 pela empresa Robtek, que era uma associação entre a empresa americana Robertson e

a brasileira Tekno (BARROS, 2014). Cerca de uma década depois, tanto a Robtek quanto o produto Steel Deck passaram a ser operados pela Hironville do Brasil. Paralelamente, a empresa Tekno também lançou seu próprio sistema de Steel Deck por meio de sua divisão Perkrom. Na mesma época, a empresa Metform também introduziu sua versão de laje colaborante no mercado brasileiro. Essas empresas competiram em um mercado que, na época, era relativamente restrito, mas com um potencial promissor devido às vantagens desse tipo de sistema construtivo (BARROS, 2014).

Segundo o site Portal Metálica (2021), o Steel Deck é conformado a frio e cobre uma largura útil de 820 a 840 mm, possui nervuras largas e com a utilização de conectores de cisalhamento, chamados de *stud bolts*, permite a interação do concreto com o aço o que possibilita o cálculo de vigas mistas, permitindo uma redução do peso da estrutura. Ele é produzido com um tipo de aço galvanizado especial e está disponível em três espessuras diferentes: 0,80 mm, 0,95 mm e 1,25 mm. Além disso, o Steel Deck pode ser adquirido em comprimentos de até 12 metros.

Uma das características notáveis desse sistema é a maneira como ele integra as vantagens do aço e do concreto de maneira harmoniosa. O Steel Deck envolve o uso de uma fôrma permanente feita de aço galvanizado, que é perfilado e moldado a frio. Nesse sistema, o aço desempenha um papel duplo, atuando como fôrma durante o processo de concretagem e, posteriormente, como armadura positiva para resistir às cargas de serviço. Para melhorar a aderência do concreto ao aço, a chapa metálica é projetada com relevos e ranhuras que servem como superfície de ancoragem. Além disso, o Steel Deck é reforçado por malha nervurada que funciona como armadura negativa, contribuindo para prevenir trincas superficiais na laje. Esse sistema eficiente e cuidadosamente projetado aproveita ao máximo as qualidades do aço e do concreto, proporcionando uma estrutura robusta e durável (Figura 8).

Figura 8 - Laje Steel Deck



Fonte: Grupo Mbp (2023)

2.3.1 Elementos da laje Steel Deck

2.3.1.1 Deck metálico

O deck metálico desempenha duas funções distintas. Primeiramente, ele serve como forma para o concreto durante a construção. Em seguida, atua como uma armadura positiva para suportar as cargas de serviço. O deck possui nervuras largas, nas quais são aplicados os *Stud Bolts*, que estabelecem a ligação entre o deck metálico e a viga de suporte.

O catálogo da *Metform*, que será usado como referência, possui dois modelos:

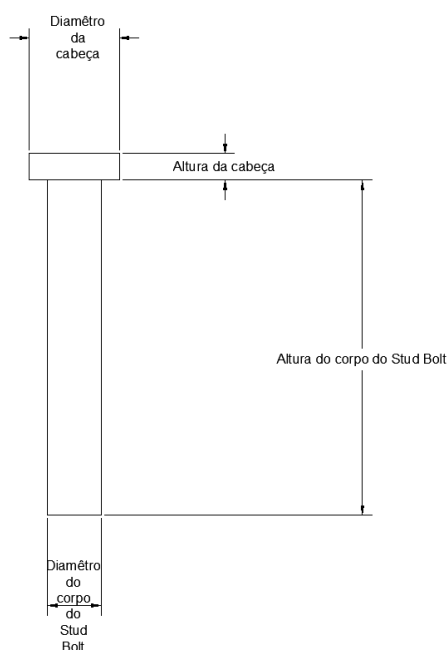
- MF 75 – Possui largura útil de 820mm, recomendado o uso para empreendimentos industriais e lajes com necessidade de resistência a cargas elevadas.
- MF 50 – Possui largura útil de 915mm, recomendado o uso em edificações urbanas tipo hotéis, hospital, escritórios, edifícios, garagens e etc.

O Steel Deck é fabricado com aço especial galvanizado ASTM A 653 Grau 40, com espessuras de 0,8mm, 0,95mm e 1,25mm, com comprimento de até 12 metros.

2.3.1.2 Conectores de cisalhamento (*Stud Bolts*)

Os *Stud Bolts*, ou conectores de cisalhamento, têm uma aplicação específica em estruturas de vigas mistas e em lajes mistas. Sua função principal é estabelecer uma conexão entre as vigas metálicas e a laje de concreto, absorvendo esforços de cisalhamento longitudinais e evitando o afastamento vertical entre a laje e a viga. É importante fixá-los após a conclusão da montagem da estrutura metálica, mas antes da concretagem. Um cuidado essencial é garantir que não haja presença de umidade nas soldagens do conector, o que pode afetar negativamente sua eficácia e a qualidade geral da ligação (CARVALHO, 2015). Portanto, o uso dos *Stud Bolts* deve ser realizado com atenção aos detalhes técnicos para assegurar a integridade da estrutura.

Figura 9 – Desenho *Stud Bolts*



Fonte: A autora (2023)

2.3.1.3 Armaduras

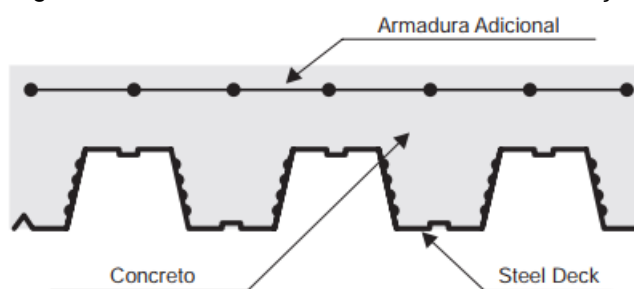
Um dos principais diferenciais do sistema Steel Deck em comparação com o método das lajes convencionais é a capacidade de utilizar a própria forma de aço como armadura positiva para a laje. No entanto, é crucial também empregar armaduras adicionais. Essas armaduras complementares desempenham um papel fundamental na prevenção do surgimento de fissuras no concreto causadas por variações térmicas e pela retração do concreto (QUEIROZ; PIMENTA; MARTINS, 2012). Elas ajudam a

absorver as tensões que podem se desenvolver no concreto devido a esses fatores, contribuindo para a durabilidade e a integridade da estrutura como um todo.

Conforme as diretrizes da NBR 14323 (2013), a armadura antifissuração deve ter uma área de seção em ambas as direções que seja 0,10% superior à área de capeamento do concreto sobre a telha.

Portanto, o uso adequado de armaduras complementares é uma prática importante para garantir o desempenho eficaz do sistema Steel Deck em diversas condições.

Figura 10 – Posicionamento armadura antifissuração



Fonte: Metform (2019)

2.3.1.4 Concreto

Recomenda-se concreto convencional, com resistência a compressão (f_{ck}) maior ou igual a 20 MPa (METFORM, 2019). No capeamento, deverá ser utilizada armadura nas duas direções a fim de evitar fissuras por retração e/ou variações de temperatura do concreto. De acordo com as prescrições da NBR 14323 (2013), esta armadura deverá ter área maior ou igual a 0,1% da área do capeamento de concreto da laje.

2.3.2 Vantagens

As lajes Steel Deck possuem várias vantagens em comparação à laje de concreto armado. São elas:

- Os elementos que fazem parte do Steel Deck são mais leves e práticos;
- Proporcionam rapidez construtiva;
- Facilita a passagem de tubulação para instalações hidrossanitárias, elétricas, entre outras;

- Reduzido o desperdício de material, com conseqüente redução do número de caçambas de resíduos;
- A obra se mantém mais limpa;
- Há uma maior segurança para quem trabalha na obra, pois a laje é autoportante antes da concretagem;
- Caso o vão da laje seja inferior a 4m, dispensa o uso de escoramento, facilitando a montagem da laje.

2.3.3 Elementos laje de concreto armado

2.3.3.1 Forma de madeira

A utilização de formas de madeira é uma prática antiga na construção civil, ainda amplamente empregada em obras de pequeno e grande porte. De acordo com Nazar (2007), esse sistema é predominante no Brasil devido à tradição das empresas que o utilizam e à sua acessibilidade.

2.3.3.1.1 Madeira serrada

Segundo Freitas *et al.* (2015), na construção civil, é comum o uso de madeiras serradas em diversas formas, como pranchões, pontaletes, vigas e tábuas. As fôrmas feitas com esse tipo de madeira são conhecidas como 'tábua comum'. Essas madeiras são obtidas ao cortar toras longitudinalmente com serras. No Brasil, elas são provenientes de árvores nativas no Norte, de Pinus no Sul e de eucalipto no Sudeste, podendo ser utilizadas em seu estado natural ou passar por processos de beneficiamento.

De acordo com Carmo (2007), as madeiras serradas apresentam baixa durabilidade, dificuldade de acabamento nas pontas e uma limitada quantidade de fornecedores especializados. Além disso, por serem um recurso natural, é crucial que a exploração da madeira seja realizada de forma sustentável, garantindo a preservação do meio ambiente.

Figura 11 – Forma de madeira serrada

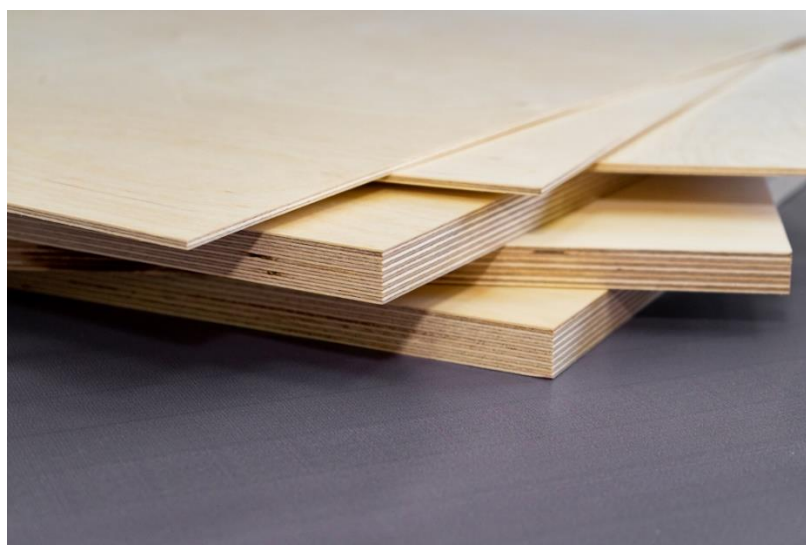


Fonte: Carmo (2007)

2.3.3.1.2 Madeira compensada

O painel compensado é produzido pela união de várias lâminas dispostas umas sobre as outras, de modo que estejam perpendiculares entre si. Essas lâminas são unidas por meio de adesivo ou cola, sendo que o número de lâminas é sempre ímpar. Esse arranjo possibilita que uma lâmina compense as características da outra, conferindo maior estabilidade ao painel. Além disso, algumas propriedades físicas e mecânicas do painel compensado podem ser superiores às da madeira original devido a essa técnica de fabricação (IPT, 2003).

Figura 12 – Chapa compensada



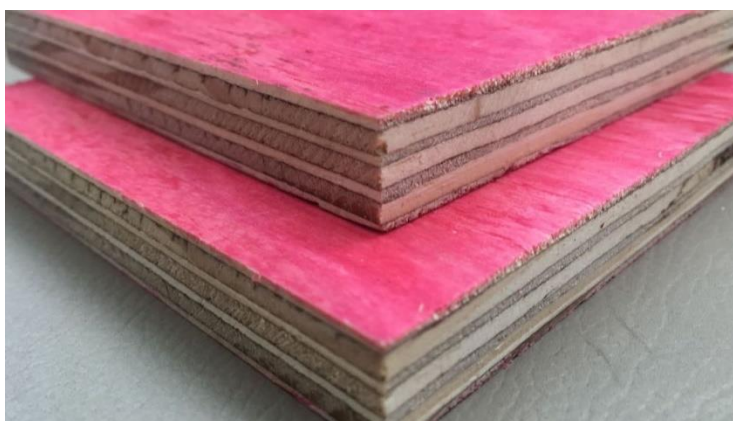
Fonte: Leo Madeiras (2020)

2.3.3.1.3 Compensado resinado

As chapas de madeira revestidas são essencialmente chapas compensadas que passam por um tratamento com resina fenólica líquida em suas superfícies e laterais. No entanto, esse método de revestimento não oferece uma proteção muito eficaz, pois o processo de polimerização da chapa não é totalmente eficiente, conforme indicado por Maranhão (2000) *apud* De Freitas (2015).

Durante o processo de concretagem, a resina é gradualmente removida, o que reduz a proteção da chapa. Como resultado, o número de vezes que o painel pode ser reaproveitado é limitado, geralmente a 4 ou 5 reutilizações.

Figura 13 – Chapa compensada resinada

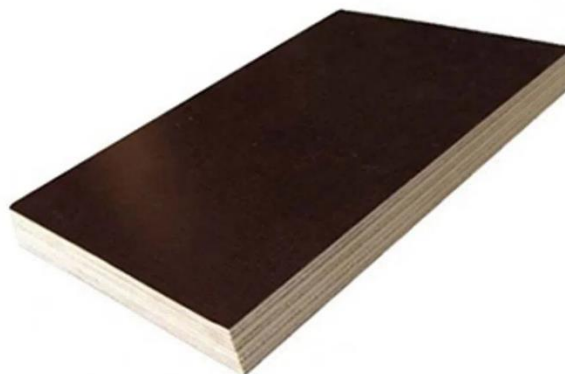


Fonte: Celere (2022)

2.3.3.1.4 Chapa compensada plastificada

São chapas compensadas que recebem uma camada de resina fenólica em sua superfície, de maneira semelhante à aplicação em madeiras resinadas, porém, na forma de filme. Além disso, suas laterais são impermeabilizadas e seladas com resina epóxi. Esse processo confere ao material uma durabilidade significativamente maior, permitindo que seja reutilizado em até 40 vezes, dependendo da aplicação. Além do benefício da reutilização, essas chapas proporcionam um acabamento de alta qualidade ao concreto (Maranhão 2000, *apud* De Freitas, 2015). Por essa razão, são amplamente utilizadas na fabricação de fôrmas mistas, representando uma escolha confiável e eficaz na indústria da construção.

Figura 14 – Chapa compensada plastificada



Fonte: MadMais (2020)

2.3.3.2 Armadura de laje de concreto armado

Os vergalhões são amplamente utilizados na estruturação de pilares, vigas, fundações e lajes, e estão disponíveis em aço dos tipos CA-50 e CA-60. A sigla "CA" refere-se a "Concreto Armado". Essa resistência é determinada por meio de um ensaio padronizado chamado ensaio de resistência à tração de corpos de prova, realizado sob critérios predefinidos.

O CA-50 é um tipo de aço laminado a quente que ultrapassa as exigências da NBR 7480 (2007). Esse tipo de aço oferece maior segurança de utilização e uma excelente aderência ao concreto. As barras do CA-50 são retas e têm um comprimento padrão de 12 metros. No entanto, o material também pode ser fornecido em barras dobradas, conforme necessário e nas dimensões especificadas pelo seu projeto.

Tabela 2 - Tabela vergalhão CA-50

Bitola (pol.)	Bitola (mm)	Peso barra (Kg)	Peso aproximado (Kg/m)
1/4"	6,30	2,940	0,245
5/16"	8,00	4,740	0,395
3/8"	10,00	7,404	0,617
1/2"	12,50	11,556	0,963
5/8"	16,00	18,936	1,578
3/4"	20,00	29,592	2,466
1"	25,00	46,236	3,853
1.1/4"	32,00	75,756	6,313
1.9/16"	40,00	118,380	9,865

Fonte: NBR 7480 (2007)

O CA-60, por outro lado, é fabricado utilizando aço de baixo teor de carbono, conferindo-lhe excelente capacidade de soldagem. Além disso, esse tipo de aço proporciona uma aderência superior ao concreto, melhor ancoragem nas estruturas e uma maior resistência a fissuras no concreto. Assim como o CA-50, as barras retas do CA-60 têm um comprimento padrão de 12 metros e podem ser fornecidas em forma de barras dobradas, conforme a necessidade do projeto, em qualquer quantidade solicitada.

Tabela 3 - Tabela de vergalhões CA-60

Bitola (mm)	Peso barra (Kg)	Peso aproximado (Kg/m)
4,20	1,308	0,109
5,00	1,848	0,154
6,00	2,664	0,222
7,00	3,624	0,302
8,00	4,740	0,395
9,50	6,696	0,558

Fonte: NBR 7480 (2007)

2.3.4 Vantagens

A laje de concreto armado apresenta diversas vantagens:

- **Maior Aderência a Construções Irregulares:** Ideal para estruturas com formatos fluídos e tridimensionais, proporcionando uma adaptação eficaz a diferentes configurações arquitetônicas.
- **Alta Resistência a Trincas e Fissuras:** Oferece uma resistência significativa contra o desenvolvimento de trincas e fissuras, garantindo a durabilidade da estrutura.
- **Facilidade de Execução:** Seu método de construção é bem estabelecido e conhecido, facilitando o processo de execução e tornando-o mais simples e eficiente.
- **Redução de Custos com Mão de Obra:** Por ser um método convencional e familiar para muitos trabalhadores da construção civil, a laje de concreto armado não requer uma mão de obra altamente especializada, o que ajuda a reduzir os custos de construção.

Essas características tornam a laje de concreto armado uma escolha popular e viável em muitos projetos de construção.

3 METODOLOGIA

Nesta seção será detalhado o método empregado para dimensionar tanto a Laje Steel Deck quanto a Laje convencional de concreto armado. O propósito desta seção é apresentar equações, considerações e verificações essenciais para garantir o correto dimensionamento de ambos os sistemas construtivos em análise.

3.1 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO PROJETO DE LAJE STEEL DECK

No estado-limite de serviço, segundo a NBR 8800, deslocamento máximo da forma de aço, considerando seu próprio peso e o peso do concreto fresco, não deve exceder $LF/350$ ou 20mm. Esse valor é estabelecido como critério para aceitabilidade sensorial, sendo LF a medida do vão teórico da forma na direção das nervuras.

3.1.1 Considerações fase final de estado-limite último

Em estado-limite último a forma de aço deve ser verificada com a NBR 14762 (2017), considerando o efeito das mossas nas resistências de cálculo.

Para verificação de estado-limite último, deve se suportar as solicitações de momento fletor, cisalhamento longitudinal, cisalhamento vertical e punção.

3.1.1.1 Momento fletor

Segundo NBR 8800, quando determinado o momento fletor positivo, a forma de aço precisa resistir ao esforço de tração. Quando determinado o momento fletor negativo em lajes contínuas, a forma de aço só contribui nos esforços de compressão se também for contínua.

O dimensionamento se inicia ao calcular-se a força de compressão e tração, com as equações 3.2 e 3.3:

$$N_{cf} = 0,85 b t_c f_{cd} \quad (3.2)$$

Onde:

N_{cf} : Força de compressão no concreto, considerando a interação total ao cisalhamento longitudinal;

b : Largura unitária da laje, tomada igual a 100mm;

t_c : Altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto a compressão.

$$N_{pa} = A_{F,ef} \cdot f_{yd} \quad (3.3)$$

Onde:

N_{pa} : Força de tração na forma de aço, considerando a interação total ao cisalhamento longitudinal;

$A_{F,ef}$: é a área da seção efetiva da forma (correspondente a 1000 mm), determinada desprezando-se a largura das mossas na seção transversal, a menos que se demonstre por meio de ensaios que uma área maior possa ser utilizada;

f_{yd} : Resistência de cálculo ao escoamento do aço forma.

Se $N_{cf} \geq N_{pa}$, significa que a linha neutra passa por cima da forma metálica, caso contrário a linha neutra ficará dentro da forma metálica.

Com o valor de N_{pa} , calcula-se a altura do bloco de compressão do concreto, com a equação 3.4:

$$a = \frac{N_{pa}}{0,85f_{cd}b} \quad (3.4)$$

Onde:

a : é a altura do bloco de compressão do concreto;

b : Largura unitária da laje, tomada igual a 1000mm;

A verificação do momento fletor é feita pelas Equações 3.5 e 3.6; a primeira é utilizada para calcular o momento fletor para a linha neutra acima da forma de aço e a segunda é para calcular o momento fletor para a linha neutra que está passando pela forma. Conforme o item Q.3.1.1.2 da NBR 8800:

$$M_{Rd} = N_{pa}(d_F - 0,5a) \quad (3.5)$$

$$M_{Rd} = N_{cf} y + M_{pr} \quad (3.6)$$

Onde:

M_{Rd} : Momento fletor;

y : Distância entre N_{cf} e N_{pa} ;

M_{pr} : Momento de plastificação da forma de aço, reduzido pela presença da força axial.

y e M_{pr} são necessárias para calcular o momento fletor abaixo da linha neutra, que são encontradas utilizando as Equações 3.7 e 3.8.

$$y = h_t - 0,5t_c - e_p + (e_p - e) \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \quad (3.7)$$

$$M_{pr} = 1,25M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa} \quad (3.8)$$

Onde:

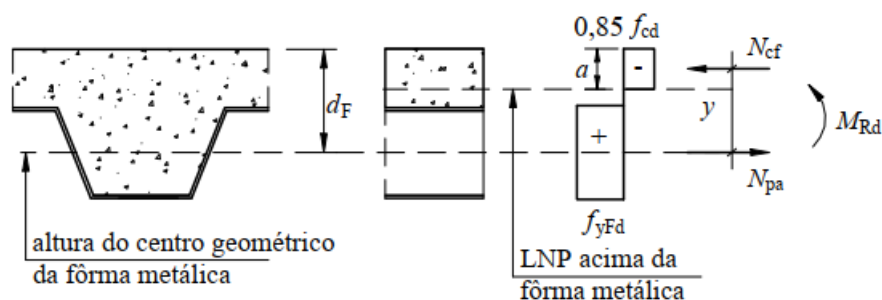
t_c : é a altura da laje de concreto acima do topo da forma de aço;

h_t : é a altura total da laje, incluindo a forma e o concreto;

e : é a distância do centro geométrico da área efetiva da forma à sua face inferior;

e_p : é a distância da linha neutra plástica da seção efetiva da forma à sua inferior.

Figura 15 – Diagrama de tensões para momento positivo – Linha neutra plástica acima da forma de aço



Fonte: NBR 8800 (2008)

Para que uma estrutura seja aprovada, o momento fletor positivo resistente, precisa ser maior que o momento fletor positivo solicitante.

Na laje Steel Deck, a forma atua como uma armadura positiva, mas em algumas situações, ela pode não ser suficiente para suportar os esforços solicitados. Nesses casos, é necessário incluir uma armadura adicional, conforme estipulado pela NBR 6118.

Esse reforço adicional deve ser considerado durante o dimensionamento da estrutura, seguindo as diretrizes estabelecidas na NBR 8800.

O cálculo do momento fletor negativo não está na NBR 8800, mas em apoios intermediários a laje mista deve ser considerada como uma laje de concreto armado. Conforme EUROCODE 4 (2004 apud FABRIZZI, 2007, p. 197), em momento fletor negativo, desconsidera-se a contribuição da forma como a armadura de tração da laje, pois, há inversão dos momentos.

O cálculo do momento fletor é dado pelas equações 3.9 a 3.12:

$$M_{Rd,pl} = A_s \cdot f_{sd} \cdot z \quad (3.9)$$

$$N_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_c \cdot x = A_s \cdot f_{sd} \quad (3.10)$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{sd}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_c} \quad (3.11)$$

$$z = d_s - \frac{x}{2} \quad (3.12)$$

Onde:

$M_{rd,pl}$: Momento fletor negativo resistente;

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 : Distância entre N_s e N_c ;

N_c : Força de compressão;

b_c : Largura de concreto comprimida no interior das nervuras;

x : Altura da linha neutra plástica;

d_s : Altura da posição da armadura negativa.

Para que não haja flambagem local na forma de aço quando preenchido de concreto, a largura plana deve atender as equações 3.13 e 3.14 e segundo Fabrizio (2007), esta verificação deve ser feita quando a resistência à compressão for levada em consideração, ou seja, quando a linha neutra plástica estiver na forma de aço.

$$b_F \leq \frac{26,49 \sqrt{\frac{E}{f_{YF}}}}{(13\alpha - 1)} t_F \quad \text{quando } \alpha \geq 0,5 \quad (3.13)$$

$$b_F \leq \frac{2,40 \sqrt{\frac{E}{f_{YF}}}}{\alpha} t_F \quad \text{quando } \alpha < 0,5 \quad (3.14)$$

Onde:

b_f = largura plana do elemento;

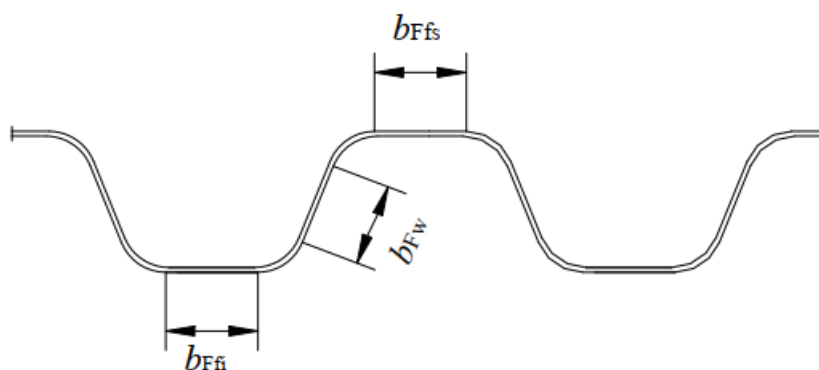
E = módulo de elasticidade do aço;

f_{YF} = resistência ao escoamento do aço da forma;

t_F = espessura da forma de aço;

α = relação entre a largura da parte comprimida e a largura plana do elemento.

Figura 16 – Largura plana dos elementos de forma



Fonte: NBR 8800 (2008)

3.1.1.2 Cisalhamento longitudinal

Conforme explicado por FABRIZZI (2007), este tipo de resistência depende de fatores como atrito entre aço e concreto, reentrâncias e mossas na forma de aço e presença de conectores.

O EUROCODE 4 (2004 apud FABRIZZI, 2007) introduz o método semi-empírico (m-k), que também é adotado pela NBR 8800 para calcular a resistência ao cisalhamento longitudinal. Esse método teve sua origem nos Estados Unidos e é fundamentado em, no mínimo, seis testes realizados em lajes mistas biapoiadas, os quais determinam os valores dos coeficientes m e k . A partir desses testes, é possível calcular a resistência ao cisalhamento longitudinal com precisão.

$$V_{rd,l} = \frac{b \cdot d_f \left[\left(\frac{m A_{F,ef}}{b \cdot L_s} \right) + k \right]}{\gamma_{sl}} \quad (3.15)$$

Onde:

$V_{Rd,l}$ = força cortante longitudinal resistente de cálculo de lajes com forma de aço incorporada, relativa à 1000 mm de largura;

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

d_f = Distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da forma;

m e k = são constantes empíricas, em N/mm²;

$A_{F,ef}$ = Área da seção efetiva da forma;

L_s = vão de cisalhamento, expresso em milímetros;

γ_{sl} = Coeficiente de ponderação da resistência, igual ao determinado pela norma ou especificação utilizada nos ensaios.

Devem ser tomadas as seguintes orientações da NBR 8800 em relação ao vão de cisalhamento L_s :

- Para cargas uniformemente distribuídas, deve-se adotar $L_f/4$, onde L_f é o vão teórico na direção da nervura e para laje contínuas o vão deve ser a distância entre os pontos com momento nulo, onde $0,9L$ para vãos externos e $0,8L$ para vãos internos.
- A distância ente uma carga aplicada e ao apoio mais próximo para duas cargas concentradas simétricas;
- A relação entre maior momento e reação de apoio, para outras condições de carregamento.

3.1.2 Cisalhamento vertical

Conforme a NBR 8800, a força cortante vertical de lajes com forma de aço deve ser determinada pela equação 3.16:

$$V_{v,Rd} = V_{v,F,Rd} + V_{v,c,Rd} \leq V_{max} \quad (3.16)$$

Onde:

$V_{v,F,Rd}$ é a força cortante vertical resistente de cálculo da forma de aço incorporada, relativa à 1000mm de largura;

$V_{v,c,Rd}$ é a força cortante vertical resistente de cálculo do concreto, relativa à largura de 1000mm;

V_{max} é um limite da força cortante, relativo à largura de 1000mm.

A força $V_{v,c,Rd}$ é calculada conforme a Equação 3.17:

$$V_{v,c,Rd} = \frac{1000\tau_{Rd}k_v(1,2+40\rho)A_v}{b_n} \quad (3.17)$$

Com

$$\rho = \frac{A_s}{A_v} \leq 0,02 \quad (3.18)$$

$$K_v = \begin{cases} 1,6 - \frac{d}{1000} \geq 1,0 & \text{caso haja armadura longitudinal de tração que se estenda} \\ 1,0 & \text{nos outros casos} \end{cases}$$

$$\tau_{Rd} = \frac{\eta f_{crk,inf}}{\gamma_c} \quad (3.19)$$

$$f_{ctd} = \frac{\eta f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (3.20)$$

$$V_{max} = \frac{1000 \times 0,285 (f_{ck})^{\frac{1}{2}} A_v}{b_n} \quad (3.21)$$

Onde:

$V_{m\acute{a}x}$: Limite da força cortante, relativa à 1000mm de largura;

A_v é a área resistente de concreto expressa em milímetros quadrados;

A_s é a área da armadura longitudinal de tração, referente à área A_v , expressa em milímetros quadrados;

d é a distância da face superior da laje de concreto ao centro da armadura longitudinal de tração, expressa em milímetros;

b_n é a largura entre duas nervuras consecutivas, expressa em milímetros;

$l_{b,nec}$ o comprimento de ancoragem necessário, conforme NBR 6118 para concreto de densidade normal;

$\eta = 0,3 + 0,7 \left(\frac{\rho_c}{2400}\right)$, sendo ρ_c a massa específica do concreto;

$f_{crk,inf}$ é a resistência á tração direta característica inferior do concreto, conforme NBR 6118.

3.1.3 Considerações fase final de estado-limite de serviço

3.1.3.1 Fissuração do concreto

Como apenas a parte inferior da laje está protegida pela forma de aço, a parte superior está exposta a fissuração, principalmente em situações em que não pode ser feito algum tipo de impermeabilização se está sujeito a um ambiente agressivo.

Para evitar fissuras por conta do efeito de retração de temperatura, é necessário em lajes biapoiadas aplicar uma armadura nominal a 20mm do topo do concreto.

Segundo a NBR 8800, $A_{smin} = 0,1\% A_c$ para concretos com densidade normal. Caso seja dimensionado a laje com concreto de densidade diferente, deve-se utilizar o que está na norma EUROCODE 4 (2004 apud FABRIZZI, 2007), sendo para lajes escoradas durante a concretagem $A_{smin} = 0,4\% A_c$ e para lajes não escoradas $A_{smin} = 0,2\% A_c$.

A_c é a área de concreto acima da forma de aço.

A Metform, empresa utilizada para dimensionamento da laje *steel deck* estabeleceu a armadura de retração necessária em telas soldadas conforme a especificação da forma utilizada e a espessura da laje. No Quadro 3 e 4 estão as armaduras para formas MF-50 e MF-75, respectivamente.

Quadro 3 - Consumo de concreto e armadura em tela soldada para forma MF-50

Altura total de 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	Ø3,8XØ3,8 - 150X150	1,21
110	0,0850	Q-75	Ø3,8XØ3,8 - 150X150	1,21
120	0,0950	Q-75	Ø3,8XØ3,8 - 150X150	1,21
130	0,1050	Q-92	Ø4,2XØ4,2 - 150X150	1,48
140	0,1150	Q-92	Ø4,2XØ4,2 - 150X150	1,48
150	0,1250	Q-113	Ø3,8XØ3,8 - 100X100	1,80
160	0,1350	Q-113	Ø4,2XØ4,2 - 100X100	1,80
170	0,1450	Q-138	Ø3,8XØ3,8 - 100X100	2,20

Fonte: Metform (2019)

Quadro 4 - Consumo de concreto e armadura em tela soldada para forma MF-75

Altura total de 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	Ø3,8XØ3,8 - 150X150	1,21
140	0,1025	Q-75	Ø3,8XØ3,8 - 150X150	1,21
1150	0,1125	Q-75	Ø3,8XØ3,8 - 150X150	1,21
160	0,1225	Q-92	Ø4,2XØ4,2 - 150X150	1,48
170	0,1325	Q-113	Ø3,8XØ3,8 - 100X100	1,80
180	0,1425	Q-113	Ø3,8XØ3,8 - 100X100	1,80
190	0,1525	Q-138	Ø4,2XØ4,2 - 100X100	2,20
200	0,1625	Q-138	Ø4,2XØ4,2 - 100X100	2,20

Fonte: Metform (2019)

3.1.3.2 Deslocamento vertical

A NBR 8800 (2008) estabelece que o deslocamento vertical em lajes mistas não pode exceder $L_F/350$, onde L_F representa o vão teórico da laje paralelo às nervuras da chapa. Para verificar se a flecha prevista atende a essa norma, o cálculo da flecha em lajes mistas Steel Deck foi aproximado ao cálculo da flecha máxima em uma viga biapoiada, conforme as diretrizes de Beer e Johnston Jr (1995), determinada pela Equação 3.22:

$$f = \frac{5 \cdot p \cdot l^4}{384 \cdot EI} \quad (3.22)$$

Onde:

f = flecha máxima;

p = carga distribuída total;

l = comprimento da laje de apoio a apoio;

E = módulo de elasticidade do concreto;

I = momento de inércia da laje mista.

3.2 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO PROJETO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO

Nesta Seção serão abordadas considerações e verificações da NBR 6118 necessárias em projeto para o dimensionamento de lajes de concreto armado.

3.2.1 Características de lajes maciças

As lajes maciças devem respeitar limites mínimos de espessura:

- 7 cm para cobertura não em balanço;
- 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30kN;
- 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com no mínimo de $\frac{l}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{l}{50}$ para lajes de piso contínuas;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

3.2.2 Considerações iniciais

Para dimensionar uma laje maciça de concreto armado, deve-se considerar inicialmente, as vinculações das bordas das lajes. Neste trabalho serão consideradas apenas lajes engastadas e apoiadas. Segundo Campos Filho (2011), as lajes apoiadas são aquelas em que a borda é continuamente suportada por alguma viga e parede, enquanto as lajes engastadas possuem uma continuidade além do apoio. Além disso, deve-se também calcular o vão efetivo da laje, conforme Equação 3.23, descrita na NBR 6118:

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \quad (3.23)$$

Onde:

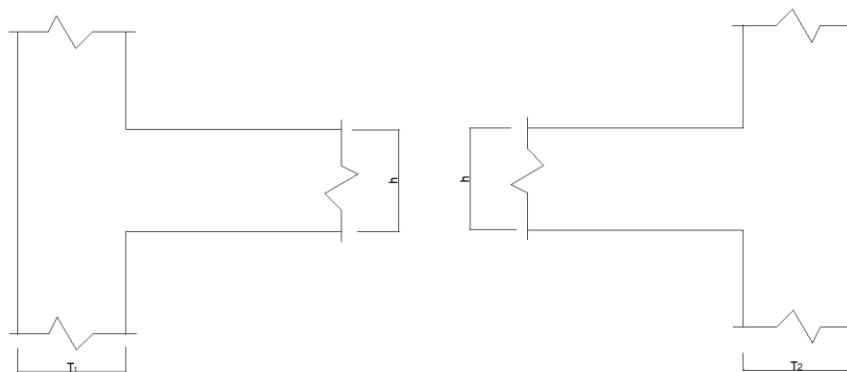
l_{ef} é o vão efetivo da laje;

l_0 é a distância entre as faces internas dos apoios;

a_1 é o menor valor entre $\frac{t_1}{2}$ e 0,3h;

a_2 é o menor valor entre $\frac{t_2}{2}$ e 0,3h.

Figura 17 – Vão efetivo



a) Apoio de vão externo

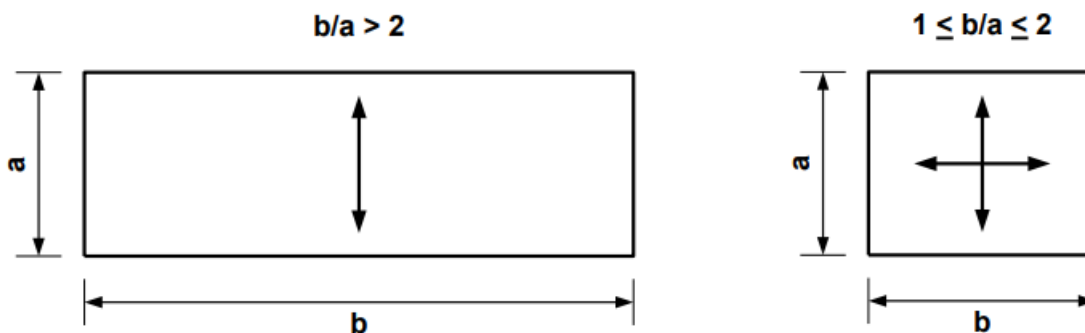
b) Apoio de vão intermediário

Fonte: Adaptado NBR 6118 (2014)

Após o cálculo do vão efetivo, verifica-se a laje maciça será armada em uma ou em duas direções.

A laje armada em uma direção possui a razão entre o maior e menor vão maior que 2, no entanto, a laje armada em duas direções possui a razão entre maior e menor vão menor que 2.

Figura 18 – Laje armada em uma e duas direções



Fonte: Campos Filho (2011)

Onde “a” se refere ao maior vão e o “b” ao menor vão.

3.2.3 Estado limite

Para se definir um carregamento de uma laje, é necessário combinar ações que atuam sobre as estruturas simultaneamente, durante um período. Para isto, existem as combinações de estado-limite último e estado-limite de serviço.

3.2.3.1 Combinações últimas

A NBR 6118 classifica as combinações como normais, especiais (também chamadas de construção) e excepcionais.

Em combinações do tipo normal, estão incluídas ações permanentes e variáveis principais e ações variáveis secundárias, com valores reduzidos.

As combinações especiais possuem ações permanentes e ação variável especial com seus valores característicos e ações variáveis que podem não ser desprezíveis com valores reduzidos.

Nas combinações excepcionais, estão configuradas as ações permanentes e variáveis de mesma maneira que as combinações normais e especiais, porém são utilizadas em situações de incêndio e sismo, conforme NBR 6118.

O Quadro 5 apresenta a combinação e legenda de cada incógnita:

Quadro 5 - Combinações últimas

Combinações últimas (ELU)	Descrição	Cálculo das solicitações
Normais	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \Sigma \Psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \Psi_{0\varepsilon} F_{\varepsilon qk}$
	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto protendido	Deve ser considerada, quando necessário, a força de protensão como carregamento externo com valores $P_{k\max}$ e $P_{k\min}$ para a força desfavorável e favorável, respectivamente, conforme definido na seção 9
	Perda de equilíbrio como corpo rígido	$S(F_{sd}) \geq S F_{nd}$ $F_{sd} = \gamma_{gs} G_{sk} + R_d$ $F_{nd} = \gamma_{gn} G_{nk} + \gamma_q Q_{nk} - \gamma_{qs} Q_{s,min}$
Especiais ou de construção		$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \Sigma \Psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \Psi_{0\varepsilon} F_{\varepsilon qk}$
Excepcionais		$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + F_{q1exc} + \gamma_q \Sigma \Psi_{0j} F_{qjk} + \gamma_{\varepsilon q} \Psi_{0\varepsilon} F_{\varepsilon qk}$

Fonte: Adaptado NBR 6118 (2014)

3.2.3.2 Estado-limite último

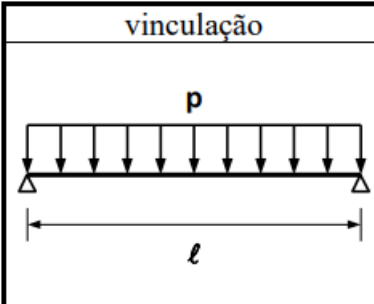
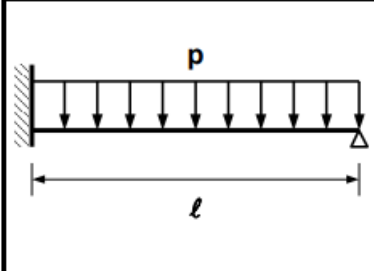
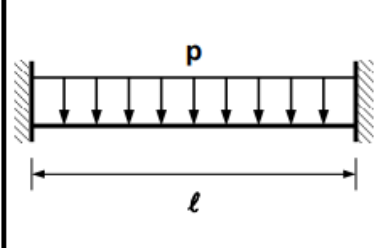
Na análise do estado limite último, os esforços podem ser avaliados por meio da teoria das charneiras plásticas (NBR 6118). Nesse contexto, considera-se o comportamento do concreto armado em regime rígido-plástico, o que é válido para estimar o desempenho das lajes até atingirem o ponto de ruptura (CAMPOS FILHO, 2011).

No estado-limite último, avalia-se apenas o momento fletor, conforme indicado por Campos Filho (2011), especialmente em edifícios, onde as cargas aplicadas são relativamente baixas. Nesse contexto, não é necessário verificar as tensões devido às forças cortantes ou realizar o dimensionamento da armadura transversal.

3.2.3.2.1 Laje armada em uma direção

Para lajes armadas em apenas uma direção, é considerado que as lajes são como vigas biapoiadas em seu menor vão. As equações para momento serão utilizadas em regime rígido-plástico do concreto, conforme Quadro 6, por Campos Filho (2011).

Quadro 6 – Equações para cálculo de momento fletor em lajes armadas em uma direção

vinculação	regime rígido-plástico
	$m_V = p\ell^2/8$ $r = p\ell/2$
	$m_E = -p\ell^2/8,88$ $m_V = p\ell^2/13,32$ $r_E = p\ell/2 + M_E /\ell$ $r_A = p\ell/2 - M_E /\ell$
	$m_E = -3p\ell^2/40$ $m_V = p\ell^2/20$ $r = p\ell/2$

Fonte: Adaptado de Campos Filho (2011)

3.2.3.2.2 Laje armada em duas direções

Para dimensionar, no estado-limite último, deve ser considerado momento fletor em regime rígido-plástico. Será utilizado o método das linhas de ruptura, conforme apresentado por Campo Filho (2011). Usa-se a equação 3.24:

$$m' = -i.m \quad (3.24)$$

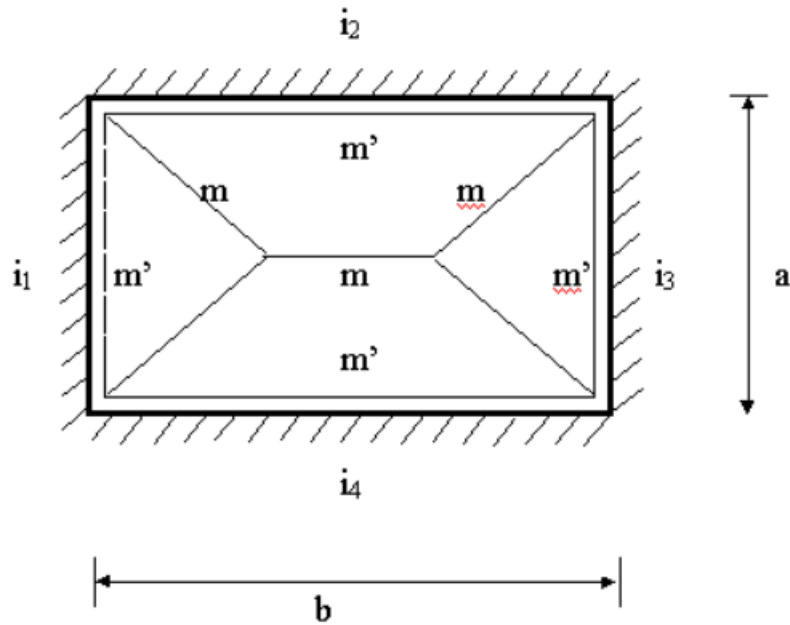
Onde:

m' é o momento fleto negativo no engaste;

i é o grau de engastamento;

m é o momento do vão.

Figura 19 – Momento fletor negativo no engaste



Fonte: Campos Filho (2011)

Conforme NBR 6118, o grau de engastamento deve ser 1,5 para bordas de laje engastadas e 0 para bordas de laje apoiadas.

Os momentos negativos são:

$$m'_1 = -i_1 m_b \quad (3.25)$$

$$m'_2 = -i_2 m_a \quad (3.26)$$

$$m'_3 = -i_3 m_b \quad (3.27)$$

$$m'_4 = -i_4 m_a \quad (3.28)$$

As lajes com a/b entre 0,8 e 1 são chamadas de lajes isotrópicas, isso significa que $m_a = m_b = m$ e $A_{sa} = A_{sb}$. O momento do vão é calculado pela Equação 3.29:

$$m = \frac{p \cdot a_r \cdot b_r}{8 \left(1 + \frac{a_r}{b_r} + \frac{b_r}{a_r} \right)} \quad (3.29)$$

Onde:

p : Carga superficial;

a_r e b_r : São vãos reduzidos que dependem dos graus de engastamento.

$$a_r = \frac{2a}{\sqrt{1+i_2} + \sqrt{1+i_4}} \quad (3.30)$$

$$b_r = \frac{2b}{\sqrt{1+i_1} + \sqrt{1+i_3}} \quad (3.31)$$

As lajes com a/b entre 0,5 e 0,8 são chamadas de lajes ortótropas, isso significa que $m_a \neq m_b = m$ e $A_{sa} \neq A_{sb}$. O momento do vão é calculado pela equação 3.32:

$$m = \frac{p \cdot a_r \cdot b^*_{*r}}{8 \left(1 + \frac{a_r}{b^*_{*r}} + \frac{b^*_{*r}}{a_r} \right)} \quad (3.32)$$

$$a_r = \frac{2a}{\sqrt{1+i_2} + \sqrt{1+i_4}} \quad (3.33)$$

$$b_r = \frac{2b}{\sqrt{1+i_1} + \sqrt{1+i_3}} \quad (3.34)$$

$$b^*_{*r} = \frac{br}{\sqrt{\varphi}} \quad (3.35)$$

$$\varphi = \frac{12-i_2-i_4}{12-i_1-i_3} \cdot \left(\frac{a}{b} \right)^{1,7} \quad (3.36)$$

Sendo $m_a = m$ e $m_b = \varphi m$.

3.2.3.3 Combinações de serviço

De acordo com a NBR 6118 (2014) as combinações de serviço são classificadas conforme a permanência na estrutura. Existem as quase permanentes (equação 3.37), que atuam durante grande parte do tempo na estrutura, e é necessário considerá-las na verificação de estado limite.

Outra categoria de cargas, identificada como frequentes (conforme equação 3.38), atua repetidamente em estruturas. A verificação dessas cargas é necessária no que se refere à formação e abertura de fissuras, além da possibilidade de ocorrência de vibrações excessivas. Essa avaliação também pode ser conduzida em estados-limites relacionados a deformações excessivas resultantes de efeitos do vento e da temperatura.

Por fim, as combinações de serviços raras (equação 3.39) são as que ocorrem apenas algumas vezes durante a vida da estrutura, recomendada a verificação de estado-limite em formação de fissuras.

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \Psi_{2j} F_{qj,k} \quad (3.37)$$

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \Psi_1 F_{q1k} + \sum \Psi_{2j} F_{qj,k} \quad (3.38)$$

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + F_{q1k} + \sum \Psi_{1j} F_{qj,k} \quad (3.39)$$

Onde:

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

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

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

Ψ_2 é o fato de redução de combinação quase permanente para ELS.

3.2.3.4 Estado-limite de serviço

Em estado-limite de serviço é avaliada a flecha máxima da laje de concreto armado, uma vez que a deformação está diretamente relacionada à correta determinação da espessura da laje.

3.2.3.4.1 Estado limite de deformação

Como ainda não foi calculada a armadura da laje, é necessário que se conheça o momento de inércia da seção, utilizando as equações 3.40 e 3.41, propostas por Campos Filho (2011).

$$m_a \leq m_r \rightarrow I_{eq} = I_c \quad (3.40)$$

$$m_a > m_r \rightarrow I_{eq} = 0,30I_c \quad (3.41)$$

Onde:

m_a é o momento na seção crítica, momento máximo no vão para lajes biapoiadas ou contínuas, para a combinação quase permanente de serviço;

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto.

m_r é o momento de fissuração da laje, calculada pela equação 3.42:

$$m_r = 0,25f_{ctm}bh^2 \quad (3.42)$$

Onde o valor de f_{ctm} é obtido para concretos de classes até C50 pela equação 3.43:

$$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{2/3} \quad (3.43)$$

Para cálculo da flecha imediata, utilizando o módulo de elasticidade secante do concreto:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot \alpha_E \cdot 5600 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (3.44)$$

Sendo α_i calculado pela equação 3.45:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (3.45)$$

A expressão para cálculo da flecha imediata para sessões sem fissuras, é conforme a equação 3.46:

$$f(t = 0) = k \frac{P_{d,ser} l^4}{E_{cs} I_{eq}} \quad (3.46)$$

Onde:

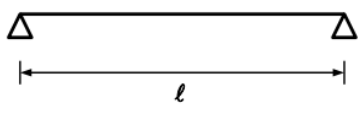
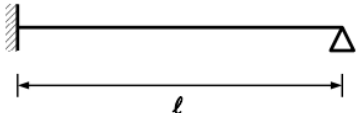
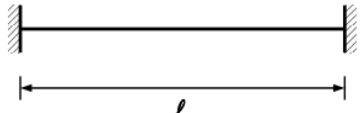
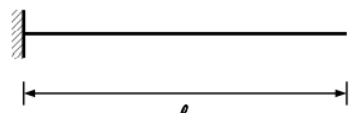
k : Coeficiente que depende da vinculação e da relação entre os vãos da laje (Quadros 7 e 8);

l : é o vão menor da laje.

Para calcular a flecha de longa duração, deve-se utilizar a seguinte equação:

$$f(t = \infty) = (1 + \alpha_f) \cdot f(t = 0) \quad (3.47)$$

Quadro 7 - Valores de k para lajes armadas em uma direção

	1,30
	0,53
	0,26
	12,5

Fonte: Campos Filho (2011)

Quadro 8 - Valores de k para lajes armadas em duas direções

a/b	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	0,99	0,85	0,71	0,59	0,48	0,40
	0,25	0,23	0,21	0,18	0,15	0,13
	0,46	0,41	0,36	0,30	0,25	0,21
	0,83	0,63	0,48	0,35	0,26	0,19
	0,25	0,25	0,24	0,23	0,21	0,19
	0,91	0,73	0,58	0,46	0,35	0,28
	0,48	0,44	0,41	0,36	0,31	0,28
	0,24	0,24	0,23	0,20	0,18	0,16
	0,44	0,38	0,32	0,25	0,20	0,16

Fonte: Campos Filho (2011)

3.2.4 Armadura longitudinal mínima

Para o cálculo de armadura das lajes, utilizou-se o artigo “Projetos de lajes maciças de concreto armado” escrita por Américo Campos Filho (2011), pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para iniciar o cálculo, determina-se uma seção retangular de largura b igual a 100cm e altura “ d ”, conforme se a laje está armada em uma ou duas direções.

$$d = h - c - 0,5 \quad (3.48)$$

Para lajes que possuem a razão do vão maior com menor entre 0,8 e 1, utiliza-se a equação 3.48, porém para lajes com a razão entre vão maior e menor entre 0,5 e 0,8, utiliza-se a Equação 3.49.

$$d = h - c - 1 \quad (3.49)$$

Onde:

d é a altura útil em cm;

h é a altura da laje em cm;

c é o cobrimento em cm.

Para se determinar o cobrimento, primeiramente deve-se classificar a estrutura quanto à sua agressividade ambiental, baseando-se no Quadro 9 extraído da NBR 6118.

Quadro 9 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

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

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado NBR 6118 (2014)

Após a classificação de agressividade, usando o Quadro 10, é determinado o cobrimento nominal, conforme norma para a estrutura que está em estudo.

Quadro 10 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $D_c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Pilar/Viga	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Pilar/Viga	30	35	45	55

Fonte: Adaptado NBR 6118 (2014)

Para determinar a área de aço necessária para flexão simples, utilizam-se as Equações 3.50 e 3.51.

$$x = \frac{d}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m_d}{\alpha_c f_{cd} b d^2}} \right) \quad (3.50)$$

$$A_s = \frac{\alpha_c \lambda f_{cd} b x}{f_{yd}} \quad (3.51)$$

Onde:

d é a altura útil;

m_d é o momento fletor solicitante;

f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto;

$b = 100$ cm;

A_s é a área de armadura em cm^2/m ;

α_c : Para concretos de classes até C50 o valor utilizado é de 0,85;

f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento de aço.

Conforme Campos Filho (2011), os resultados devem atender aos valores mínimos que estão indicados nos Quadros 11 e 12.

Quadro 11 - Valores mínimos para armaduras em lajes de concreto armado

Armadura	Armaduras negativas	Armaduras negativas de bordas sem continuidade	Armadura positivas de lajes armada nas duas direções	Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	Armadura de distribuição nas lajes armadas em uma direção
Valores mínimos para armaduras	$\rho_s \geq \rho_{min}$	$\rho_s \geq 0,67\rho_{min}$	$\rho_s \geq 0,67\rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min}$	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $\rho_s \geq 0,5\rho_{min}$ $A_s/s \geq 0,9\text{cm}^2/\text{m}$

Fonte: Campos Filho (2011)

Quadro 12 - Taxas mínimas de armadura de flexão

Forma da seção	Valores de ρ_{min} ($A_s, min/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256
Os valores de ρ_{min} estabelecidos nesta tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{min} deve ser recalculado.															

Fonte: Campos Filho (2011)

A NBR 6118 determina ainda algumas prescrições no item 20.1, sendo elas:

- As barras da armadura de flexão devem ter no máximo o diâmetro $h/8$;
- O espaçamento das barras de armadura principal de flexão deve possuir no máximo 20cm ou h ;
- Armadura secundária deve ser igual ou superior a 20% da armadura principal com espaçamento de no máximo 33cm;
- Em lajes maciças armada em uma ou duas direções, a armadura positiva precisa ser levada até os apoios, não se permitindo o escalonamento desta armadura e deve ser também, prolongada no mínimo 4cm além do eixo teórico do apoio.

Campos Filho (2011) recomenda alguns critérios para escolha da bitola da armadura longitudinal, bem como para o espaçamento entre as armaduras. Para armaduras negativas, o diâmetro mínimo é de 5mm e espaçamento entre 15 e 20cm e para armadura positivas, o diâmetro mínimo é de 4,2mm e espaçamento entre 10 e 15cm. Porém, após definir as áreas de armadura deve-se utilizar a Tabela 4.

Áreas de armadura por unidade de comprimento (cm²/m), para diferentes bitolas e espaçamentos

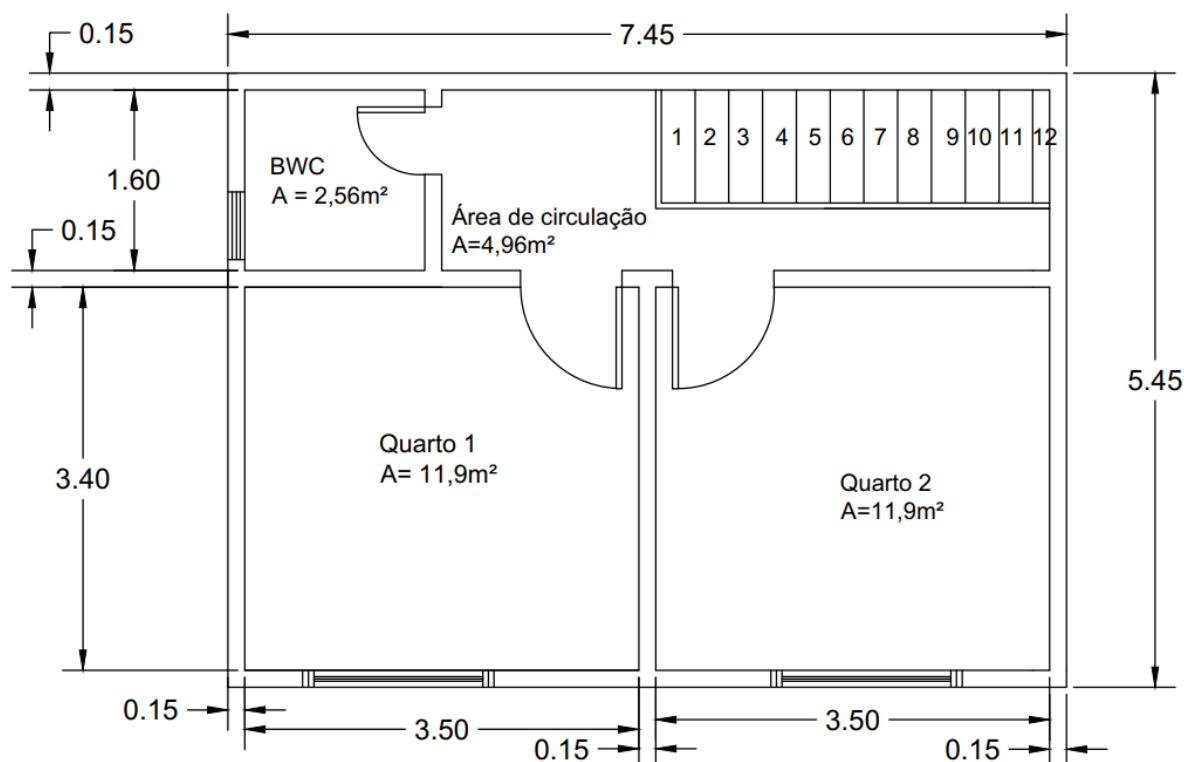
	10cm	11cm	12cm	13cm	14cm	15cm	16cm	17cm	18cm	19cm	20cm	21cm	22cm	23cm	24cm	25cm
Ø4,2	1,39	1,26	1,16	1,07	0,99	0,93	0,87	0,82	0,77	0,73	0,70	0,66	0,63	0,60	0,58	0,56
Ø4,6	1,66	1,51	1,38	1,28	1,19	1,11	1,04	0,98	0,92	0,87	0,83	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66
Ø5	1,96	1,78	1,63	1,51	1,40	1,31	1,23	1,15	1,09	1,03	0,98	0,93	0,89	0,85	0,82	0,78
Ø5,5	2,38	2,16	1,98	1,83	1,70	1,59	1,49	1,40	1,32	1,25	1,19	1,13	1,08	1,03	0,99	0,95
Ø6	2,83	2,57	2,36	2,18	2,02	1,89	1,77	1,66	1,57	1,49	1,42	1,35	1,29	1,23	1,18	1,13
Ø6,3	3,12	2,84	2,60	2,40	2,23	2,08	1,95	1,84	1,73	1,64	1,56	1,49	1,42	1,36	1,30	1,25
Ø6,4	3,22	2,93	2,68	2,48	2,30	2,15	2,01	1,89	1,79	1,69	1,61	1,53	1,46	1,40	1,34	1,29
Ø7	3,85	3,50	3,21	2,96	2,75	2,57	2,41	2,26	2,14	2,03	1,93	1,83	1,75	1,67	1,60	1,54
Ø8	5,03	4,57	4,19	3,87	3,59	3,35	3,14	2,96	2,79	2,65	2,52	2,40	2,29	2,19	2,10	2,01
Ø9,5	7,09	6,45	5,91	5,45	5,06	4,73	4,43	4,17	3,94	3,73	3,55	3,38	3,22	3,08	2,95	2,84
Ø10	7,85	7,14	6,54	6,04	5,61	5,23	4,91	4,62	4,36	4,13	3,93	3,74	3,57	3,41	3,27	3,14
Ø12,5	12,27	11,15	10,23	9,44	8,76	8,18	7,67	7,22	6,82	6,46	6,14	5,84	5,58	5,33	5,11	4,91

Fonte: Campos Filho (2011)

4 INFORMAÇÕES DO ESTUDO DE CASO

Neste trabalho será analisado qual método construtivo é mais viável executar para uma laje do 2º andar de uma residência unifamiliar (Figura 20). Inicialmente, será realizado o dimensionamento da laje Steel Deck, seguido pelo dimensionamento da laje de concreto armado. Por fim, ao obter dimensionamento de ambas, será estudado qual dos tipos terá custo mais baixo, considerando todo o processo de construção, desde mão de obra a materiais, resíduos gerados, tempo de execução, facilidade de montagem, entre outros fatores de importância ao se planejar um projeto.

Figura 20 - Croqui 2º andar residência unifamiliar



Fonte: A autora (2023)

O segundo andar será composto por 2 quartos, um banheiro e área de circulação, contabilizando a área que será ocupada pela alvenaria e escada, totalizará uma laje de 40,6m².

Para dimensionar ambas as lajes, serão utilizadas as ações permanentes e variáveis conforme descrito pela NBR 6120 (2019), Bellei e Bellei (2011) e para o peso próprio da laje Steel Deck, valor baseado no catálogo METFORM (2019).

I. Ações permanentes

- a. Parede interna de alvenaria = 1,03 kN/m²
- b. Revestimento piso = 1 kN/m²
- c. Forro de gesso = 0,15 kN/m²

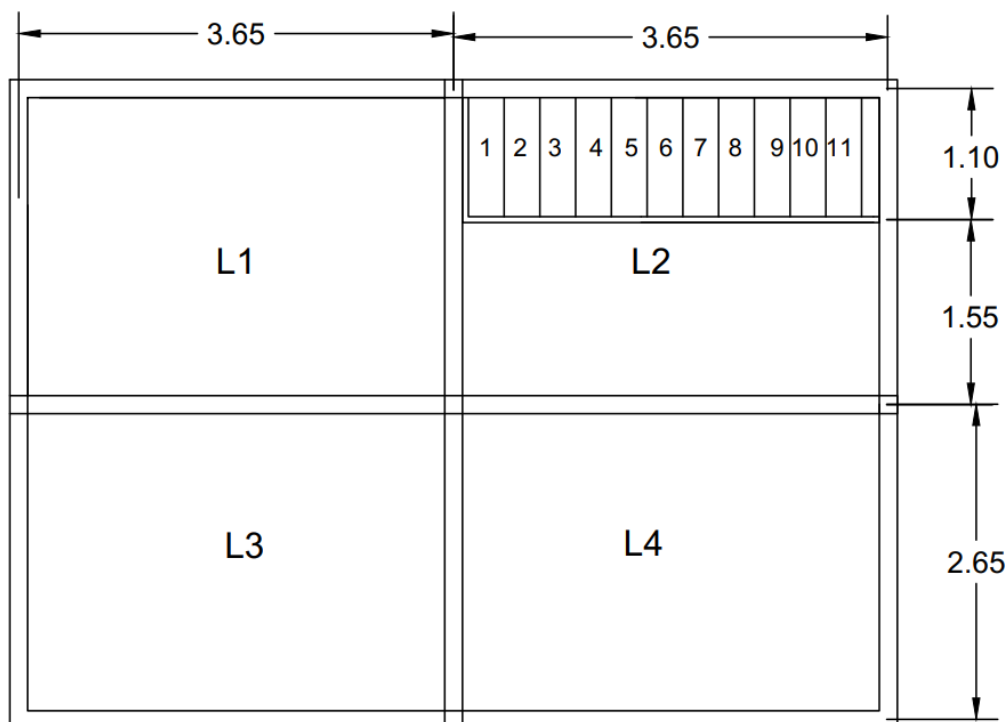
II. Ações variáveis

- a. Dormitórios e banheiro = 1,5 kN/m²
- b. Escada = 2,5 kN/m²

4.1 DIMENSIONAMENTO STEEL DECK

Para iniciar o dimensionamento, a laje foi dividida em 4 lajes com vãos de 2,5x3,5 (Figura 21), respeitando a arquitetura do projeto e também valores de vãos que podem ser construídos sem escoramento, segundo o catálogo da METFORM (2019).

Figura 21 – Planta baixa de divisão de lajes



Fonte: A autora (2023)

Para cálculo de combinação, foram consideradas os valores da Seção 4 para cada laje:

- L1 – Peso próprio, parede interna, revestimento de piso, forro de gesso e banheiro;
- L2 – Peso próprio, parede interna de alvenaria, revestimento de piso, forro de gesso e escada;
- L3 e L4 – Peso próprio, revestimento de piso, forro de gesso e dormitório.

4.1.1 Determinação da espessura

Para escolher qual forma melhor se adapta, é utilizado o catálogo da Metform, que é dividido em dois tipos de forma Steel Deck, sendo a MF-50 mais recomendada para obras residenciais e MF-75 para obras industriais. Sendo assim, será considerada apenas a tabela para MF-50, que está no Anexo A.

Para escolha da forma ideal, foram analisadas lajes que suportam vão duplos sem escoramento acima de 2,5m, para L1, L3 e L4 e lajes acima de 1,5m para L2. De início, podemos considerar que quase todos os tipos de altura de laje podem ser usados. Para melhor escolher, serão calculadas as sobrecargas das lajes.

4.1.2 Carregamentos

Para o cálculo de carregamento, serão utilizadas as combinações últimas normais conforme estipulado pela NBR 8800, aplicando os coeficientes de ponderação correspondentes.

- γ_g , coeficiente de ponderação das ações permanentes relativas ao peso próprio de elementos construtivos industrializados *in loco* = 1,4;
- γ_q , coeficiente de ponderação das ações variáveis relativas ao uso e ocupação;
- Coeficiente de redução = 0,5.

Ao utilizar o coeficiente de ponderação e considerar as ações variáveis e permanentes mencionadas, os valores de carga podem ser encontrados na Tabela 5, levando em consideração o peso próprio do Steel Deck. Por outro lado, na Tabela 6, os valores são apresentados sem considerar o peso próprio do Steel Deck. Essas tabelas fornecem informações essenciais para a análise e projeto, considerando diferentes cenários em relação às cargas aplicadas..

Tabela 4 – Cálculo de cargas considerando peso próprio

CÁLCULO COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL STEEL DECK				
AÇÃO VARIÁVEL PRINCIPAL	LAJE			
	L1	L2	L3	L4
Dormitórios e banheiro	8,28	10,16	6,84	6,84
Escada	0,00	10,91	0,00	0

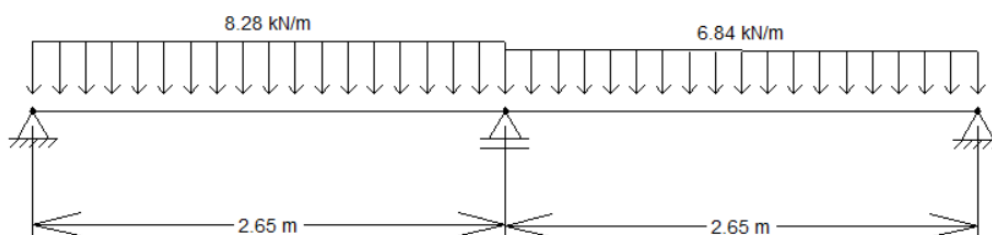
Fonte: A autora (2023)

Cálculo de cargas sem considerar peso próprio

CÁLCULO COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL STEEL DECK				
AÇÃO VARIÁVEL PRINCIPAL	LAJE			
	L1	L2	L3	L4
Dormitórios e banheiro	5,30	7,17	3,86	3,86
Escada	0,00	7,92	0,00	0,00

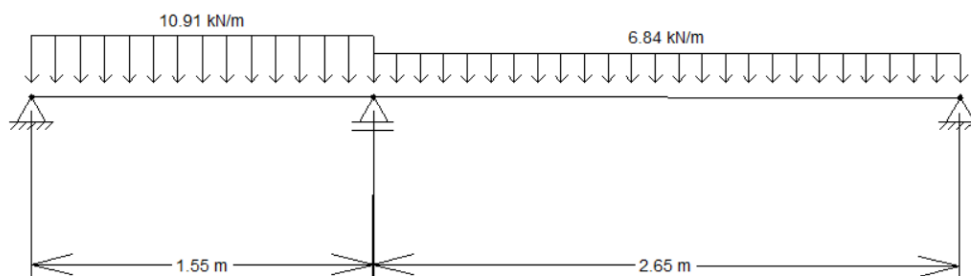
Fonte: A autora (2023)

Figura 22 – Carregamento L1 e L3



Fonte: A autora (2023)

Figura 23 – Carregamento L2 e L4

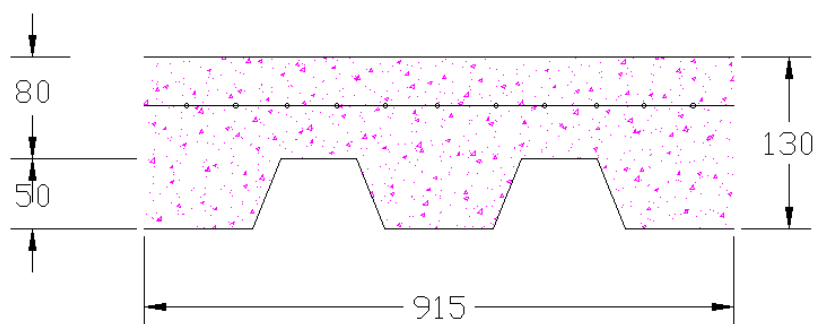


Fonte: A autora (2023)

Para definir qual forma será usada, é considerada a carga de 7,92kN/m², pois é onde há maior carregamento.

Considerando o vão e carga sobre a laje sem considerar o peso próprio, serão adotadas chapas do tipo MF-50, com altura de laje de 130mm, espessura de telha-forma de 1,25mm que suporta uma sobrecarga de 8,59 KN/m².

Figura 24 – Forma MF-50 com 130mm de altura e 915mm de largura



Fonte: A autora (2023)

4.1.3 Cálculo de solicitações

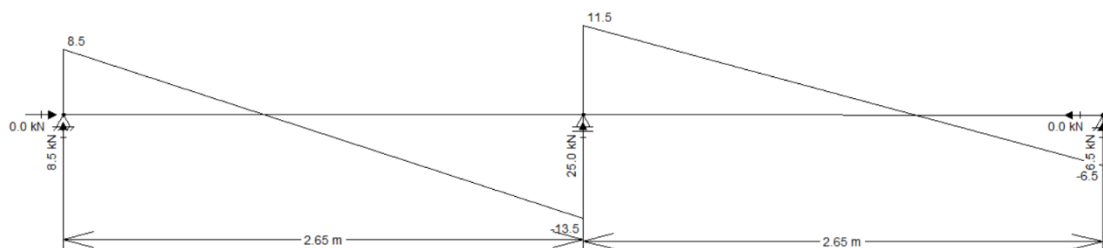
Os carregamentos da Tabela 6 serão utilizadas para obter os valores das reações de apoio, momentos fletores e esforços cortantes no programa A autora (2023).

Os valores encontrados são:

a) L1 e L3, conforme Figuras 25 e 26:

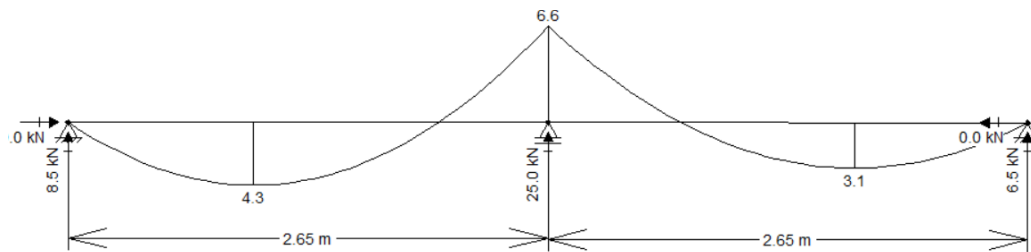
- Esforço cortante é -13,5 kN;
- Momento fletor negativo é 6,6 kNm;
- Momento fletor positivo 4,3 kNm;
- Reação de apoio externa de 8,5kN e 6,5kN e interna de 25,0kN.

Figura 25 – Esforço cortante L1 e L3



Fonte: A autora (2023)

Figura 26 – Momento fletor L1 e L3

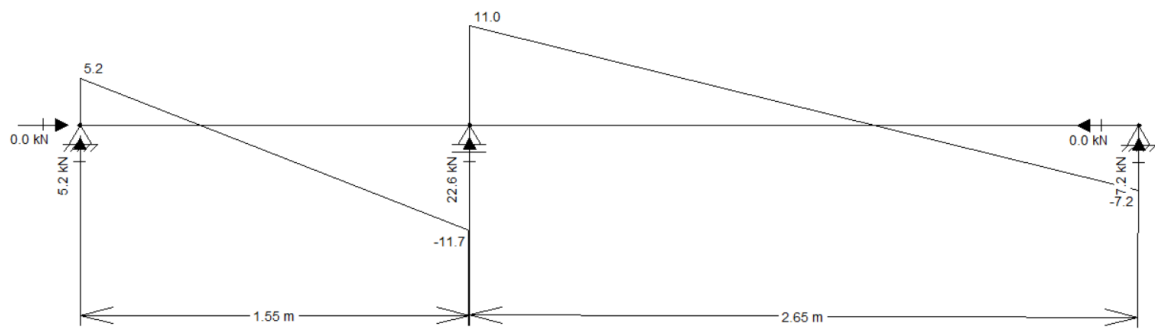


Fonte: A autora (2023)

b) L2 e L4, conforme Figura 27 e 28:

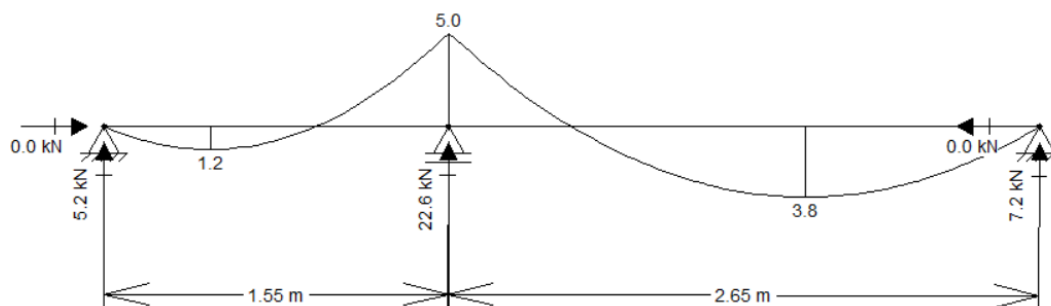
- Esforço cortante é -11,7 kN;
- Momento fletor negativo é 5 kNm;
- Momento fletor positivo é 3,8 kNm;
- Reação de apoio externa de 7,2 e 5,2 kN e interna de 22,6 kN.

Figura 27 – Esforço cortante L2 e L4



Fonte: A autora (2023)

Figura 28 – Momento fletor L2 e L4



Fonte: A autora (2023)

4.1.4 Verificações

Após o cálculo de solicitação das cargas sobre a laje, devem ser feitas as verificações constantes na seção 3.1, para conferir momento fletor, cisalhamento vertical, cisalhamento longitudinal e deslocamento vertical máximo.

4.1.4.1 Momento fletor

Para verificar o momento fletor, devemos utilizar as equações citadas na Seção 3.1.2.1.

Inicialmente calculamos a força de compressão no concreto (N_{cf}), para compararmos à força de tração na forma de aço (N_{pa}), para saber se a linha neutra plástica está passando acima do deck metálico. Utilizando a Equação 3.2:

$$N_{cf} = 0,85 \cdot b \cdot t_c \cdot f_{cd} \quad (3.2)$$

E os valores

$$b = 100;$$

$$t_c = 5;$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

Valor de N_{cf} :

$$N_{cf} = 758,92kN$$

Para o cálculo de N_{pa} , será utilizada a Equação 3.3.

$$N_{pa} = A_{f,ef} \cdot f_{yfd} \quad (3.3)$$

E os valores

$$A_{f,ef} = 15,87;$$

$$f_{yfd} = \frac{28}{1,15}$$

O valor de N_{pa} é:

$$N_{pa} = 386,4kN$$

Como $N_{cf} > N_{pa}$ então a linha neutra plástica está acima do deck metálico.

Com o valor de N_{pa} calcula-se a altura de compressão do bloco de concreto (Equação 3.4):

$$a = \frac{N_{pa}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b} \quad (3.4)$$

E os valores para cálculo são:

$$N_{pa} = 386,4;$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4};$$

$$b = 100$$

Sendo assim, o valor da altura de compressão do bloco é:

$$a = 25,45mm$$

Por fim, com os valores de N_{pa} e da altura de compressão do bloco de concreto, podemos calcular o momento fletor de resistência (equação 3.5):

$$M_{rd} = N_{pa}(d_f - 0,5a) \quad (3.5)$$

Os valores para cálculo são:

$$N_{pa} = 386,4;$$

$$d_f = (130 - 26,36) = 103,64$$

$$a = 25,45$$

Momento fletor de resistente de cálculo é:

$$M_{rd} = 35,13 \text{ kNm}$$

O valor do momento fletor de resistência é de $35,13 \text{ kNm}$ e o valor do momento fletor solicitante de cálculo é de 5 kNm na laje 2 e 4 e de $6,6 \text{ kNm}$ na laje 1 e 3. Então $M_{rd} > M_{sd}$.

4.1.4.2 Cisalhamento longitudinal

Para a verificação do cisalhamento longitudinal, devem ser utilizadas a equação 3.15.

$$V_{l,rd} = \frac{bd_f \left[\left(\frac{m A_{e,ef}}{b L_s} \right) + k \right]}{\gamma_{sl}} \quad (3.15)$$

Os valores de m e k foram obtidos da dissertação de mestrado de Gomes (2001) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG):

Tabela 5 – Valores de m e k

Espessura nominal da forma (mm)	m (kN/m)	k (kN/m.mm)
0,80	152,14	0,0016970
0,95	170,97	0,0141960
1,25	208,63	0,0391194

Fonte: Gomes (2001)

Para calcular o cisalhamento longitudinal usando a Equação 3.15, é necessário determinar o valor de L_s . Inicialmente, esse valor será calculado para as lajes 1 e 3:

$$L_s = \frac{L_f}{4} \quad (3.52)$$

$$L_s = \frac{5,3}{4} = 1325mm$$

Os valores para cálculo são:

$$b = 100;$$

$$d_f = 1,0364;$$

$$m = 208,63;$$

$$A_{e,ef} = 1587;$$

$$k = 0,0391194;$$

$$\gamma_{sl} = 1,25$$

Deste modo, cisalhamento longitudinal da L1, L3 e L4 é:

$$V_{l,rd} = 23,96kN$$

O cisalhamento longitudinal resistente é $23,96kN$ é maior que de solicitado, para a laje 1 e 3 de $13,5kN$.

Em seguida, é feita a verificação de cisalhamento longitudinal da laje 2 e 4.

$$L_s = \frac{L_f}{4} \quad (3.52)$$

$$L_s = \frac{4,2}{4} = 1,05m$$

Os valores para cálculo são:

$$b = 100;$$

$$d_f = 1,0364;$$

$$m = 208,63;$$

$$A_{e,ef} = 1587;$$

$$k = 0,0391194;$$

$$\gamma_{sl} = 1,25$$

Deste modo, cisalhamento longitudinal de L2 é:

$$V_{l,rd} = 29,38N$$

O cisalhamento longitudinal de resistência de $29,38kN$ é maior que de solicitação, de $11,7kN$ da laje 2 e 4.

4.1.4.3 Cisalhamento vertical

Para verificação do cisalhamento vertical é necessário utilizar as equações 3.17 a 3.21 da Seção 3.1.2.3.

$$V_{v,c,rd} = \frac{1000 \cdot \tau_{rd} \cdot K_v \cdot (1,2 + 40\rho) A_v}{b_n} \quad (3.17)$$

Os valores para cálculo são:

$$K_v = 1$$

$$b_n = 305mm$$

$$A_v = 22100mm^2$$

$$A_s = 253,36mm^2$$

$$\rho = \frac{253,36}{22100} = 0,0114 \leq 0,02$$

$$\tau_{rd} = 0,000359kN/mm^2$$

$$f_{ctd} = 1,4363kN/mm^2$$

$$\eta = 1$$

$$f_{ctk,inf} = 1,7954Mpa$$

Após obter todas incógnitas, calcula-se o valor de $V_{v,c,rd}$.

$$V_{v,c,rd} = 43,077kN$$

O valor de cisalhamento vertical é maior que o de solicitação das lajes 1,2,3 e 4.

4.1.4.4 Deslocamento máximo

O deslocamento vertical máximo precisa ser maior que o vão efetivo dividido por 350. Para calcular, deve-se utilizar as equações do tópico 3.1.2.3 deste trabalho. A flecha das lajes 1, 3 e 4 será de:

$$F = \frac{5Pl^4}{384.E.I} \quad (3.22)$$

Os valores para cálculo são:

$$P = 2,60 \cdot 10^3 N/m^2$$

$$l = 2650mm$$

$$E = 21287,4 \cdot 10^6$$

$$I = 13,19 \cdot 10^6$$

O valor da flecha para as lajes 1, 3 e 4:

$$F = 5,94mm$$

Sendo assim,

$$5,94 \leq \frac{L_f}{350} = 7,57 \text{ para laje 1, 3 e 4.}$$

A flecha para a laje 2 é diferente, pois o vão efetivo é menor:

$$F = \frac{5Pl^4}{384.E.I} \quad (3.22)$$

Os valores para cálculo são:

$$P = 2,60 \cdot 10^3$$

$$l = 1550$$

$$E = 21287,4 \cdot 10^6$$

$$I = 13,19 \cdot 10^6$$

O valor da flecha para laje 2 é:

$$F = 3,47mm$$

Com isto, temos:

$$3,47 \leq \frac{L_f}{350} = 4,428$$

4.1.4.5 Armadura de combate a fissuração

A armadura utilizada para combater a fissuração deve ser conforme o Quadro 3 apresentado na Seção 3.1.3.1.

Sendo assim, para lajes com altura de 130mm, deve-se utilizar armadura do tipo Q-92 malha de bitola 4,2 – 150x150.

4.1.4.6 Resultados

A Tabela 8 traz os resultados das verificações de momento fletor, cisalhamento longitudinal, cisalhamento vertical e deslocamento máximo.

Tabela 6 – Resultado das verificações

MOMENTO FLETOR			
Laje	Mrd (kNm)	Msd (kNm)	Verificação
L1	35,15	6,6	OK!
L2		5	OK!
L3		6,6	OK!
L4		5	OK!
CISALHAMENTO LONGITUDINAL			
Laje	Vlrd (kN)	Vlsd (kN)	Verificação
L1	23,96	13,5	OK!
L2	29,38	11,7	OK!
L3	23,96	13,5	OK!
L4		11,7	OK!
CISALHAMENTO VERTICAL			
Laje	Vrd (kN)	Vsd (kN)	Verificação
L1	43,07	13,5	OK!
L2		11,7	OK!
L3		13,5	OK!
L4		11,7	OK!
DESLOCAMENTO MÁXIMO			
Laje	Frd (mm)	Fsd (mm)	Verificação
L1	7,57	5,94	OK!
L2	4,428	3,47	OK!
L3	7,57	5,94	OK!
L4			OK!

Fonte: A autora (2023)

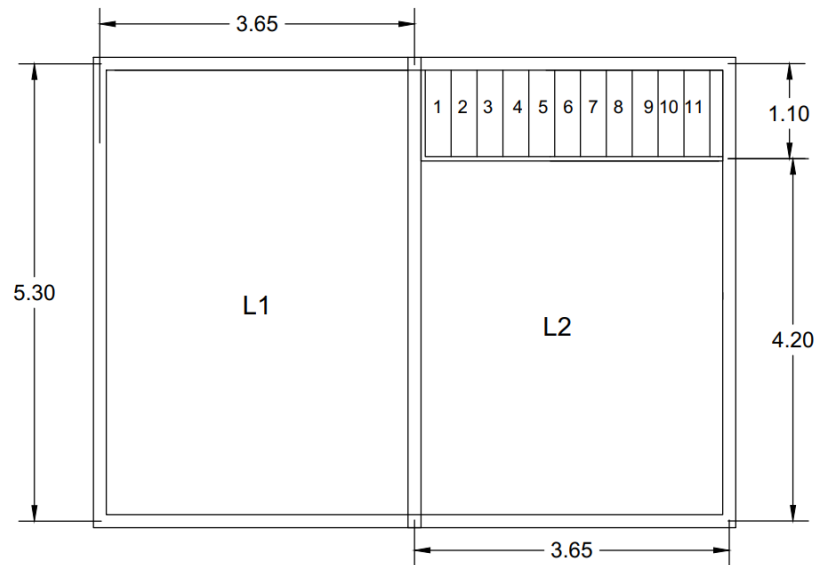
Após realizar as verificações necessárias, foi decidido que a forma de Steel Deck a ser empregada pertence à categoria MF-50, apresentando uma altura de 130cm, chapa com espessura de 1,25mm e um vão duplo máximo de 3,4m.

4.2 DIMENSIONAMENTO LAJE DE CONCRETO ARMADO

A laje de concreto armado foi inicialmente dividida em apenas duas partes, pois o carregamento utilizado e o tamanho da laje não exigiam uma divisão maior.

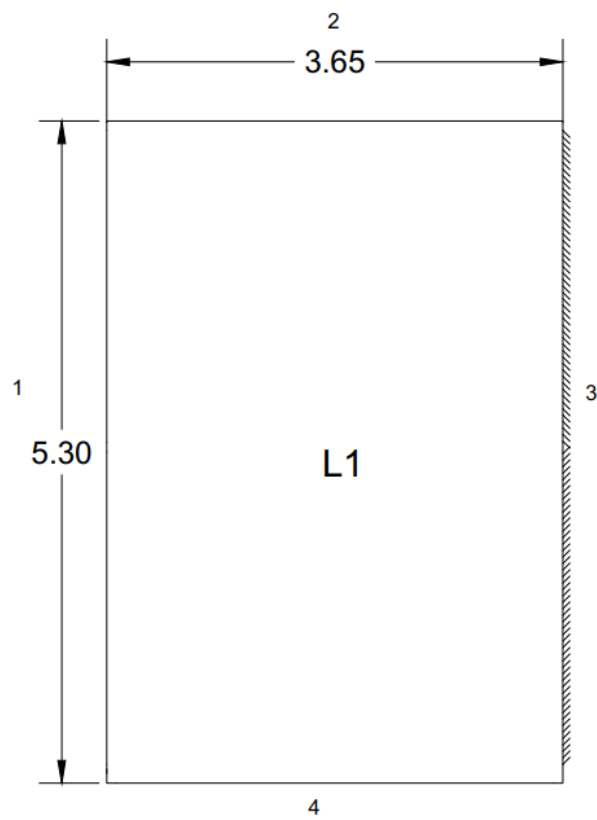
A Figura 29 demonstra como está dividida, a Figura 30 mostra a vinculação das bordas da laje 1 e a Figura 31 mostra as vinculações em cada borda da laje 2.

Figura 29 – Disposição das lajes 1 e 2



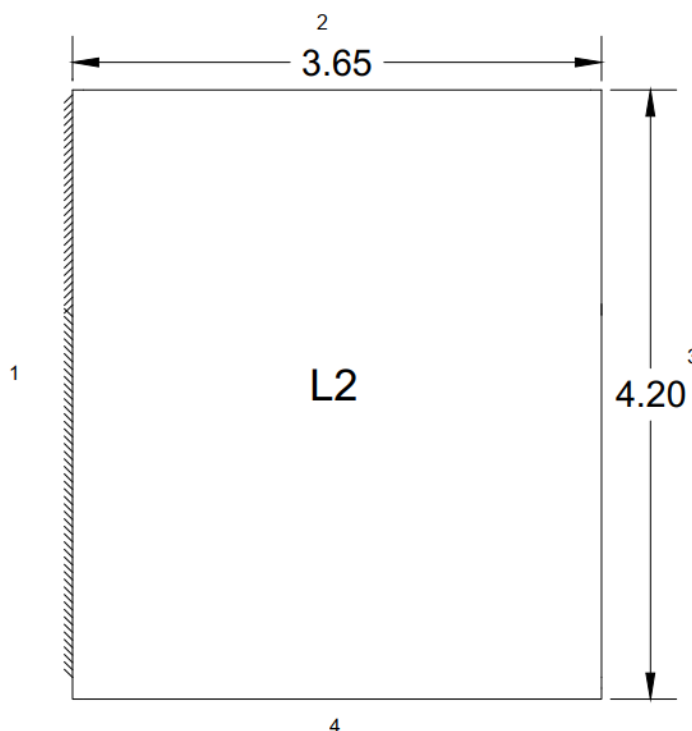
Fonte: A autora (2023)

Figura 30 – Vinculação da L1



Fonte: A autora (2023)

Figura 31 – Vinculação da L2



Fonte: A autora (2023)

As lajes 1 e 2 serão estruturadas em duas direções, uma vez que a relação entre o seu comprimento maior e o comprimento menor é inferior a 2.

$$\frac{l_y}{l_x} \leq 2, \text{ sendo } l_y \text{ o vão maior e } l_x \text{ o vão menor.}$$

Para laje 1 será:

$$\frac{5,30}{3,65} = 1,45 \leq 2$$

Para laje 2 será:

$$\frac{4,20}{3,65} = 1,15 \leq 2$$

Para cálculo de combinação foram consideradas para cada laje as cargas da Seção 4:

- L1 e L2 – Peso próprio, parede interna, revestimento de piso, forro de gesso, dormitório e escada.

4.2.1 Determinação da espessura

Para determinar a espessura da laje, é crucial selecionar um valor que cumpra a espessura mínima de 8cm, conforme estabelecido pela NBR 6118. Neste contexto específico, a escolha recaiu sobre uma espessura de 9cm. Isto se deve ao fato de que, ao optar por uma espessura de 8cm, não foi viável assegurar o adequado recobrimento da armadura, comprometendo, assim, a proteção necessária da mesma.

4.2.2 Carregamentos

Para calcular o carregamento sobre a laje, será utilizada a equação de combinação quase permanente de serviço. Os coeficientes de ponderação utilizados de ações permanentes e ações variáveis será de 1,4 conforme a NBR 6118 (2014).

Sendo assim, os carregamentos sobre as lajes 1 e 2 para combinação última normal são de 10,4 kN/m² e para combinação quase permanente de serviço é de 4,93 kN/m².

4.2.3 Cálculo das solicitações

Primeiramente, deve-se calcular a flecha máxima de cada laje com a espessura de 9cm, para saber se ela será maior ou menor à flecha admissível. A carga permanente em ambas as lajes, é de 4,93 kN/m².

De início, calcula-se o módulo de elasticidade secante do concreto (Equações 3.44 e 3.45):

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \quad (3.45)$$

Onde:

$$f_{ck} = 25$$

Sendo assim, temos:

$$\alpha_i = 0,86$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot \alpha_E \cdot 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (3.44)$$

Onde:

$$\alpha_E = 1$$

Sendo assim, E_{cs} é:

$$E_{cs} = 24080 \text{ MPa}$$

Valor médio da resistência à tração do concreto (equação 3.43):

$$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{2/3} \quad (3.43)$$

Com f_{ck} igual à 25, a resistência à tração do concreto é:

$$f_{ctm} = 2,56 \text{ MPa}$$

Momento de fissuração:

$$m_r = 0,25f_{ctm}bh^2 \quad (3.42)$$

Onde:

$$f_{ctm} = 0,256;$$

$$b = 100;$$

$$h = 0,9$$

Então o momento de fissuração é:

$$m_r = 5,18 \text{ kNm/m}$$

Momento de serviço

$$m_a = 0,039P_{d,ser}l^2$$

Onde:

$$P_{d,ser} = 4,93$$

$$l = 3,65$$

Então o momento de serviço é:

$$m_a = 2,56 \text{ kNm/m}$$

$m_a < m_r$, então a seção não está fissurada e considera-se $I_{eq} = I_c$.

O valor do momento de inércia da seção bruta de concreto é:

$$I_{eq} = I_c = \frac{bh^3}{12} \quad (3.53)$$

Onde:

$$b = 100$$

$$h = 9$$

Sendo assim, o valor do momento de inércia da seção bruta é de:

$$I_{eq} = I_c = 6075 \text{ cm}^4$$

Até o cálculo do momento de inércia, os resultados são para ambas as lajes.

A flecha de curta duração é dada para $a/b = 3,65/5,3 = 0,68, k = 0,416$, para laje 1 e para laje 2 $a/b = 3,65/4,2 = 0,86, k = 0,33$. O valor de K é conforme o Quadro 8, no entanto, para obter o valor exato para ambas as lajes, foi necessário realizar uma interpolação.

Para L1 a flecha de curta duração (equação 3.46) é de:

$$f(t = 0) = k \frac{P_{d,ser} l^4}{E_{cs} I_{eq}} \quad (3.46)$$

Onde:

$$k = 0,416$$

$$P_{d,ser} = 0,000493$$

$$l = 365$$

$$E_{cs} = 2408$$

$$I_{eq} = 6075$$

A flecha de curta duração é:

$$f(t = 0) = 0,248cm$$

Flecha de longa duração é calculada pela equação 3.47.

$$f(t = \infty) = (1 + \alpha_f) \cdot f(t = 0) \quad (3.47)$$

Onde:

$$\alpha_f = 1,32$$

$$f(t = 0) = 0,248$$

Então a flecha de longa duração é:

$$f(t = \infty) = 0,575cm$$

A flecha admissível para situação de aceitabilidade visual é:

$$f_{adm} = \frac{l}{250} = \frac{365}{250} = 1,46cm$$

A flecha provável é menor que a flecha admissível, então pode-se adotar a espessura de 9cm para L1.

Para L2 a flecha de cura duração é de:

$$f(t = 0) = k \frac{P_{d,ser} l^4}{E_{cs} I_{eq}} \quad (3.46)$$

Onde:

$$k = 0,33$$

$$P_{d,ser} = 0,000493$$

$$l = 365$$

$$E_{cs} = 2408$$

$$I_{eq} = 6075$$

A flecha de curta duração é:

$$f(t = 0) = 0,197cm$$

Flecha de longa duração é calculada pela equação 3.47.

$$f(t = \infty) = (1 + \alpha_f) \cdot f(t = 0) \quad (3.47)$$

Onde:

$$\alpha_f = 1,32$$

$$f(t = 0) = 0,197$$

Então a flecha de longa duração é:

$$f(t = \infty) = 0,457cm$$

A flecha admissível para situação de aceitabilidade visual é:

$$f_{adm} = \frac{l}{250} = \frac{365}{250} = 1,46cm$$

A flecha provável é menor que a flecha admissível, então pode-se adotar também a espessura de 9cm para L2.

Após o cálculo da flecha, devemos calcular o momento positivo e negativo. Será utilizado regime rígido-plástico. Para garantir uma boa ductilidade da laje, a posição da linha neutra deve ser limitada em:

$$\frac{x}{d} \leq 0,25 \text{ se } f_{ck} \leq 50MPa$$

Para lajes retangulares, de acordo com a NBR 6118, o valor de engastamento deve ser no mínimo 1,5 para vinculações engastadas. Nas regiões onde a laje é apoiada, o valor de engastamento é igual a 0. Essas especificações são importantes para a análise e projeto estrutural, garantindo a consideração adequada das condições de apoio e vinculação da laje.

Para iniciar o cálculo de momento para a L1, deve-se classificar se a laje é ortótropa ou isótropa.

$$\frac{a}{b} = \frac{3,65}{5,30} = 0,68$$

Como a razão entre a e b é entre 0,5 e 0,8, então a laje é ortótropa. Sendo assim, iniciam os cálculos com as Equações 3.32 a 3.36:

$$m = \frac{pa_r b_r^*}{8 \left(1 + \frac{a_r}{b_r^*} + \frac{b_r^*}{a_r} \right)} \quad (3.32)$$

$$a_r = \frac{2a}{\sqrt{1+i_2} + \sqrt{1+i_4}} \quad (3.33)$$

$$b_r = \frac{2b}{\sqrt{1+i_1} + \sqrt{1+i_3}} \quad (3.34)$$

$$b_r^* = \frac{br}{\sqrt{\varphi}} \quad (3.35)$$

$$\varphi = \frac{12-i_2-i_4}{12-i_1-i_3} \cdot \left(\frac{a}{b} \right)^{1,7} \quad (3.36)$$

Onde:

$$a = 3,65m$$

$$i_2 = 0$$

$$i_4 = 0$$

$$b = 5,3m$$

$$i_1 = 0$$

$$i_3 = 1,5$$

$$p = 4,93$$

Então:

$$a_r = 3,65m$$

$$b_r = 4,10m$$

$$b_r^* = 5,26m$$

$$\varphi = 0,606$$

Sendo assim, o momento é:

$$m = 3,77kNm/m$$

O momento positivo é de 3,77kNm/m e o momento negativo é $m = 1,5 \times 3,77 = 5,65 kNm/m$.

Para a L2, deve-se seguir o mesmo passo a passo de cálculo que L1:

$$\frac{3,65}{4,20} = 0,86$$

Como a razão entre a e b é maior que 0,8, então a L2 é isotropa. O cálculo de momento é por meio das equações 3.29 a 3.31:

$$m = \frac{pa_r b_r}{8\left(1 + \frac{a_r}{b_r} + \frac{b_r}{a_r}\right)} \quad (3.29)$$

$$a_r = \frac{2a}{\sqrt{1+i_2} + \sqrt{1+i_4}} \quad (3.30)$$

$$b_r = \frac{2b}{\sqrt{1+i_1} + \sqrt{1+i_3}} \quad (3.31)$$

Onde:

$$a = 3,65$$

$$i_2 = 0$$

$$i_4 = 0$$

$$b = 4,2$$

$$i_1 = 1,5$$

$$i_3 = 0$$

$$p = 4,93$$

O momento da laje 2 é:

$$m = 2,42 \text{ kNm/m}$$

O momento positivo é 2,42 kNm/m e o momento negativo é $m = 1,5 \times 2,42 = 3,63 \text{ kNm/m}$.

4.2.4 Dimensionamento das armaduras

Os dimensionamentos das armaduras foram feitos de acordo com a classe de agressividade ambiental e as armaduras mínimas exigidas pela NBR 6118 (2014).

Inicialmente serão calculadas a armadura positiva e negativa da L1. Como a laje é considerada ortótropa, então as duas direções de armadura positiva serão diferentes.

Na direção "a", calcula-se:

$$d = h - c - 0,5 \quad (3.48)$$

Onde:

$$h = 9$$

$$c = 2,5$$

Então:

$$d = 6 \text{ cm}$$

Encontrando o valor de d , calcula-se o x (equação 3.50), para saber se a razão entre x e d é menor que 0,25 para concreto até 50Mpa.

$$x = \frac{d}{\gamma} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m_d}{\alpha_c f_{cd} b d^2}} \right) \quad (3.50)$$

Os valores para cálculo são:

$$\begin{aligned} d &= 6 \\ \gamma &= 0,68 \\ m_d &= 1,4.377 = 527,8 \\ \alpha_c &= 0,86 \\ f_{cd} &= \frac{2,5}{1,4} \\ b &= 100 \end{aligned}$$

O valor de x é:

$$x = 0,884 \text{ cm}$$

A razão entre x e d é:

$$\frac{x}{d} = \frac{0,884}{6} = 0,147 < 0,25 - Ok$$

O cálculo da área de armadura é por meio da equação 3.51:

$$A_s = \frac{\alpha_c \gamma f_{cd} b x}{f_{yd}} \quad (3.51)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \alpha_c &= 0,86 \\ \gamma &= 0,68 \\ f_{cd} &= \frac{2,5}{1,4} \\ b &= 100 \\ x &= 0,884 \text{ cm} \\ f_{yd} &= \frac{50}{1,15} \end{aligned}$$

Então temos a área da amadura igual a:

$$A_s = 2,12 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

De acordo com a Tabela 4, a armadura positiva na direção "a" será composta por barras de bitola 6,3mm, com espaçamento entre elas de 14cm.

Para armadura na direção "b" será utilizada a Equação 3.54 para determinar o momento na direção b:

$$m_b = \varphi \cdot m \quad (3.54)$$

Onde:

$$\varphi = 0,606;$$

$$m = 3,77.$$

Sendo assim:

$$m = 2,28 \frac{kN}{m}$$

Para determinar d , utiliza-se a Equação 3.49:

$$d = h - c - 1 \quad (3.49)$$

Onde:

$$h = 9$$

$$c = 2,5$$

Então d é:

$$d = 5,5cm$$

Encontrando o valor de d , calcula-se o x (equação 3.50), para saber se a razão entre x e d é menor que 0,25 para concreto até 50MPa.

$$x = \frac{d}{\gamma} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m_d}{\alpha_c f_{cd} b d^2}} \right) \quad (3.50)$$

Onde:

$$d = 5,5$$

$$\gamma = 0,68$$

$$m_d = 1,4 \cdot 2,28 = 3,19,2$$

$$\alpha_c = 0,86$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

$$b = 100$$

O valor de x é:

$$x = 0,574cm$$

A razão entre x e d é:

$$\frac{x}{d} = \frac{0,574}{5,5} = 0,105 < 0,25 - Ok$$

O cálculo da área de armadura é por meio da equação 3.51:

$$A_s = \frac{\alpha_c \gamma \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{f_{yd}} \quad (3.51)$$

Onde:

$$\alpha_c = 0,86$$

$$\gamma = 0,68$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

$$b = 100$$

$$x = 0,574 \text{ cm}$$

$$f_{yd} = \frac{50}{1,15}$$

Então temos a área da armadura igual a:

$$A_s = 1,38 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Conforme a Tabela 4, a armadura positiva na direção "b" será composta por barras de bitola 5mm, com espaçamento entre elas de 14cm.

Para o cálculo da armadura negativa, será apenas para o lado 3 da laje (equação 3.27):

$$m_3 = -i_3 m_b \quad (3.27)$$

Onde:

$$-i_3 = 1,5$$

$$m_b = 2,28$$

Temos que o momento no lado 3 da laje é:

$$m_3 = 3,42 \text{ kN/m}^2$$

Utilizando $d = 5,5$ e a equação 3.50, temos:

$$x = \frac{d}{\gamma} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m_d}{\alpha_c f_{cd} b d^2}} \right) \quad (3.50)$$

Onde:

$$d = 5,5$$

$$\gamma = 0,68$$

$$m_d = 1,4 \cdot 3,42 = 478,8$$

$$\alpha_c = 0,86$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

$$b = 100$$

Sendo assim, o resultado é:

$$x = 0,879cm$$

A razão entre x e d é:

$$\frac{x}{d} = \frac{0,879}{5,5} = 0,16 < 0,25 - Ok$$

O cálculo da área de armadura é por meio da equação 3.51

$$A_s = \frac{\alpha_c \cdot \gamma \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{f_{yd}} \quad (3.51)$$

Onde:

$$\alpha_c = 0,86$$

$$\gamma = 0,68$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

$$b = 100$$

$$x = 0,879cm$$

$$f_{yd} = \frac{50}{1,15}$$

A área de armadura negativa é:

$$A_s = 2,11cm^2/m$$

Conforme tabela 4 a armadura negativa na vinculação 3 é

bitola da barra 6,3mm com 15cm de espaçamento.

Agora, será calculada a armadura positiva e negativa da L2. Como a laje é isótropa, a armadura na direção “a” e “b” são a mesma.

Para armadura positiva, será calculada com a equação 3.48:

$$d = h - c - 0,5 \quad (3.48)$$

Os valores para cálculo são:

$$h = 9$$

$$c = 2,5$$

O resultado é:

$$d = 6\text{cm}$$

Encontrando o valor de d , calcula-se o x , para saber se a razão entre x e d é menor que 0,25 para concreto até 50Mpa.

$$x = \frac{d}{\gamma} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m_d}{\alpha_c f_{cd} b d^2}} \right) \quad (3.50)$$

Onde:

$$d = 6$$

$$\gamma = 0,68$$

$$m_d = 1,4.242 = 338,8$$

$$\alpha_c = 0,86$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

$$b = 100$$

O valor de x é:

$$x = 0,557\text{cm}$$

A razão entre x e d é:

$$\frac{x}{d} = \frac{0,557}{6} = 0,092 < 0,25 - Ok$$

O cálculo da área de armadura é por meio da equação 3.51:

$$A_s = \frac{\alpha_c \gamma f_{cd} b x}{f_{yd}} \quad (3.51)$$

Onde:

$$\alpha_c = 0,86$$

$$\gamma = 0,68$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

$$b = 100$$

$$x = 0,557\text{cm}$$

$$f_{yd} = \frac{50}{1,15}$$

Então temos a área da armadura igual a:

$$A_s = 1,34\text{cm}^2/\text{m}$$

Conforme a Tabela 4, a armadura positiva nas direções "a" e "b" será composta por barras de bitola 5mm, com espaçamento entre elas de 15cm.

Para o cálculo da armadura negativa, será apenas para o lado 1 da laje:

$$m_1 = -i_1 \cdot m \quad (3.27)$$

Onde:

$$-i_1 = 1,5$$

$$m = 2,42$$

O valor do momento negativo:

$$m_1 = 3,63 \text{ kN/m}^2$$

Utiliza-se a equação 3.50, para calcular o x .

$$x = \frac{d}{\gamma} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m_d}{\alpha_c f_{cd} b d^2}} \right) \quad (3.50)$$

Onde:

$$d = 6$$

$$\gamma = 0,68$$

$$m_d = 1,4 \cdot 3,63 = 508,2$$

$$\alpha_c = 0,86$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

$$b = 100$$

O valor de x é:

$$x = 0,850 \text{ cm}$$

A razão entre x e d é:

$$\frac{x}{d} = \frac{0,850}{6} = 0,141 < 0,25 - Ok$$

O cálculo da área de armadura é por meio da equação 3.51:

$$A_s = \frac{\alpha_c \gamma f_{cd} b x}{f_{yd}} \quad (3.51)$$

Onde:

$$\alpha_c = 0,86$$

$$\gamma = 0,68$$

$$f_{cd} = \frac{2,5}{1,4}$$

$$b = 100$$

$$x = 0,850 \text{ cm}$$

$$f_{yd} = \frac{50}{1,15}$$

Então temos a área da amadura igual a:

$$A_s = 2,04 \text{ cm}^2/\text{m}$$

De acordo com a Tabela 4, a armadura negativa na vinculação 1 é composta por barras de bitola 6,3mm, com espaçamento entre elas de 15cm.

4.2.5 Resultados

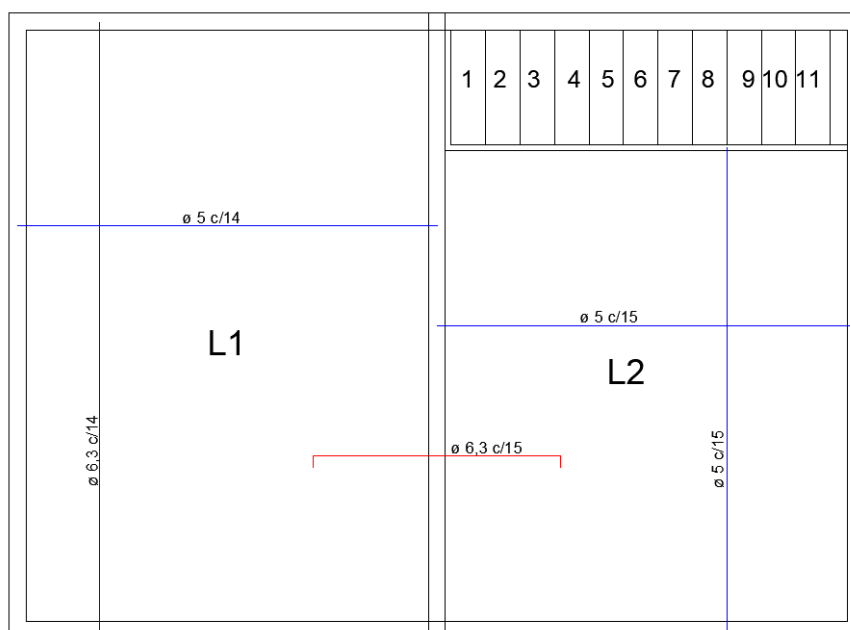
Para as lajes 1 e 2, ambas ficaram dentro do que é estabelecido por norma. As verificações de flecha e x/d estão na Tabela 9 e na Figura 32 está a planta baixa da armadura.

Tabela 7 - Resultado de verificações para laje de concreto armado

Resultados das verificações				
FLECHA				
Laje	Flecha curta duração (cm)	Flecha de longa duração (cm)	Flecha admissível	Verificação
L1	0,248	0,575	1,46	OK!
L2	0,197	0,457	1,46	OK!
X/d				
Laje	Solicitado	Limite	Verificação	
L1 (armadura positiva direção "a")	0,147	0,25	OK!	
L1 (armadura positiva direção "b")	0,105	0,25	OK!	
L1 (armadura negativa)	0,16	0,25	OK!	
L2 (armadura positiva direção "a")	0,092	0,25	OK!	
L2 (armadura positiva direção "b")	0,092	0,25	OK!	
L2 (armadura negativa)	0,141	0,25	OK!	

Fonte: A autora (2023)

Figura 32 – Armadura negativa e positiva laje 1 e 2



Fonte: A autora (2023)

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste Capítulo será realizada uma análise de custo dos materiais necessários para a execução de ambas as lajes, juntamente com a avaliação dos resíduos gerados por cada método. O objetivo é determinar qual abordagem construtiva é mais viável tanto do ponto de vista financeiro quanto do ambiental.

5.1 ANÁLISE CUSTO DE MATERIAL

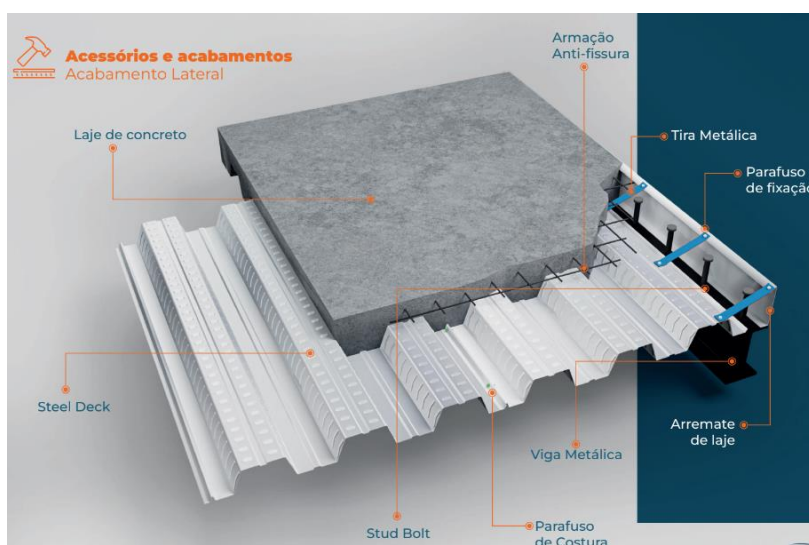
5.1.1 Laje Steel Deck

Como determinado durante o dimensionamento, serão utilizadas 4 lajes biapoiadas para execução do 2º andar da residência.

Os materiais que serão orçados são:

- Telha forma MF-50 de 1,25m de espessura;
- *Stud bolts* para fixação da telha nas vigas;
- Parafuso de costura, para emendas entre as telhas formas;
- Parafuso de fixação, utilizado para fixar a tira metálica entre o arremate de laje e a telha forma;
- Arremate da laje, para aplicar em todo o perímetro da laje, respeitando a altura de 130mm;
- Malha POP Q-92 com bitola 4,2mm - 150x150 – 2x3m;
- Concreto f_{ck} 25MPa, considerando bombeamento.

Figura 33 – Materiais utilizados na execução da Laje Steel Deck



Fonte: Metform (2023)

Na Tabela 10 estão especificadas as quantidades de materiais necessárias para a execução das lajes 1, 2, 3 e 4. No cálculo do concreto, foi incluída uma margem de 10% para perdas. Os custos associados à forma utilizada no acabamento da laje foram completamente orçados com a METFORM, enquanto o preço do concreto foi obtido da Concrebras. No que diz respeito à malha POP, o custo foi considerado com base nos valores praticados na loja Leroy Merlin.

Tabela 8 – Custo de material para execução laje Steel Deck

MATERIAIS LAJE STEEL DECK				
Material	Unidade	Quantidade	Preço unt	Preço total
Forma MF-50-1,25mm	m ²	34,77	R\$ 175,00	R\$ 6.084,75
Stud Bolt	Pç	103	R\$ 8,00	R\$ 824,00
Parafuso de costura	Pç	80	R\$ 0,60	R\$ 48,00
Parafuso de fixação	Pç	72	R\$ 1,00	R\$ 72,00
Tira metálica	Pç	36	R\$ 12,00	R\$ 432,00
Arremate de laje 0,80	m ²	3,36	R\$ 110,00	R\$ 369,60
Malha POP Q92-4,2mm-150X150	Und	7	R\$ 80,00	R\$ 560,00
Concreto FCK 25	m ³	5	R\$ 371,00	R\$ 1.855,00
			TOTAL	R\$ 10.245,35

Fonte: A autora (2023)

5.1.2 Laje Maciça de Concreto Armado

Para execução da laje de concreto armado, foi dividido em duas lajes no dimensionamento.

Os materiais utilizados para a construção serão:

- Chapa resinada de 17mm – 1,22x2,44;

- Barra de aço de 5, 6,3 e 8mm;
- Escoramento de laje;
- Concreto com f_{ck} 25 MPa.

Na Tabela 11, encontra-se o valor total dos materiais necessários para a execução em um período de 10 dias. Os custos relacionados ao aço foram obtidos no site da ArcelorMittal, o valor do escoramento foi adquirido da TipForm, e a chapa resinada foi consultada no site da Qualiplus concreto pela Concrebras, levando em conta uma margem de 10% para perdas.

Tabela 9 – Custo Material para laje de concreto armado

MATERIAIS LAJE MACIÇA				
Material	Unidade	Quantidade	Preço unt	Preço total
Chapa resinada 17mm - 1,22x2,44	Und	15	R\$ 118,91	R\$ 1.783,65
Aço 6,3mm - barra 12m	Und	18	R\$ 20,17	R\$ 363,06
Aço 5mm - barra 12m	Und	33	R\$ 14,35	R\$ 473,55
Escoramento	Mês	1,3333	R\$ 1.472,30	R\$ 1.963,02
Concreto FCK 25	m ³	3,3	R\$ 371,00	R\$ 1.224,30
			TOTAL	R\$ 5.807,58

Fonte: A autora (2023)

5.2 ANÁLISE DE MÃO DE OBRA

5.2.1 Laje Steel Deck

Para a execução da laje Steel Deck de 40,6m², foi estimado um tempo de construção de 7 dias, com uma jornada de trabalho de 8 horas por dia. Para atender a essa produção, serão necessários 1 soldador, 2 montadores de estruturas metálicas e 2 auxiliares para montagem de estruturas metálicas e 1 pedreiro e 2 auxiliares de pedreiro por apenas 4 horas para concretagem e alisamento de piso. Utilizando os valores da tabela SINAPI (2023), a Tabela 12 apresenta os custos finais relativos à mão de obra.

Tabela 10 – Custo mão de obra Laje Steel Deck

CUSTO EXECUÇÃO LAJE STEEL DECK				
Serviço	Valor Unt	Unidade	Horas totais	Valor Total
Soldador	R\$ 30,36	Hora	56	R\$ 1.700,16
Pedreiro	R\$ 29,15	Hora	4	R\$ 116,60
Auxiliar de pedreiro	R\$ 22,77	Hora	8	R\$ 182,16
Montador estrutura metálica	R\$ 27,72	Hora	112	R\$ 3.104,64
Auxiliar para estrutura metálica	R\$ 21,62	Hora	112	R\$ 2.421,44
			TOTAL	R\$ 7.525,00

Fonte: A autora (2023)

5.2.2 Laje de Concreto Armado

Para o cálculo da laje de concreto armado, inicialmente, foram considerados os valores de execução conforme o pagamento correspondente a cada serviço realizado, conforme apresentado na Tabela 13. No entanto, como o cálculo de custo para a Laje Steel Deck foi feito apenas com base nas horas trabalhadas, devido à falta de outra maneira de orçar usando a tabela SINAPI (2023) para a execução, a Tabela 14 foi elaborada para uma análise mais justa e precisa.

Tabela 11 – Custo execução da laje maciça conforme serviço utilizado

CUSTO EXECUÇÃO LAJE MACIÇA				
Serviço	Valor Unt	Unidade	Quantidade executada	Valor Total
Montagem, desmontagem forma e escoramento metálico	R\$ 168,43	m ²	34,77	R\$ 5.856,31
Montagem, corte e dobra aço 5mm	R\$ 24,24	Kg	50,3	R\$ 1.219,27
Montagem, corte e dobra aço 6,3mm	R\$ 23,42	Kg	46,71	R\$ 1.093,95
Concretagem laje FCK 25 Mpa	R\$ 544,50	m ³	3,3	R\$ 1.796,85
			TOTAL	R\$ 9.966,38

Fonte: A autora (2023)

Para o cálculo por hora, foi estimado um período de 10 dias de trabalho, com 8 horas diárias. Para alcançar essa produção, foram considerados 2 carpinteiros, 2 armadores, 2 auxiliares de carpintaria e 1 auxiliar de armador.

Tabela 12 – Custo execução laje maciça conforme horas trabalhadas

CUSTO EXECUÇÃO LAJE MACIÇA				
Serviço	Valor Unt	Unidade	Horas totais	Valor Total
Carpinteiro	R\$ 28,76	Hora	160	R\$ 4.601,60
Armador	R\$ 28,94	Hora	160	R\$ 4.630,40
Auxiliar de carpinteiro	R\$ 23,86	Hora	160	R\$ 3.817,60
Auxiliar de armador	R\$ 22,72	Hora	80	R\$ 1.817,60
			TOTAL	R\$ 14.867,20

Fonte: A autora (2023)

5.3 RESÍDUOS GERADOS

Conforme CONAMA (2002) existem 4 tipos de resíduos na construção civil, sendo eles:

- Classe A – São resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: Demolição, reformas e reparos.

- Classe B – São resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: Plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, gesso e embalagens vazias de tinta;
- Classe C – São resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias de reciclagem ou recuperação, como exemplo, a lã de vidro, muito utilizada em isolamento acústico e térmico;
- Classe D – São resíduos perigosos, como, tinta, óleo e outros materiais prejudiciais à saúde.

Para esta análise, serão considerados apenas materiais da classe B.

Em uma construção que utiliza lajes Steel Deck, todos os materiais são adquiridos nas medidas precisas para a execução, eliminando a necessidade de cortes ou fabricação no local da obra. O único resíduo gerado durante a construção é o concreto que eventualmente pode transbordar da laje ou sobras que permanecem no caminhão basculante. Contudo, esses resíduos podem ser reutilizados em outras etapas da obra, como em vergas e contravergas. Dessa forma, a execução de uma laje Steel Deck promove uma obra mais limpa e organizada.

Por outro lado, no caso das lajes maciças, além do desperdício de concreto, que pode ser reaproveitado de maneira semelhante ao da laje Steel Deck, há também o uso de formas de madeira. Muitas vezes, o corte das chapas de compensado não é feito de forma eficiente, resultando em resíduos desde o início do processo. Além disso, após a cura do concreto, ao retirar as formas de madeira, estas se tornam inutilizáveis para as etapas subsequentes da obra, gerando mais resíduos.

Ao contrário da laje Steel Deck, a laje de concreto armado gera consideravelmente mais sobras, tornando o local da obra mais desorganizado e sujo, especialmente quando não há um planejamento adequado. Além disso, é crucial cuidar do descarte correto de cada um desses resíduos, aumentando a complexidade e os custos associados à gestão de resíduos na obra.

6 CONCLUSÃO

Conforme previsto, as Lajes Steel Deck, apesar de menos comuns na construção civil, mostraram-se atrativas economicamente. Isso se deve ao seu curto período de execução de apenas 7 dias, bem como aos menores custos totais de material e mão de obra, que somaram R\$17.770,35. Em comparação, as lajes maciças, ainda amplamente

utilizadas, exigem um tempo de execução mais longo, de 1 mês e 10 dias, contabilizando o tempo de o concreto obter a resistência ideal aos 28 dias, e resultam em custos mais altos para a mão de obra, totalizando R\$20.674,78.

Além disso, foi analisada a geração de resíduos em cada método, o que desempenha um papel significativo na limpeza e organização do canteiro de obras. As Lajes Steel Deck resultam em menos resíduos e desperdício, proporcionando um ambiente de trabalho mais limpo e organizado em comparação com as lajes de concreto armado.

À medida que os anos passam, é esperado que surjam novas tecnologias e métodos de construção mais vantajosos do que os existentes. Portanto, é crucial disseminar informações sobre métodos de construção inovadores em todo o Brasil e continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e materiais para aprimorar continuamente o setor da construção civil.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Luiz Carlos de. Elementos Estruturais. **Notas de aula da disciplina - AU405 – Concreto**, p. 1-14, 1 ago. 2006. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Forma%20e%20Lancamento/Introducao_elementos.pdf>. Acesso em: 26 set. 2023.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762: **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16421: **Telha-fôrma de aço colaborante para laje mista de aço e concreto — Requisitos e ensaios**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

BARROS, Bianca. **Veja os procedimentos de execução de lajes em Steel Deck**. Revista tèchne, p. 1-7, 13 out. 2014.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA N°307, de 05 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

CAMPOS FILHO, A. **Projeto de lajes maciças de concreto armado**. Porto Alegre: UFRGS, 2011. Apostila de aula – Disciplina de Concreto Armado 2. Disponível em: <http://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/eng01112/lajes.pdf>. Acesso em: 06 de outubro de 2023.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson R. de F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 3. ed. atual. São Carlos, 2007.

CARVALHO, K. Centro Brasileiro da Construção em Aço. **Execução de lajes mistas**, 2015. Disponível em: < <https://www.cbca-acobrasil.org.br/noticias-detalhes.php?cod=7137>>. Acesso em: 05 de novembro de 2023.

DE FREITAS, Amanda Nascimento; DE JESUS, Bruna Serpa; COSTA, João Filipe; SANTOS, Thiago Spada. **Sistema de forma para estruturas de concreto armado: Estudo de caso com utilização de forma metálica perdida**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade Capixaba da Serra, 2015. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/06/sistemas-de-forma-para-estruturas-de-concreto-armado-estudo-de-caso-com-utilizacao-de-forma-metalica-perdida.pdf>. Acesso em: 31 out. 2023.

DOS SANTOS, Luciano B. **ESTRUTURAS DE AÇO EM PERFIS FORMADOS A FRIO**: Aspectos gerais - Notas de aula. Alagoas, 2020. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/572430/2/1%20-%20PFF%20-%20ASPECTOS%20GERAIS%20-%20NOTAS%20DE%20AULA.pdf>. Acesso em: 1 out. 2023.

EQUIPE CELERE (São Paulo). **Tipos de vigas na construção civil**. 19 jan. 2022. Disponível em: <https://celere-ce.com.br/construcao-civil/tipos-de-vigas-na-construcao-civil/>. Acesso em: 26 set. 2023.

FABRIZZI, M.A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais misto aço-concreto**. 2007. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GOMES, L. C. **Estudo do Sistema de Lajes Mistas com forma de aço incorporada empregando concreto estrutural leve**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, 2001.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISA E TECNOLOGIA. **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. SindusCon. São Paulo, 2003.

MARINS, Karina Refina de Castro; TAKAHASHI, Roberto Issamu; RIBEIRO, Tiago Gimenez. **Referência para Cálculo de Concreto Armado. Apostilas do Departamento de Engenharia e Estruturas e Fundações da Escola Politécnica**, 2000. Disponível em: http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Lajes/resumo_concreto_usp.pdf. Acesso em: 3 out. 2023.

METFORM. **Steel Deck**. Taubaté, SP, 4 nov. 2019. Disponível em: <[https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/metform/steel_deck_metform\[1\].pdf](https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/metform/steel_deck_metform[1].pdf)>. Acesso em: 28 set. 2023.

NEVILLE, A M. **Propriedades do concreto**. Porto alegre: Grupo A, 2016. *E-book*. ISBN 9788582603666. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582603666/>. Acesso em: 04 nov. 2023.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: Dimensionamento prático**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 360 p. v. 1.

PIGNATTA E SILVA, Valdir. **Dimensionamento de Estruturas de aço**. São Paulo, Junho 2012. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/110863/mod_resource/content/0/apostila2012.pdf. Acesso em: 1 out. 2023.

QUEIROZ, F.; PIMENTA, R. J.; MARTINS, A. G. **Estruturas mistas**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012.

SANTOS COUTO, J. A. et al. **O concreto como material de construção**. 9 f. Curso de Engenharia Civil, Universidade Tiradentes, Sergipe, 2013.

SÉRGIO BASTOS, Paulo. **Fundamentos do concreto armado. Estruturas de concreto 1**, p. 1-89, 1 set. 2023.

SINAPI: **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**/Caixa Econômica Federal. - Brasília: CAIXA, 2023.

SPOHR, Valdi Henrique. **Análise comparativa: Sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7700/VALDIHENRIQUESPOHR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 nov. 2023.

VIVADecora. **O Que é Steel Deck? Vantagens, Preço e Como Usar no Projeto**. [S. l.], 22 out. 2021. Disponível em: <https://www.vivadecora.com.br/pro/steel-deck/>. Acesso em: 28 set. 2023.

ANEXO A – TABELA DE CARGAS E VÃO MÁXIMOS MF-50

	Altura total da laje (mm)	Espessura Seel Deck (mm)	Vãos Máximos sem Escoramento				Peso Próprio (kN/m²)	M. Inércia Laje Mista (10 ⁶ mm ⁴ /m)	Vãos Máximos sem Escoramento															
			Simples (mm)	Duplos (mm)	Triplos (mm)	Balanço (mm)			1.800	1.900	2.000	2.100	2.200	2.300	2.400 Carga sobreposta	2.500	2.600 máxima	2.650 máxima	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	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