

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**“ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE LAJES PARA EDIFÍCIO EM AÇO: UM ESTUDO
COMPARATIVO”**

YGOR DIAS DA COSTA LIMA

SÃO CARLOS

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**“ALTERNATIVA DE SISTEMAS DE LAJES PARA EDIFÍCIO EM AÇO: UM ESTUDO
COMPARATIVO”**

YGOR DIAS DA COSTA LIMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos de Edificações

Orientador: Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza

São Carlos
2009

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

L732as

Lima, Ygor Dias da Costa.

Alternativa de sistemas de lajes para edifício em aço : um estudo comparativo / Ygor Dias da Costa Lima. -- São Carlos : UFSCar, 2009.

122 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Engenharia de estruturas. 2. Estruturas metálicas. 3. Aço - estruturas. 4. Lajes. 5. Custos. I. Título.

CDD: 624.1 (20^a)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

Via Washington Luís, Km 235 - CEP: 13.565-905 - São Carlos/SP/Brasil

Fone(16) 3351-8262- Ramal: 232 - Fax (16) 3351-8259

Site: www.ppgciv.ufscar.br Email: ppgciv@power.ufscar.br

“ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE LAJES PARA EDIFÍCIO EM AÇO: ESTUDO COMPARATIVO”

YGOR DIAS DA COSTA LIMA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 28 de agosto de 2009

Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza
Departamento de Engenharia Civil/PPGCIV/UFSCar
Orientador

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque
Departamento de Engenharia de Estruturas e Construção Civil/UFC
Examinador Externo

Prof. Dr. Luciano Barbosa dos Santos
Centro de Tecnologia / CETEC / UFAL
Examinador Externo

*A Deus, pelo dom de minha vida e por todas as portas que me foram abertas em
minha trajetória.*

Aos meus pais e meus irmãos, pelo incentivo e ajuda nos momentos mais difíceis.

*À minha querida amiga e eterna professora Iara Manfrim, pelo apoio, compreensão,
e dedicação para que eu conseguisse realizar esse trabalho.*

Agradecimentos

*À Universidade Federal de São Carlos e ao
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil
pela oportunidade que me foi oferecida.*

*Ao orientador Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza,
pela sua grande capacidade, competência de orientação e tolerância, no decorrer de
todas as nossas reuniões.*

*A todos os professores do curso,
pelo ensinamento recebido.*

*Aos amigos e colegas de profissão
que fizeram parte do andamento do curso de mestrado.*

*A Solange (Sol), secretária, pela sua atenção e dedicação para com todos nós,
alunos do programa.*

RESUMO

Este trabalho tem como proposta estudar os sistemas de lajes para estruturas metálicas, avaliando as lajes convencionais maciças, as lajes treliçadas e pré-moldadas, a laje mista com forma de aço e outros sistemas de laje mista de aço e concreto (pavimento misto). Apresentam-se e discutem-se características, vantagens e desvantagens estruturais e construtivas de cada sistema de laje, quando usado em estruturas metálicas. Baseado numa arquitetura definida, será desenvolvido o projeto estrutural, com a estrutura principal (pilares e vigas) em estrutura metálica e com as diversas soluções em laje, avaliando tecnicamente a metodologia de montagem e execução e comparando custos envolvidos. Busca-se uma avaliação mais realista, para cada sistema de laje estudado, comparando as lajes entre si, no que diz respeito ao comportamento estrutural, às técnicas construtivas e ao custo.

Palavras-chave: estrutura de aço, sistemas de lajes, laje mista, custo.

ABSTRACT

This work is aimed at studying slab systems for steel structures by assessing massive conventional slab, framed slab, pre-cast slabs, composite slab systems and other systems of steel and concrete. Characteristics as well as structural and building advantages and disadvantages of each slab system for steel structures usage are addressed. Based on a defined architecture, a structural project will be developed in which the main structure (columns and beams) is supported by steel structure, and several solutions using different slab systems will be technically presented according to the methodology for mounting them, execution, and cost comparisons. A more realistic evaluation of each slab system studied was sought by comparing them to each other in terms of structural behaviour, building techniques, and cost.

Key-words: steel frame, slab systems, composite slab, cost.

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT.....	5
SUMÁRIO.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	9
Lista de ABREVIATURAS E SIGLAS	14
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativas	16
1.2 Objetivos	17
2 SISTEMAS DE LAJES	18
2.1 Funções estruturais das lajes.....	18
2.2 Laje maciça	20
2.4 Laje pré-moldada com nervuras e blocos	24
2.5 Laje treliçada	26
2.6 Laje protendida.....	28
2.7 Laje protendida alveolar	29
2.8 Considerações sobre os tipos de lajes estudadas	32
3 LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO	33
3.1 Considerações iniciais.....	33
3.2 Laje com forma de aço incorporada (<i>steel deck</i>)	34
3.3 Laje com forma de aço incorporada - Dimensionamento.....	38
3.4 Ações a serem consideradas	39
3.4.1 Ações a serem consideradas antes da cura do concreto.....	39
3.4.2 Ações a serem consideradas depois da cura do concreto	40
3.4.3 Combinações de ações	40

3.5	Verificação da forma de aço antes da cura do concreto	40
3.5.1	Estados limites últimos	41
3.5.2	Estados limites de serviço	41
3.6	Verificação da laje mista depois da cura do concreto	42
3.6.1	Estados limites últimos	42
3.6.1.1	Resistência ao momento fletor	42
3.6.1.2	Resistência ao cisalhamento longitudinal.....	45
3.6.1.3	Resistência ao cisalhamento vertical	48
3.6.1.4	Resistência à punção.....	49
3.6.2	Estados limites de serviço:	51
3.6.2.1	Fissuração do concreto	51
3.6.2.2	Deslocamento vertical	52
3.7	Laje com forma de aço incorporada e EPS.....	52
3.8	Sistema de construção mista com laje e viga mestra	53
3.8.1	Tecnologia de construção com viga mestra e laje.....	54
4	METODOLOGIA	59
5	ESTUDO DE CASOS.....	61
5.1	Estudo de Caso 1	61
5.1.1	Estudo de Caso 1 – trecho de pavimento.....	62
5.1.2	Caso 1 – Laje maciça	63
5.1.3	Caso 1 – Laje treliçada	63
5.1.4	Caso 1 – Laje <i>deck</i> metálico com EPS.....	64
5.1.5	Caso 1 – Laje mista com MF-75 (<i>steel deck</i>)	66
5.1.6	Comparação de resultados	67
5.1.7	Conclusão parcial do Caso 1	70
5.2	Estudo de Caso 2.....	71
5.2.1	Caso 2 – Laje maciça	74
5.2.2	Caso 2 – Laje pré-moldada com trilhos protendidos	78
5.2.3	Caso 2 – Laje nervurada	81
5.2.4	Caso 2 – Laje alveolar	85
5.2.5	Caso 2 – Laje mista MF-50 e MF-75	89

5.2.6	Comparação de resultados	95
5.2.7	Conclusão caso 2	102
6	CONCLUSÃO	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	109
	ANEXO 1	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de materiais inertes para laje com vigotas de concreto (www.projest-engenharia.com).....	19
Figura 2.2 – Vigas metálicas com laje nervurada. (Fonte: www.atex.com.br).....	19
Figura 2.3 – Sequencia de execução laje maciça.....	19
Figura 2.4 – tipos de apoio em vigas metálicas.....	21
Figura 2.5 – Estrutura metálica com laje maciça apoiada na aba inferior.....	21
Figura 2.6 – laje nervurada apoiada em vigas metálicas (Atex – www.atex.com.br).....	23
Figura 2.7 – laje nervurada apoiada em pilares metálicos com capitéis maciço (Atex – www.atex.com.br).....	24
Figura 2.8 – laje nervurada apoiada em pilares metálicos com vigas-faixa (Atex – www.atex.com.br).....	24
Figura 2.9 – Elementos e montagem de laje pré fabricada (Mãos a obra – ABCP)	25
Figura 2.10 – Variação das alturas de uma laje pré fabricada comum (Milito).....	25
Figura 2.11 – Elementos de uma laje pré fabricada treliçada (Milito).....	26
Figura 2.12 – Variação das alturas de uma laje pré fabricada treliçada (Milito).....	27
Figura 2.13 – Viga metálica com laje de vigotas treliçadas Malite (1990).....	27
Figura 2.14 – Viga metálica com laje treliçada estudada por David (2007).....	25
Figura 2.15 – Montagem de uma laje lisa protendida (PREMAG - Engenharia)	29
Figura 2.16 – Processo de fabricação dos painéis alveolares. (firma R4)	30
Figura 2.17 – Laje alveolar apoiadas em vigas metálicas (Lajes Tatu).....	31
Figura 2.18 – Detalhe construtivo lajes alveolares apoiadas na viga metálica (Gerdau).....	31
Figura 2.19 – Detalhe construtivo lajes alveolares apoiadas na viga metálica (ArcelorMittal)	32
Figura 3.1 – Lajes mistas. (Ssedta, 2005).....	30
Figura 3.2 – Geometria e dispositivos de transferência mecânica do cisalhamento. Andrade et al. (2004).....	35
Figura 3.3 – Geometria e dispositivos de transferência mecânica do cisalhamento (De Nardin et al 2006.).....	35

Figura 3.4 – Modos de colapso envolvendo lajes mistas aço concreto.....	36
Figura 3.5 – Diagrama do modo de colapso das lajes mista. Andrade et al. (2004).....	37
Figura 3.6 – Típico colapso por cisalhamento longitudinal.....	37
Figura 3.7 – Laje mista aguardando a concretagem (Metform S/A).....	38
Figura 3.8 – Momento fletor resistente positivo com a linha neutra plástica acima da forma metálica (NBR 8800:2008).....	43
Figura 3.9 – Momento fletor resistente positivo com a linha neutra plástica na forma metálica (NBR 8800:2008).....	44
Figura 3.10 – Aumento da resistência por meio de conectores ou deformação nas extremidades (Fabrizzi 2007).....	46
Figura 3.11 – Área A_v	49
Figura 3.12 – Perímetro crítico para punção	51
Figura 3.13 – Sistema de laje mista idealizada. Andrade et al. (2004).....	52
Figura 3.14 – Sistema de laje mista idealizada. Andrade et al. (2004).....	53
Figura 3.15 – Viga “D” assimétrica (Sistema Girder-Slab®)	55
Figura 3.16 – Viga “D” assimétrica – corte da viga (Sistema Girder-Slab®)	55
Figura 3.17 – Detalhe de execução – injeção da argamassa (Sistema Girder-Slab®)	56
Figura 3.18 – Detalhe pilar e Viga “D” simétrica (Sistema Girder-Slab®)	56
Figura 3.19 – laje livre (Sistema Girder-Slab®)	57
Figura 3.20 – Viga tipo IFB (Arcelor Mittal)	58
Figura 5.1 – Pavimento a ser estudado	61
Figura 5.2 – Plano de viga caso1	62
Figura 5.3 – Plano de vigas para lajes maciças	63
Figura 5.4 – Plano de vigas para lajes treliçadas	64
Figura 5.5 – Plano de vigas para lajes com <i>deck</i> metálico.....	65
Figura 5.6 – Perfil do <i>deck</i> metálico	65
Figura 5.7 – Elemento de enchimento EPS.....	65
Figura 5.8 – Plano de vigas para lajes <i>steel deck</i>	66
Figura 5.9 – seção do <i>steel deck</i> MF-75	66

Figura 5.10 – Comparativo do volume de concreto entre os sistemas de lajes adotados ..	68
Figura 5.11 – Comparativo do material entre os sistemas de lajes adotados	68
Figura 5.12 – Comparativo da mão-de-obra entre os sistemas de lajes adotados	69
Figura 5.13 – Comparativo do custo total entre os sistemas de lajes adotados	69
Figura 5.14 – Planta baixa – pavimento Tipo	71
Figura 5.15 – Planta baixa – pavimento Cobertura	71
Figura 5.16 – Elevação eixos 3 e 4	72
Figura 5.17 – Elevação eixos 1 e 6	72
Figura 5.18 – Fachada eixos A e D	72
Figura 5.19 – Plano de vigas – laje maciça	74
Figura 5.20 – Esquema de escoramento.....	77
Figura 5.21 – Composição de custo para a laje maciça opção construtiva 2.....	77
Figura 5.22 – Plano de vigas – laje pré-moldada com trilhos protendidos	78
Figura 5.23 – Composição de custo em porcentagem – laje pré-moldada	81
Figura 5.24 – Plano de vigas – laje nervurada	82
Figura 5.25 – Plano de vigas – Forma Atex	83
Figura 5.26 – Escoramento para laje nervurada. Atex	84
Figura 5.27 – Composição de custo em porcentagem – laje nervurada	85
Figura 5.28 – Plano de vigas – laje alveolar.....	86
Figura 5.29 – Painéis alveolares (Lajes Tatu)	86
Figura 5.30 – Composição de custo em porcentagem – laje alveolar.....	88
Figura 5.31 – Plano de vigas – laje mista MF-50	89
Figura 5.32 – Plano de vigas – laje mista MF-75	90
Figura 5.33 – Composição de custo em porcentagem – laje mista <i>steel deck</i> MF-50	93
Figura 5.34 – Composição de custo em porcentagem – laje mista <i>steel deck</i> MF-75	94
Figura 5.35 – Composição - custos de materiais, mão de obra e custo total.....	95
Figura 5.36 – Composição – custo aço (armação e telas)	98
Figura 5.37 – Composição – custo volume de concreto.....	99

Figura 5.38 – Composição – custo escoramento	100
Figura 5.39 – Composição – estrutura metálica	101
Figura 5.40 – Custo total em porcentagem	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela de cargas e vão máximos - MF-75. (Metform S/A).....	41
Tabela 5.1 – Custo comparativo das lajes.....	67
Tabela 5.2 – Ações consideradas	67
Tabela 5.3 – Esforços nos pilares e dimensionamento – laje maciça	75
Tabela 5.4 – Momentos nas vigas e dimensionamento– laje maciça	76
Tabela 5.5 – Planilha de custo para laje maciça opção construtiva 1	76
Tabela 5.6 – Planilha de custo para laje maciça opção construtiva 2	77
Tabela 5.7 – Esforços nos pilares e dimensionamento– laje pré-moldada	78
Tabela 5.8 – Momentos nas vigas e dimensionamento– laje pré-moldada.....	80
Tabela 5.9 – Planilha de custo – laje pré-moldada.....	80
Tabela 5.10 – Sistemas de forma Atex 900. Atex	82
Tabela 5.11 – Esforços nos pilares e dimensionamento– laje nervurada	83
Tabela 5.12 – Momentos nas vigas e dimensionamento– laje nervurada.....	84
Tabela 5.13 – Planilha de custo – laje nervurada.....	85
Tabela 5.14 – Esforços nos pilares e dimensionamento – laje alveolar	87
Tabela 5.15 – Momentos nas vigas e dimensionamento – laje alveolar	87
Tabela 5.16 – Planilha de custo – laje alveolar	88
Tabela 5.17 – Esforços nos pilares e dimensionamento – <i>steel deck</i> MF-50	91
Tabela 5.18 – Esforços nos pilares e dimensionamento – <i>steel deck</i> MF-75	91
Tabela 5.19 – Momentos nas vigas e dimensionamento - <i>steel deck</i> MF-50.....	92
Tabela 5.20 – Momentos nas vigas e dimensionamento - <i>steel deck</i> MF-75.....	92
Tabela 5.21 – Planilha de custo – <i>steel deck</i> MF-50.....	93
Tabela 5.22 – Planilha de custo – <i>steel deck</i> MF-75.....	94
Tabela 5.23 – Planilha de custo geral com todas as lajes.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CSTB	<i>Centre Scientifique du Bâtiment</i>
CSTC	<i>Centre Scientifique et Technique de la Constrution</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas

1 INTRODUÇÃO

Hoje é uma tendência mundial a busca da industrialização na construção civil, e a estrutura metálica é uma construção que já nasceu industrializada, exigindo uma concepção de projeto adequada e avaliando de forma racionalizada as interfaces com os sistemas complementares que normalmente não são industrializados, mantendo-se a rapidez de execução.

A construção metálica permite total padronização dos elementos que compõem a estrutura principal e também a estrutura de fechamento, o que leva à otimização do processo construtivo, tornando-a competitiva por sua alta produtividade, ganho de escala e entrega rápida.

A construção de edifícios metálicos de múltiplos pavimentos iniciou-se no Brasil com Paulo Fragoso, engenheiro calculista, que foi pioneiro em projetos de edifícios concebidos para serem construídos com estruturas metálicas. No período entre 1950 e 1960, a Fábrica de Estruturas Metálicas (FEM) da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) fabricou e montou muitas estruturas entre elas: Garagem América em São Paulo com 15 andares, 948 toneladas de aço; Palácio do Comércio em São Paulo, com 24 andares e consumo de 136 toneladas de aço; Jockey Clube Brasileiro com 13 andares, consumo de 2.003 toneladas de aço. (Sales et al 1994). Atualmente, no Brasil, ainda predomina a cultura dos edifícios em concreto armado, porém tem crescido a demanda nesse seguimento. O aço hoje é viável economicamente para a construção de grandes edifícios comerciais, quando alguns requisitos são atendidos como: grande vãos nos pavimentos, necessidade de flexibilidade no *lay-out*, repetição de módulos, prazo de construção reduzido.

Com o desenvolvimento de diversos sistemas estruturais e construtivos e na busca por usufruir das vantagens de cada material, surgiu o sistema formado por elementos mistos de aço e concreto. Nas construções mistas, o concreto foi primeiramente usado, no início do século, como material de revestimento, protegendo os perfis de aço contra o fogo e a corrosão e, embora o concreto pudesse ter alguma participação em termos estruturais, sua contribuição na resistência era desprezada.

As estruturas mistas são estruturas formadas pela associação de perfis de aço e concreto estrutural de modo que os materiais trabalhem conjuntamente para resistir aos esforços solicitantes. Desta forma é possível explorar as melhores características de cada material, tanto em elementos lineares como vigas e pilares como nas lajes e ligações.

A busca por estruturas mais esbeltas e vãos maiores vem contribuindo para a utilização crescente de estruturas mistas que exploram a vantagem de cada sistema

estrutural aço-concreto. Portanto, é necessário que o engenheiro de hoje conheça profundamente os dois materiais, tanto na fase de projeto como de execução. O futuro deixa claro existir uma trégua entre os projetistas de estruturas metálicas e os projetistas de concreto, como adverte Julio Fruchtengarten, professor da Poli-USP e diretor da Kurdjian Fruchtengarten Engenheiros Associados. “*O maior erro da construção civil brasileira é pensar que concreto e aço são materiais concorrentes. São materiais complementares. Um bom projeto pode exigir apenas estrutura metálica, apenas concreto, ou uma mistura de ambos.*” (Fonte: www.metallica.com.br)

Sendo a estrutura de múltiplos pavimentos em concreto ou estrutura metálica, a laje é usualmente em concreto, cuja execução utiliza formas de madeira e escoramento, processo construtivo artesanal que diminui a velocidade da construção, tirando vantagens com relação à rapidez da estrutura metálica. A escolha adequada dos sistemas de laje para a estrutura metálica são fatores preponderantes para a racionalização da construção e a redução de prazo e custos.

Vários trabalhos têm sido feitos sobre estruturas mistas, aço e concreto, como FABRIZZI, que analisou edifícios de múltiplos pavimentos com elementos estruturais misto aço-concreto, BENDOLAN, que analisou experimentalmente uma laje com forma de aço incorporada, DAVID que fez uma análise teórica e experimental com conectores de cisalhamento utilizando viga mista e vigotas pré-moldadas, entre outros, porém nota-se uma carência na literatura técnica de comparações entre os diversos tipos de lajes e quais os mais adequados para as estruturas metálicas. O presente trabalho vem contribuir e servir de subsídio aos profissionais e ao meio acadêmico.

1.1 Justificativas

A construção metálica no Brasil tem diversificado a sua aplicabilidade nos últimos anos. No passado, as principais aplicações eram edifícios industriais e torres de transmissão; hoje a construção metálica tem sido aplicada, ainda com uma participação tímida, em edifícios de andares múltiplos residenciais e comerciais, destacando-se, entretanto, que nos últimos anos a construção em aço tem crescido exponencialmente, seguindo a inexorável tendência ao uso de processos industrializados e alta tecnologia.

O tema de pesquisa proposto vem contribuir para o desenvolvimento de sistemas complementares para pavimentos industrializados, uma vez que a escolha adequada dos

elementos construtivos e sua conveniente combinação são fatores preponderantes para a racionalização da construção e a redução de prazo e custo.

Estudos e discussões sobre importantes aspectos do comportamento estrutural e da interação entre a estrutura e seus subsistemas como os pavimentos poderão fornecer subsídios para elaboração de normas técnicas, recomendações e desenvolvimento de novas tecnologias e ferramentas para a elaboração dos projetos.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste projeto de pesquisa podem ser sintetizados da seguinte forma:

1.2.1. Estudar e comparar o desempenho de diversos tipos de lajes e sua utilização nos pavimentos de estrutura metálica, explanar as diferenças de cada laje, proporcionando ao profissional a escolha adequada;

1.2.2. Para uma arquitetura definida, comparar custos da estrutura em função dos tipos de lajes utilizadas: laje maciça, laje nervurada, laje pré-moldada, laje alveolar e laje mista aço-concreto;

1.2.3. Apresentar e discutir diferentes formas de associação entre lajes de concreto e vigas de aço para formar os sistemas mistos de pavimento.

2 SISTEMAS DE LAJES

2.1 Funções estruturais das lajes

As lajes são estruturas que recebem ações verticais, perpendiculares à superfície média, e as transmitem para os apoios. Essa situação confere à laje o comportamento de placa. As lajes também atuam como diafragma horizontal rígido, distribuindo as ações horizontais aos diversos pilares da estrutura, dessa forma a laje comporta-se como uma chapa.

O comportamento de chapa é fundamental para a estabilidade global da estrutura, principalmente nos edifícios altos. É por meio das lajes que os pilares contraventados se apoiam nos elementos de contraventamento, garantindo a segurança da estrutura em relação às ações laterais. Outra função importante das lajes é a de, quando construídas ligadas monoliticamente às vigas, funcionarem como mesas de compressão da seção T, nas estruturas metálicas e para obtermos esse benefício é necessária a utilização dos conectores.

Com o avanço da tecnologia de *softwares* na engenharia civil, têm surgido simulações mais próximas do modelo real como as representações das ligações semirrígidas típicas do comportamento das estruturas metálicas. Tais considerações de projeto tornam a estrutura mais flexível, diminuindo a rigidez a esforços horizontais e à estabilidade global. O engenheiro deve verificar a contribuição de todos os elementos estruturais para absorver o efeito de instabilidade

Segundo BEZERRA (1995), ao considerar as lajes como estrutura de contraventamento, verificou que a rigidez desses elementos nas estruturas de edifícios altos reduz significativamente os deslocamentos horizontais.

As lajes nas estruturas de concreto ou nas estruturas metálicas têm a mesma função de contribuir no contraventamento horizontal, portanto nas estruturas mistas de aço e concreto é necessário haver a solidarização de todo o conjunto (viga-laje), para que a estrutura passe a ter o mesmo comportamento monolítico da estrutura de concreto, conseguido por meio de conectores, permitindo que a laje forme um diafragma contínuo.

A escolha da laje para a estrutura metálica deve ser uma decisão pautada na logística da execução da obra, nas ações que suportará e nas dimensões dos vãos, cabendo ao

engenheiro avaliar e escolher a solução que atenda aos objetivos do empreendimento. As soluções são diversas, existem vários sistemas construtivos de lajes. Avaliam-se também fatores como: eficácia, durabilidade, resistência, funcionalidade, agilidade de execução e menor custo. Nas Figuras 2.1 a e 2.1 b e 2.2 são apresentados dois tipos comuns de lajes para estrutura metálica. Nas Figuras 2.1a e 2.1b são apresentadas vigas metálicas com laje de vigotas de concreto e elemento inerte tipo EPS e cerâmico.



Figura 2.1 – Tipos de materiais inertes para laje com vigotas de concreto.

(Fonte: www.projest-engenharia.com)



Figura 2.2 – Vigas metálicas com laje nervurada. (Fonte: www.atex.com.br)

Na Figura 2.2 são apresentadas vigas metálicas com laje nervurada, concretada sem a presença do material inerte, com forma de polipropileno. (Edifício poliesportivo da PUC/RS., Porto Alegre-RS).

A estrutura metálica em sua essência é um sistema industrializado, a racionalização e a modulação nascem no projeto arquitetônico, otimizando a execução no canteiro de obras e reduzindo ou eliminando custos indiretos e desperdícios, portanto cabe avaliar um sistema de laje que venha de encontro com a natureza do sistema metálico.

Nos próximos tópicos, serão discutidos os tipos de lajes mais comuns no Brasil.

2.2 Laje maciça

As lajes maciças são comumente utilizadas em vários tipos de edificações, desde residências a edifícios de múltiplos andares. Consiste basicamente de formas e escoras que sustentam a estrutura de concreto armado durante o processo de cura. A laje maciça não pode vencer grandes vãos, devido ao seu peso próprio. É prática usual adotar-se como vão médio econômico das lajes um valor entre 3,5m e 5m.

Segundo a NBR 6118:2003, os limites mínimos para a espessura são:

- a) 5 cm para laje de cobertura;
- b) 7 cm para laje de piso;
- c) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30kN;
- d) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30kN.

Na Figuras 2.3 apresentam-se fases da execução de uma laje maciça.



Figura 2.3 – Sequencia de execução laje maciça

Na Figura 2.3 é apresentada a laje durante a concretagem e na fase de cura. (Fotos cedidas pela construtora Tecnoart-Eng.)

Dentre as desvantagens desse sistema, pode-se destacar:

- Com os limites mínimos impostos pela norma, e considerando os vãos médios econômicos, o projeto pode contar com uma quantidade grande de vigas, deixando a forma do pavimento muito recortada e diminuindo a produtividade da construção;
- Grande consumo de concreto, aço e formas.

As principais vantagens do sistema são:

- O projeto contando com várias vigas, por outro lado, formam muitos pórticos que garantem uma boa rigidez à estrutura de contraventamento;
- Por ser um sistema muito utilizado em todo o país nas construções de concreto, a mão de obra encontra-se disponível.

As lajes maciças, quando utilizadas em estruturas metálicas, necessitam de conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça (*stud bolt*) para que exista um comportamento eficiente entre ambos os materiais: aço e concreto, promovendo o trabalho conjunto. As lajes maciças não são viáveis economicamente para vãos acima de 6 metros onde a altura da mesma torna-se elevada, aumentando-se muito o volume de concreto.

A estrutura metálica é mais econômica para vãos a partir de 6 metros, sendo necessária, portanto, a busca de lajes mais adequadas. Algumas vezes por imposição arquitetônica, a laje maciça pode ser apoiada na aba inferior da viga de aço, como mostram as Figuras 2.4a, 2.4b e 2.5.

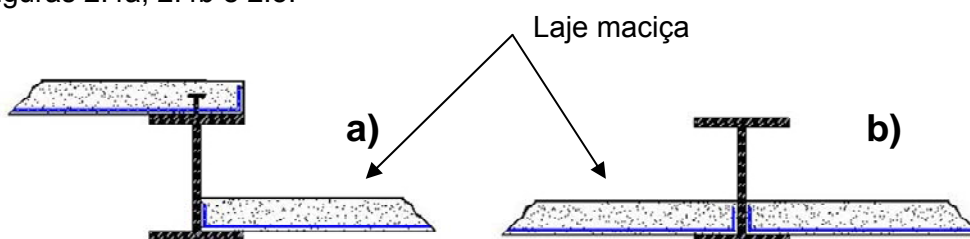


Figura 2.4 tipos de apoio em vigas metálicas



Figura 2.5 estrutura metálica com laje maciça apoiada na aba inferior

Para edifícios com poucos pavimentos, a solução em laje maciça tem-se mostrado menos econômica do que a laje pré-fabricada. Entretanto, para edifícios de muitos pavimentos, o custo total da laje maciça pode ser reduzido sensivelmente devido à reutilização das formas.

A utilização das formas e a necessidade de escoramento contrariam a filosofia da estrutura metálica que busca sistemas construtivos industrializados.

2.3 Laje nervurada

As lajes nervuradas são empregadas quando se deseja vencer grandes vãos e/ou grandes sobrecargas. O aumento do desempenho estrutural é obtido em decorrência da ausência de concreto entre as nervuras, o que possibilita um alívio de peso não comprometendo sua inércia. No sistema nervurado, tem-se, além do alívio do peso próprio da estrutura, um aproveitamento mais eficiente dos materiais, aço e concreto. A mesa de concreto resiste aos esforços de compressão. A armadura resiste aos esforços de tração e a nervura de concreto, faz a ligação mesa-alma, resistindo aos esforços de cisalhamento. Os vazios são obtidos com caixotes de polipropileno removíveis ou então pela colocação de material inerte perdido, como, por exemplo, o isopor ou peças cerâmicas.

As lajes nervuradas têm duas partes principais:

1 - a mesa: que é a pequena camada de concreto comprimida.

2- as nervuras: que são as regiões tracionadas e cisalhadas onde estão localizadas armaduras de tração e cisalhamento.

As lajes nervuradas podem ser moldadas no local, utilizando-se formas, escoramento e material de enchimento (eps ou cerâmico) ou com nervuras pré-moldadas que são constituídas de vigotas, dispensando o uso do tabuleiro na forma tradicional.

Muitos trabalhos têm estudado o comportamento e as aplicações das lajes nervuradas, como evidenciado em Bocchi Júnior (1995). Estas lajes apresentam um comportamento elástico intermediário entre placa e grelha. Assim, as normas técnicas permitem que, além do cálculo dos esforços solicitantes e deslocamentos segundo a teoria das placas, o mesmo pode ser feito segundo a teoria das grelhas.

A empresa ATEX do Brasil, produtora de caixotes de polipropileno, fez um estudo comparativo de consumo de materiais pela análise de cinco lajes simplesmente apoiadas, nervuradas e maciças de espessura, equivalente em inércia à flexão, utilizando como processo de cálculo a Teoria de Placa para ambos os sistemas, por meio de tabelas.

Concluiu que, em média, a utilização das lajes nervuradas como solução resulta em uma economia de 28,8% no consumo de concreto e 38,4% no consumo de aço, em comparação com a laje maciça. A Figura 2.6 mostra uma laje executada com as formas da Atex.



Figura 2.6 laje nervurada apoiada em vigas metálicas (Fonte: www.atex.com.br)

As lajes nervuradas apresentam várias vantagens. Algumas das quais merecem ser destacadas:

- permitem vencer grandes vãos, liberando-se espaços, o que é vantajoso em locais como garagens, onde os pilares, além de dificultarem as manobras dos veículos, ocupam regiões que serviriam para vagas;

- podem ser construídas com a mesma tecnologia empregada nas lajes maciças.

- são versáteis nas aplicações, podendo ser utilizadas em pavimentos de edificações comerciais, residenciais, educacionais, hospitalares, garagens, “shoppings centers”, etc.;

- Gasta-se menos concreto e aço que as lajes maciças, diminuindo o peso próprio final e aliviando assim as fundações;

- pelas suas características (grande altura e pequeno peso próprio), são bastante adequadas para suportar cargas elevadas.

Como desvantagens podem ser citadas:

- Quando não houver compatibilização adequada na fase de projeto, haverá grande dificuldade na passagem das tubulações hidráulicas e elétricas.

- Resultam em alturas maiores, aumentando a altura final do prédio ou de cada pé direito.

A utilização de lajes nervuradas em estruturas metálicas torna-se uma opção interessante, quando se avalia o processo construtivo, dando agilidade à obra. As formas de polipropileno utilizam uma tecnologia racional de montagem e ganham rapidez por serem

leves e por serem apoiadas diretamente no escoramento, evitando-se compensados em toda a extensão da laje, como ocorre com as lajes maciças. Pode-se também dispensar as vigas, fazendo-se a laje apoiada nos pilares com o uso de capitéis maciços ou com vigas-faixa como mostrado nas Figuras 2.7 e 2.8.



Figura 2.7 laje nervurada apoiada em pilares metálicos com capitéis maciços (Fonte: www.atex.com.br)



Figura 2.8 laje nervurada apoiada em pilares metálicos com vigas-faixa (Fonte: www.atex.com.br)

Desse sistema de laje daremos destaque para as lajes pré-moldadas com nervuras e blocos e as lajes treliçadas.

2.4 Laje pré-moldada com nervuras e blocos

As lajes pré-moldadas originam-se das lajes nervuradas e das lajes nervuradas mistas, onde, em geral, as peças pré-fabricadas são empregadas para a formação das nervuras. Entre elas, colocam-se elementos intermediários de cerâmica, concreto ou outros materiais, e a capa de concreto, feita no local ou usinada, tem a função de solidarização dos

elementos, além de resistir aos esforços de compressão, oriundos da flexão. Na Figura 2.9, há um esquema geral de uma laje pré-moldada.

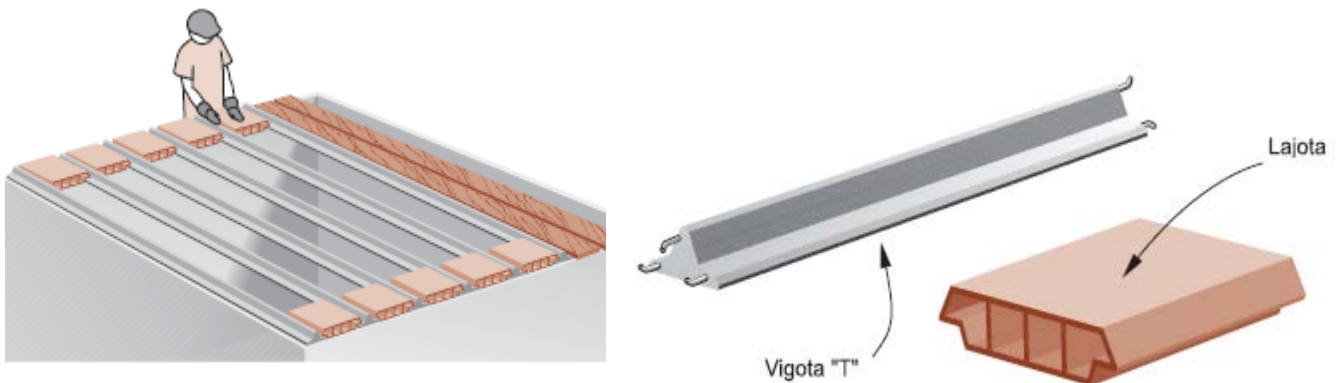


Figura 2.9 – Elementos e montagem de laje pré-fabricada. (Fonte: Mãos a obra – ABCP)

As diferentes alturas dos elementos de enchimento, com o lançamento de camadas de concreto em espessura adequada, resultam nas variadas alturas de lajes pré-moldadas. As diferentes larguras dos elementos de enchimento proporcionam os variados intereixos entre as vigotas. As mais usuais são: $\beta 10$ para forro e $\beta 12$ para piso, em vãos máximos de 4,50m (Figura 2.10).

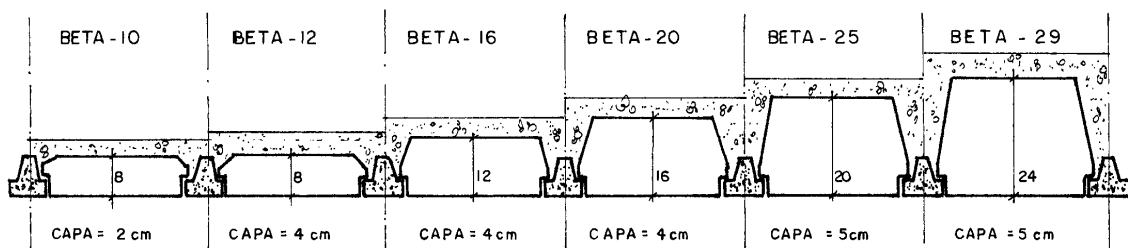


Figura 2.10 - Variação das alturas de uma laje pré-fabricada comum. (Fonte: Milito)

Essas lajes são compostas por vigotas e blocos cerâmicos, e a solidarização do conjunto deve ser feita com uma capa superior de concreto, geralmente de 4 cm de espessura. A grande vantagem deste tipo de solução é a velocidade de execução e a dispensa de formas. Seus vãos variam de 4 a 8 metros, podendo-se chegar a 15 metros.

A desvantagem deste tipo de laje é a presença das lajotas cerâmicas ou eps como material inerte, devido a sua fragilidade, podendo quebrar no transporte, na colocação ou no lançamento do concreto; sendo indicada a presença de uma tela construtiva na capa de concreto que diminui ainda os riscos de fissuras sobre a laje devido a esforços de tração.

Os sistemas pré-fabricados de lajes vêm revolucionando os canteiros de obras devido a sua versatilidade, praticidade e rapidez de montagem. Quando as vigotas são protendidas, podemos ter vãos de 3 metros sem escoramento ou 6 metros com apenas uma linha de escoramento. Este sistema segue a tendência mundial da construção civil que é abandonar processos artesanais em prol da industrialização progressiva, porque ela aumenta a velocidade e a qualidade reduzindo custos.

Os sistemas pré-fabricados de concreto, quando utilizados com estruturas metálicas, tornam-se sistemas competitivos, ambos os processos são industrializados, o que dinamiza a execução da obra, retornando ao empreendedor um ganho adicional pela ocupação antecipada do imóvel e pela rapidez no retorno do capital investido.

2.5 Laje treliçada

São lajes em que a viga pré-fabricada é constituída de armadura em forma de treliça e, após concretada, promove uma perfeita solidarização, tendo ainda a possibilidade de utilizar armadura transversal.

É constituída por uma armadura treliçada, variando de 7,0 a 25 cm de altura, e a mesa inferior concretada com 3 cm de espessura e de 12 a 13 cm de largura. O elemento de enchimento pode ser cerâmico de concreto ou EPS (Figura 2.11).

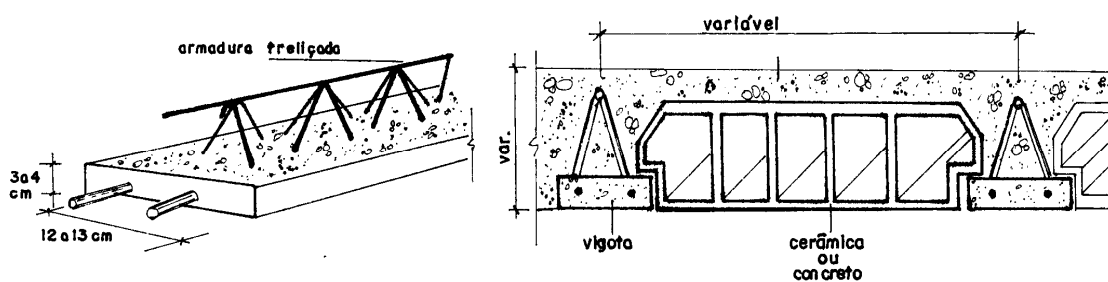


Figura 2.11 – Elementos de uma laje pré-fabricada treliçada. (Fonte: Milito)

As diferentes alturas dos elementos de enchimento e a variação da altura da treliça mais a espessura do capeamento resultam nas variadas alturas da laje. As diferentes larguras dos elementos de enchimento proporcionam os variados intereixos entre as vigotas, conforme Figura 2.12.

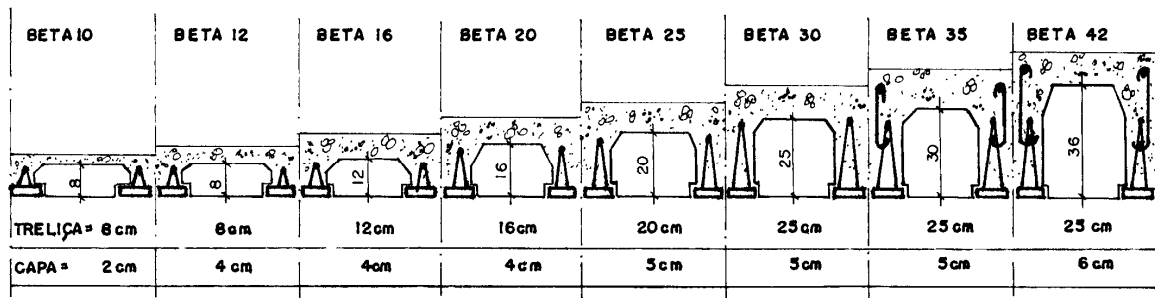


Figura 2.12 – Variação das alturas de uma laje pré-fabricada treliçada. (Fonte: Milito)

A laje treliçada pode ser utilizada em obras grandes, pois, aumentando-se as treliças, conseguimos uma maior resistência e conseqüentemente vencemos maiores vãos. Pelo fato de suportar grandes cargas, é permitida a execução de paredes diretamente sobre estas lajes. Este tipo de laje possui baixo peso próprio, proporcionando uma estrutura mais leve, com redução na quantidade de vigas e pilares e alívio das cargas na fundação. A configuração do sistema com treliças permite a confecção das lajes nervuradas em uma ou em duas direções. O primeiro caso também é chamado de unidirecional, enquanto o segundo é denominado por sistema bidirecional. A laje é considerada bidirecional, pois possui nervuras resistentes em duas direções ortogonais que serão muito importantes para a diminuição das flechas e no travamento transversal da laje.

Na Figura 2.13, apresenta-se a montagem da laje treliçada com enchimento de lajota cerâmica numa estrutura metálica.

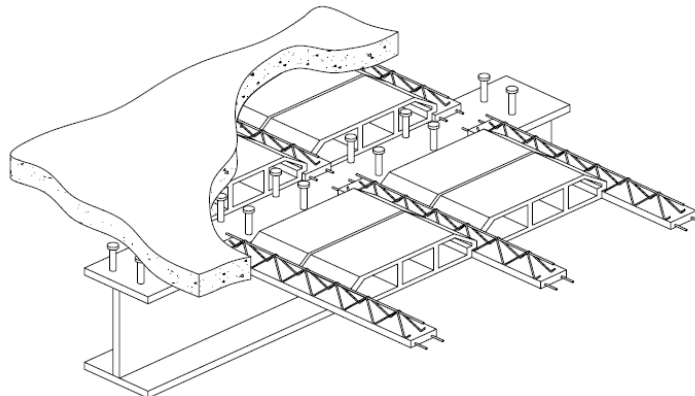


Figura 2.13 – Viga metálica com laje de vigotas treliçadas. (Fonte: Malite 1990)

Atualment, quando utilizamos as lajes treliçadas nas estruturas metálicas, para compor uma viga mista, é necessário fazer uma região maciça no contorno da viga, exigindo formas e escoramento adicional. Estudos de vigas mistas vêm sendo realizados sem a região de concreto, tornando esse sistema de laje mais compatibilizado com o sistema estrutural metálico.

David (2007) estudou o sistema de laje treliçada apoiada em estruturas metálicas com conectores em perfil U formado a frio, sendo que ele desenvolveu um estudo teórico e experimental utilizando os conectores e vigas mistas e laje de vigotas pré-moldadas. Segundo David (2007), ao analisar a fissuração das lajes (Figura 2.14), observou que as mesmas não ocorreram na fase de serviço, portanto não é necessário retirar o material de enchimento na região da viga metálica e considerar uma laje maciça, o que torna a execução da laje treliçada mais rápida, evitando formas nessas regiões e com menos detalhe na construção e ganho significativo na estrutura metálica.

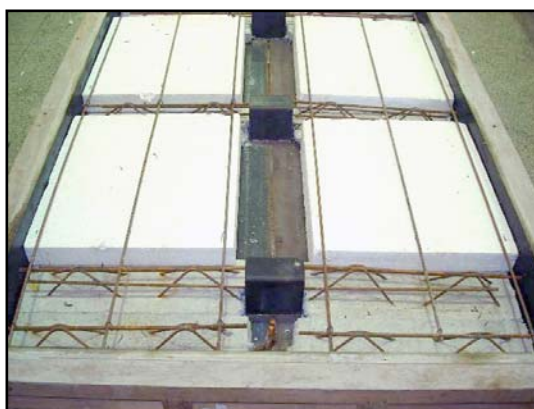


Figura 2.14 – Viga metálica com laje treliçada estudada por David (2007)

2.6 Laje protendida

As lajes protendidas (Figura 2.15) são sistemas estruturais para grandes vãos em pisos, podendo ser executadas *in loco* com a protensão das lajes por meio de cordoalhas engraxadas não aderentes, onde o efeito da tração do cabo é transmitido por meio de ancoragens nas bordas da laje.

O concreto armado e concreto protendido são materiais que utilizam os mesmos materiais (concreto e aço) e possuem características mecânicas semelhantes. A grande diferença está na existência das forças de protensão e demais fatores consequentes, como utilização de materiais de alta resistência, dispositivos e equipamentos adicionais e trabalho especializado.

O concreto protendido é mais indicado para vencer grandes vãos e suportar carregamentos elevados, do contrário ele se torna antieconômico. As peças em concreto protendido podem ser mais esbeltas do que as de concreto armado, favorecendo a arquitetura arrojada. Em serviço, os elementos protendidos apresentam menor nível de

fissuração e de flechas. Devido à utilização de materiais de alta resistência e aos efeitos da protensão, reduzindo, por exemplo, o efeito do cortante por meio do balanceamento das cargas, as peças protendidas são mais leves, reduzindo a carga transferida aos elementos estruturais de apoio.

Entre suas vantagens destacam-se:

- As deformações são menores do que nas lajes de concreto armado;
- Estrutura mais econômica devido ao emprego de aços de maior resistência;
- É possível uma retirada antecipada do escoramento e das formas, pelo fato de se trabalhar com tensões relativamente baixas;
- Há um melhor comportamento da estrutura com relação às fissuras;
- A ausência de vigas com altura maior que a da laje oferece vantagens evidentes para execução da obra quanto à economia, tanto de material quanto de tempo;



Figura 2.15 – Montagem de uma laje lisa protendida (Fonte: PREMAG - Engenharia)

2.7 Laje protendida alveolar

Os elementos pré-moldados mais comumente utilizados para lajes de edificações são os painéis alveolares, tipo π , tipo U e maciços. Hoje, no Brasil, a utilização de elementos pré-moldados ainda é muito pequena quando comparada com outros países da Europa e com os Estados Unidos.

As lajes protendidas alveolares são comumente usadas em estruturas pré-fabricadas, porém o sistema *Gider-Slab Technologies* está utilizando um modelo híbrido com aço e concreto. É o primeiro a usar lajes alveolares pré-moldadas de vãos longos com viga de aço para obter uma construção de laje estrutural monolítica.

A laje alveolar fica realmente econômica, a partir de aproximadamente 250 m² de área construída. É possível executar obras menores com este tipo de laje, porém o custo de montagem da laje (custo com guindaste ou munck) será diluído em uma área menor e, portanto, o custo por m² de obra será mais elevado.

É uma opção para obras que necessitem de velocidade, e vem de encontro com a racionalização que se busca na estrutura metálica, na Figura 2.17 apresenta-se a laje alveolar apoiada em estruturas metálicas. É necessário para apoio mínimo, que a aba superior da viga metálica seja igual a metade da altura da laje.

O fato da laje alveolar dispensar o escoramento, é uma grande vantagem para obras com pé-direito elevado. A laje alveolar é especialmente interessante para :

- Vãos menores que 5,0 m e sobrecargas $\geq 500\text{Kg/m}^2$;
- Vãos maiores que 6,0 m e qualquer sobrecarga.

São lajes que apresentam excelente acabamento inferior, dispensando serviços adicionais para a maioria das aplicações. A laje alveolar é produzida com um tipo especial de aço, denominado aço para protensão.

São produzidas em pistas com aproximadamente 150 m de comprimento em um único painel, por extrusão, e depois é cortada (Figura 2.16).



Figura 2.16 – Processo de fabricação dos painéis alveolares. (Fonte: www.r4tecno.com.br)

- 1 - Cordoalha - aço para protensão.
- 2 - Cabeceiras de protensão.
- 3 - Pista de 150 m, com laje alveolar já extrudada.
- 4 - Pista de 150 m, com cordoalhas sendo posicionadas para fabricação de lajes.
- 5 - Macaco de protensão de cordoalhas.



Figura 2.17 – Laje alveolar apoiadas em vigas metálicas. (Fonte: www.tatu.com.br)

Quando as lajes alveolares começaram a ser utilizadas em estruturas metálicas, como estrutura mista, os apoios das lajes eram feitos na aba superior do perfil, implicando na necessidade de fazer recorte no pré-moldado para a colocação das armaduras de ligação (Figura 2.18)

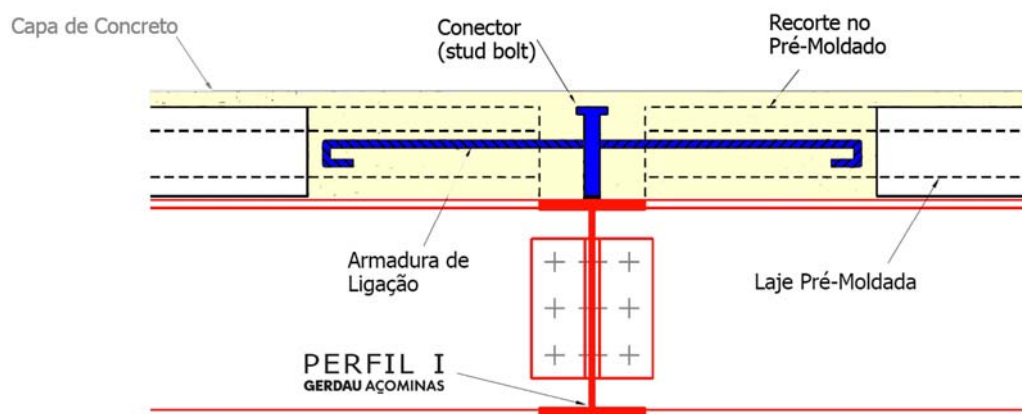


Figura 2.18 – Detalhe construtivo de lajes alveolares apoiadas na viga metálica (Fonte: www.Gerdau.com.br)

Hoje com o conceito de *slim-floor*, as lajes alveolares são assentadas sobre a face superior da aba inferior das vigas (Figura 2.19), entre a viga e a laje há um preenchimento de concreto que após a cura garante um funcionamento solidário, passando, os dois materiais, a trabalhar de forma conjunta. Recomenda-se a colocação de uma armadura construtiva mínima para absorver esforços de tração nesta região, evitando-se a fissuração.

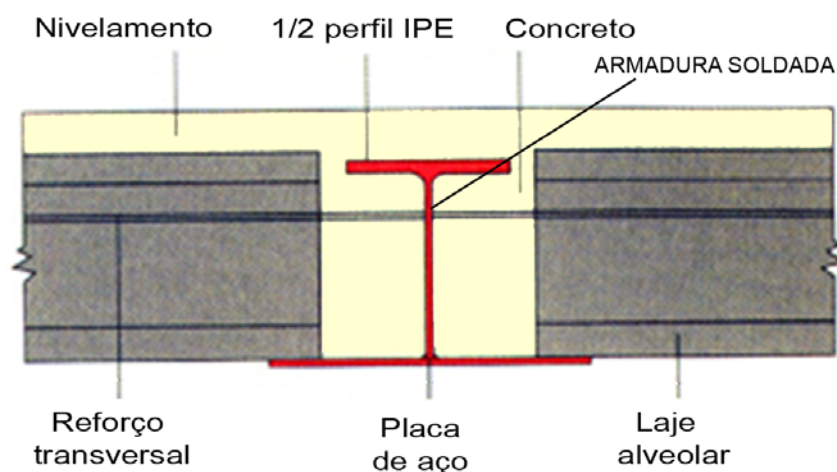


Figura 2.19 – Detalhe construtivo das lajes alveolares apoiadas em viga metálica (Fonte: ArcelorMittal)

2.8 Considerações sobre os tipos de lajes estudadas

No capítulo anterior abordou-se os tipos usuais de laje para estrutura metálica, cada qual com suas vantagens, sendo que a utilização de cada sistema depende de variáveis como custo, rapidez de execução, espaço útil, definição arquitetônica, dentre outros. O profissional, para fazer a sua escolha, deve conhecer cada sistema disponível atualmente no mercado, suas limitações, características e qualidades, formando, assim, o melhor conjunto entre custo e benefício para o empreendedor.

O próximo capítulo tratará sobre laje mista de aço/concreto e os novos sistemas mistos que vêm sendo desenvolvidos com base nas deficiências dos sistemas existentes, buscando melhor desempenho dos materiais e dos sistemas industrializados.

3 LAJES MISTAS DE AÇO E CONCRETO

3.1 Considerações iniciais

A necessidade crescente de racionalizar os processos construtivos e vencer prazos curtos de obra vem trazendo à tona soluções inovadoras nos sistemas de lajes. Neste capítulo abordam-se tipos de lajes usuais para estruturas metálicas que promovem a rapidez de execução. São sistemas leves que, dependendo do vão, dispensam escoramentos, trazendo reflexos positivos no cronograma da obra, uma vez que permitem o trabalho em vários pavimentos ao mesmo tempo e a execução das lajes deixa de estar condicionada ao tempo de endurecimento do piso de concreto. Essas lajes têm características que somadas à dinâmica das estruturas metálicas tornam-se competitivas em obras de curto prazo.

A laje mista é resultado do trabalho conjunto entre uma forma de aço perfilada e o concreto armado sobre a mesma, a solidariedade entre os dois materiais pode ser mecânica, a partir da utilização de conectores de cisalhamento, mossas, saliências, etc. ou por atrito gerado pelo confinamento do concreto em formas reentrantes. Caso não exista uma vinculação mecânica entre a chapa de aço e o concreto, a ação composta não é considerada efetiva (Gomes, 2001).

A forma de aço atua como armadura positiva, absorvendo os momentos fletores positivos. Para os momentos fletores negativos, devem ser previstas armaduras de reforço (Figura 3.1).

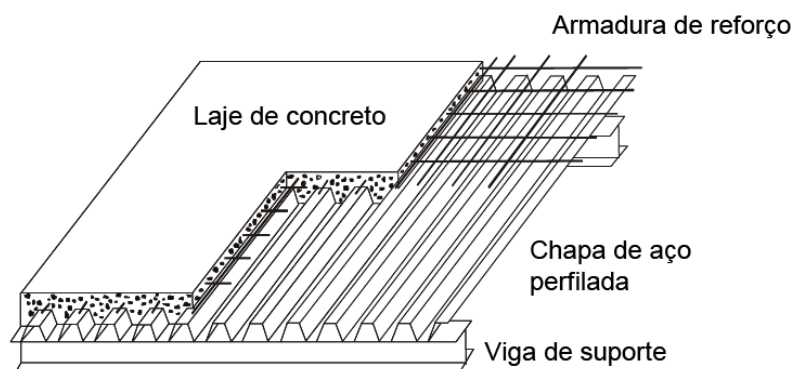


Figura 3.1 Lajes mistas. (Fonte: Ssedta, 2005)

Os sistemas de lajes mistas apresentam algumas vantagens. Entre elas, podem ser citadas:

- para vãos entre 3 metros, dispensa o escoramento;
- redução de desperdício de material;
- facilidade de instalação e maior rapidez na construção;
- facilidade de passagem de dutos e de fixação de forros;
- redução (ou eliminação) da armadura de tração na região de momentos positivos;
- maior segurança do trabalho, por funcionar como plataforma de serviço e de proteção aos operários que trabalham nos andares inferiores;
- praticidade de execução, uma vez que a forma fica incorporada ao sistema, não havendo a etapa de desforma.
- reduz a distância de piso a piso, podendo-se obter, para a mesma altura de uma edificação com cerca de 12 andares, um andar adicional.

No entanto, algumas desvantagens podem ser citadas:

- necessidade de utilização de forros suspensos, por razões estéticas, evitando que seja mostrada a chapa metálica.
- maior quantidade de vigas secundárias, caso não se utilizem o sistema escorado e/ou formas de grande altura, devido a limitações dos vãos antes da cura do concreto.

3.2 Laje com forma de aço incorporada (*steel deck*)

A laje com forma de aço incorporada é composta por uma forma de aço galvanizado e uma camada de concreto. O aço, excelente material para trabalhar a tração, é utilizado no formato trapezoidal que serve como forma para concreto durante a concretagem e como armadura positiva para as cargas de serviço.

A capacidade de carga da laje com forma de aço incorporada é influenciada principalmente pela geometria da forma metálica e pela sua transferência mecânica ao cisalhamento com o concreto. Uma das primeiras tentativas de se fornecer uma transferência mecânica do cisalhamento, nos primeiros anos de desenvolvimento da laje com forma de aço incorporada, foi feita por meio de vergalhões soldados aos painéis de cobertura, como mostra a Figura 3.2a. Alternativas subsequentes para se conseguir um entrelaçamento entre a chapa metálica e o concreto utilizavam geometria mais elaborada que apresentava reentrâncias e corrugações na chapa metálica (Figuras 3.2b e 3.2c). A

forma metálica descrita na Figura 3.2c, conhecida como *steel deck* “Holorib”, geralmente apresenta uma altura de 50 mm e é amplamente usada na Europa Ocidental.

Os países da América do Norte preferiram a forma trapezoidal ilustrada nas Figuras 3.1d e 3.1e. Essas formas metálicas apresentam alturas que variam de 38 a 90 mm com espessura entre 0,76 e 1,50 mm.

Atualmente, o mecanismo mais utilizado para obter a transferência mecânica é o emprego de saliências (mossas) estampadas nas partes inclinadas e/ou planas da forma metálica. As características das mossas, tais como geometria e profundidade, influem fortemente na resistência ao cisalhamento horizontal do sistema de lajes mistas. Cada fabricante de forma desenvolve um padrão próprio, desde que comprove experimentalmente a eficiência das mesmas.

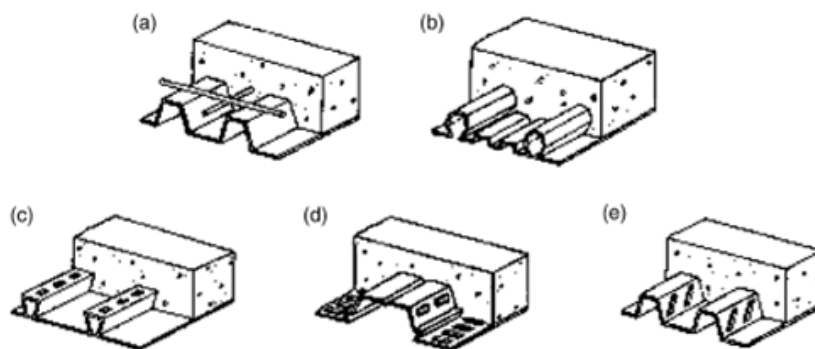


Figura 3.2 Geometria e dispositivos de transferência mecânica do cisalhamento.

Fonte: Andrade et al (2004)

Outra forma adotada para obter a transferência mecânica é aumentando a resistência do entrelaçamento entre concreto e aço nas corrugações existentes na base da chapa metálica por meio do confinamento do concreto nessa região. Figura 3.3.

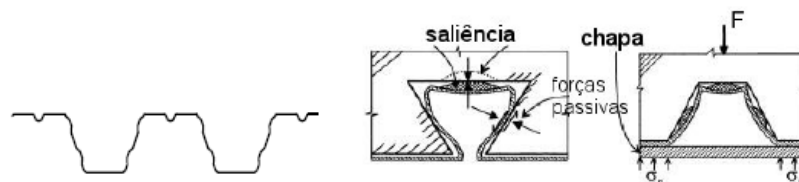


Figura 3.3 Geometria e dispositivos de transferência mecânica do cisalhamento

Fonte: De Nardin et al (2006)

As lajes com forma de aço incorporada (*steel deck*) devem considerar no caso do estado limite os seguintes modos de colapso (Figura 3.4) :

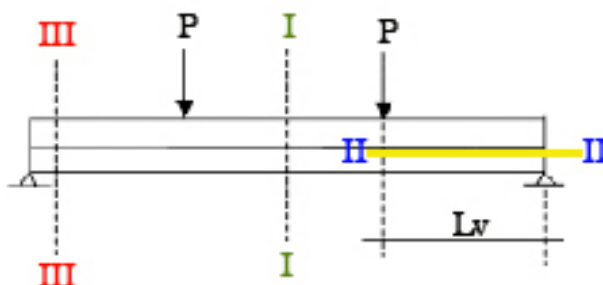


Figura 3.4 Modos de colapso no estado limite último da laje mista aço-concreto

Seção I-I corresponde à região mais exposta à flexão. É onde se faz necessária a verificação da resistência ao momento fletor, colapso por flexão Figura 3.4;

Seção II-II corresponde à seção mais exposta ao cisalhamento longitudinal. Deve-se verificar a resistência máxima ao cisalhamento longitudinal, sendo que geralmente essa é a carga máxima atuante na laje, não provocando contudo a ocorrência de momento fletor máximo. Colapso por cisalhamento longitudinal.

Seção III-III corresponde à seção mais exposta a cisalhamento vertical submetidas a cargas elevadas. Colapso por cisalhamento vertical.

O colapso por cisalhamento vertical geralmente é determinado com o auxílio de ensaios, onde se observa o comportamento linear até que as primeiras fissuras no concreto apareçam. Após esse ponto limite, a laje mista apresenta um comportamento estrutural associado às condições de transferência de cisalhamento mecânico e deslizamento. O principal padrão de fissuração é formado próximo do ponto de aplicação da carga e como consequência direta dessa fissuração ocorre um deslizamento inicial, que é ilustrado na Figura 3.5.

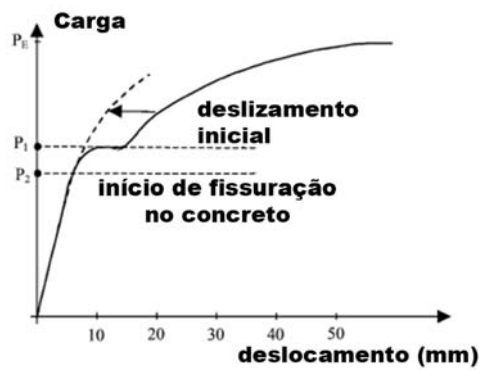


Figura 3.5 Curvas de carga *versus* deslocamento vertical para lajes mistas com *deck* metálico. Fonte: Andrade et al. (2004)

Nesse momento, outros padrões de fissuração menos significativos aparecem próximos da região de momento máximo. A resistência da laje mista fica quase que totalmente dependente da capacidade de transferência mecânica de cisalhamento propiciada pelas mossas da forma metálica. A geometria do perfil metálico tem um papel importante na resposta estrutural da laje mista, uma vez que as formas fundas tendem a ter mais entrelaçamentos flexíveis. A flexibilidade do entrelaçamento favorece a perda da capacidade de transferência mecânica do cisalhamento, uma vez que o concreto ao deslizar sobre as mossas existentes na forma metálica causa colapso estrutural devido à perda da aderência entre aço e concreto. A Figura 3.6 descreve um típico colapso por cisalhamento longitudinal onde o estado limite máximo está associado à perda de aderência mecânica.

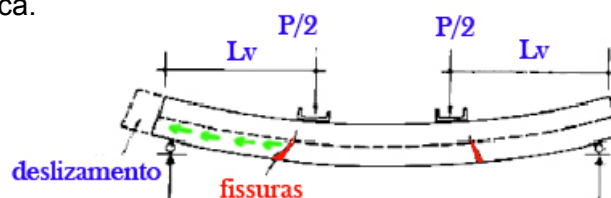


Figura 3.6 Típico colapso por cisalhamento longitudinal

Na Figura 3.7, apresenta-se uma laje *steel deck*, apoiada em vigas metálicas, com os conectores *stud bolt*, aguardando a concretagem.

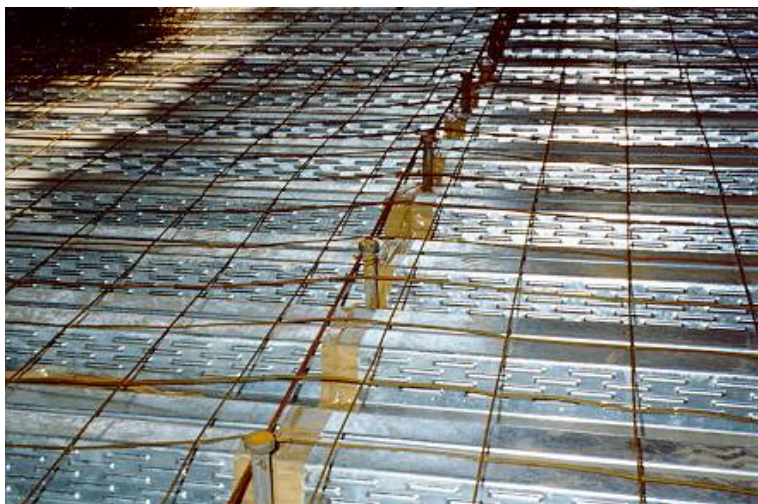


Figura 3.7 Laje mista aguardando a concretagem. (Fonte: Metform S/A)

3.3 Laje com forma de aço incorporada - Dimensionamento

O dimensionamento de lajes mistas de aço e concreto, com forma de aço incorporada, tem suas diretrizes expressas na NBR 8800:2008. Essa norma trata do projeto e dimensionamento de elementos e ligações metálicas, além de tratar do projeto e dimensionamento de elementos e ligações mistas.

Antes da elaboração da NBR 8800:2008, o dimensionamento das lajes mistas era tratado pela NBR 14323:1999 – Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio. Contudo, é possível inferir que foram feitas poucas alterações de uma para a outra.

As prescrições da norma brasileira de projeto e dimensionamento de lajes mistas referem-se a lajes mistas de aço e concreto, apoiadas na direção perpendicular à direção das nervuras da forma, e as ações são predominantemente estáticas.

Para o dimensionamento das lajes mistas de aço e concreto, com forma de aço incorporada, faz-se necessária a verificação da forma em duas condições distintas: verificação da forma antes da cura do concreto, ou seja, atuando como forma especificamente e verificação da forma quando a mesma já se encontra integrada ao concreto, enquanto armadura positiva da laje.

Antes da cura do concreto, ou seja, antes de o mesmo atingir 75% da resistência de cálculo especificada, a forma de aço deve suportar sozinha todas as ações atuantes, as ações permanentes e a sobrecarga de construção.

Quando da cura do concreto, os elementos aço e concreto passam a atuar estruturalmente juntos. Contudo, esse comportamento deve ser garantido por meio da existência de ligações mecânicas por meios de mossas nas formas trapezoidais ou ligações por atrito devido ao confinamento em formas reentrantes, ao passo que a aderência natural entre os dois materiais, aço e concreto, não deve ser considerada suficiente para garantir a transmissão de cisalhamento na interface entre eles.

3.4 Ações a serem consideradas

As ações serão consideradas diferentes nas duas etapas, isso é, antes da cura do concreto e posterior à cura do concreto. Tem-se então:

3.4.1 Ações a serem consideradas antes da cura do concreto

Na fase inicial, devem ser consideradas as ações das seguintes cargas atuantes:

- peso próprio do concreto fresco; peso próprio da forma de aço; peso próprio da armadura;
- sobrecarga de construção; sendo esse valor, tomado como sendo o mais crítico quando da comparação entre os seguintes:
 - Carga mínima de 1,0 kN/m², uniformemente distribuída
 - Carga linear de 2,2 kN/m, em direção perpendicular ao vão da laje, na posição mais desfavorável, somente para verificação do momento fletor.

- efeito de empoçamento, quando se fizer necessário, sendo que isto ocorre quando o deslocamento do centro do vão da forma, calculado considerando seu peso próprio e o peso próprio do concreto fresco ultrapassar o valor de $(L_F / 250)$, sendo L_F o vão teórico da laje na direção das nervuras. O efeito do empoçamento é considerado aumentando a espessura nominal do concreto em 70% do valor do deslocamento.

Além dessas ações, deve-se prever ainda a contribuição da sequência de concretagem a ser seguida, quando da determinação de esforços solicitantes.

3.4.2 Ações a serem consideradas depois da cura do concreto

A NBR 8000:2008 recomenda para os estados limites últimos que todas as ações a serem consideradas, depois da cura do concreto, devem ser suportadas pelo sistema misto de aço e concreto.

3.4.3 Combinações de ações

As combinações de ações devem ser dispostas de acordo com a subseção 4.7 da NBR 8800:2008. Deve-se considerar a combinação de ações durante a construção para o dimensionamento da forma de aço na fase inicial, sendo que nesse caso o peso próprio do concreto atua como ação variável.

3.5 Verificação da forma de aço antes da cura do concreto

Para verificação da forma de aço antes da cura do concreto, a NBR 8800:2008 prescreve que devem ser observadas as indicações da NBR 14762 :2001.

O dimensionamento da laje mista na etapa de construção, ou seja, antes de a mesma adquirir comportamento misto, o que ocorre quando o concreto atinge 75% da resistência à compressão especificada, deve ser feito visando a que a mesma apresente resistência satisfatória ao seu peso próprio, ao peso do concreto ainda fresco e ainda a sobrecargas de construção.

Esse dimensionamento deve ser feito conforme aquele empregado para uma seção de aço formado a frio, ao passo que somente o núcleo de aço deve ser considerado, levando-se em consideração, como exposto anteriormente, que nesse momento ainda não há comportamento misto do elemento estrutural.

Na prática, os fabricantes de formas metálicas para laje mista fornecem tabelas de dimensionamento, conforme a apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 -Tabela de cargas e vão máximos - MF-75. (Fonte: Metform S/A)

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

3.5.1 Estados limites últimos

Deve-se empregar para a verificação da forma de concreto, antes da cura do concreto, a análise global elástica na determinação dos esforços solicitantes, o que implica em não considerar a variação de rigidez, ainda que ocorra flambagem local em partes comprimidas da seção de aço. Essa consideração, de rigidez uniforme ao longo do comprimento, eleva os valores de momento junto aos apoios que são os pontos mais solicitados, atuando, portanto, a favor da segurança.

Para o dimensionamento da forma nessa fase, pode-se fazer necessária a desconsideração de parte da seção no cálculo da resistência à flexão da mesma em virtude da disposição e geometria das mossas presentes que podem evitar que as tensões longitudinais máximas se desenvolvam completamente.

3.5.2 Estados limites de serviço

Como estado limite de serviço, deve-se verificar o deslocamento máximo da forma de aço. Para essa verificação, devem ser considerados: o peso próprio da forma e o peso próprio do concreto fresco. O valor observado deve ser inferior ao menor valor entre:

- $L \text{ (mm)} / 180$
- 20 mm

Onde L corresponde ao vão teórico na direção das nervuras.

3.6 Verificação da laje mista depois da cura do concreto

Nesta verificação considera-se que o concreto já tenha atingido uma resistência à compressão maior ou igual à 75% do f_{ck} de projeto. O comportamento misto aço-concreto passa a acontecer, logo que a forma de aço e o concreto combinados formem uma estrutura única. A forma de aço absorve e transmite o cisalhamento longitudinal existente na interface aço-concreto. A integridade do sistema é garantida por meio das mossas (saliências) presentes nas almas da forma de aço que fornecem um travamento mecânico entre a forma e o concreto. Garantindo-se este travamento, não há escorregamento por cisalhamento longitudinal entre a forma de aço e o concreto. A laje comporta-se como um elemento misto, com a forma de aço resistindo às tensões de tração e a parte superior do concreto resistindo às tensões de compressão.

3.6.1 Estados limites últimos

O estado limite último refere-se ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação do uso da estrutura, a laje mista deve ser dimensionada de forma a suportar as ações consideradas em projeto sem, contudo, atingir qualquer estado limite último.

Os estados limites últimos a serem verificados nas lajes com forma de aço incorporadas correspondem a:

- Resistência ao Momento fletor;
- Resistência ao Cisalhamento Longitudinal;
- Resistência ao Cisalhamento Vertical;
- Resistência à Punção. A punção por sua vez ocorre com maior frequência em regiões de cargas pontuais aplicadas.

3.6.1.1 Resistência ao momento fletor

Para a determinação do momento fletor positivo resistente de cálculo, deve-se considerar a forma de aço resistindo aos esforços de tração, caso seja necessária a inclusão de uma armadura adicional, as duas devem resistir em conjunto. A posição dessa armadura adicional deve ser na face inferior da laje. Para a determinação do momento fletor

negativo resistente de cálculo sobre os apoios em lajes contínuas, a forma de aço terá sua contribuição aos esforços de compressão caso a forma seja contínua ou quando está devidamente ancorada na mesa superior da viga, a partir da utilização de conectores tipo pino com cabeça.

Quando não existem armaduras adicionais, o momento fletor positivo resistente de cálculo pode ser calculado pelas expressões a seguir (Figura 3.8):

Momento Positivo quando a linha neutra passa acima da forma metálica:

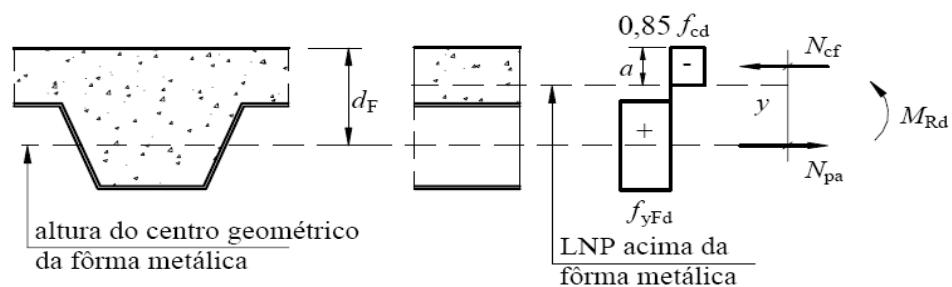


Figura 3.8 – Momento fletor resistente positivo com a linha neutra plástica acima da forma metálica. (Fonte: NBR 8800:2008)

$$N_{PA} = A_{F,ef} \times f_{yFd}$$

$$N_{cf} = 0,85 \times b \times t_c \times f_{cd}$$

$$M_{Rd} = N_{PA} \times (d_F - 0,5 \times a)$$

$$a = \frac{N_{PA}}{0,85 \times f_{cd} \times b}$$

$A_{F,ef}$: área da seção efetiva da forma, considerando 1000 mm de extensão;

d_F : distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da forma;

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

b : é a largura unitária da laje, considerada igual a 1000 mm.

N_{cf} : Normal de compressão da mesa

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo

N_{pa} : Normal de tração da nervura

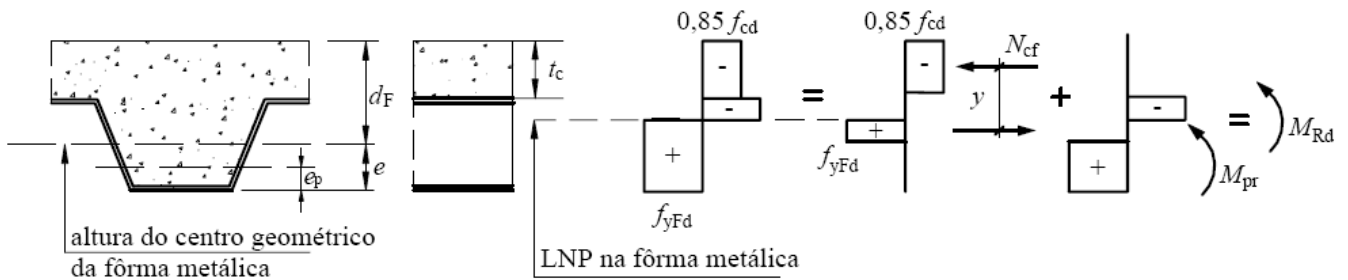
Momento Positivo quando a linha neutra passa na forma de aço (Figura 3.9):

Figura 3.9– Momento fletor resistente positivo com a linha neutra plástica acima da forma metálica. (Fonte: NBR 8800:2008)

$$y = h_t - 0,5 \times t_c - e_p + (e_p - e) \times \left(\frac{N_{cf}}{N_{PA}} \right); \text{ onde:}$$

h_t : altura total da laje (fôrma + concreto);

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

e_p : distância da linha neutra à face inferior da forma;

e : distância do centro de gravidade à face inferior da forma.

$$M_{pr} = 1,25 \times M_{pa} \times \left[1 - \frac{N_{cf}}{N_{PA}} \right] \leq M_{PA}$$

$M_{pa} = 0,9 \times$ seção efetiva da forma (geralmente é fornecida pelo fabricante)

Com o propósito de evitar a instabilidade local da forma de aço, a NBR 8800:2008 propôs que a largura plana b_F da forma de aço não ultrapasse os valores indicados:

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

$$b_F \leq \frac{2,40 \times \sqrt{\frac{E}{f_{yF}}}}{\alpha} \times t_F \quad \text{quando } \alpha < 0,5$$

Onde :

t_F : espessura da forma de aço;

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

Cabe ressaltar que a norma NBR 8800:2008 prescreve que quando houver armaduras adicionais para resistirem ao momento fletor positivo, as fórmulas apresentadas deverão ser ajustadas.

3.6.1.2 Resistência ao cisalhamento longitudinal

O método empregado para o cálculo da resistência das lajes mistas ao cisalhamento longitudinal adotado pela norma NBR 8800:2008 é o método m-k. A resistência longitudinal depende de muitos fatores como o atrito entre o aço e o concreto, reentrâncias e mossas na forma de aço e presença de conectores.

As constantes m e k são dadas em kN/mm^2 e obtidas por meio de ensaios recomendados pelo EUROCODE 4 – Part 1-1, CSSBI S2 e ANSI / ASCE 3, sendo que no caso das suas últimas normas deve-se atentar para as unidades, fazendo as correções necessárias para que se trabalhe kN/mm^2 .

Esse ensaio consiste em uma laje mista biapoiada, segundo o EUROCODE 4:1994, onde são feitos os ensaios em no mínimo seis modelos, o que determina os valores dos coeficientes m e k, esses coeficientes são tabelados pelo fabricantes de formas metálicas. A partir desses testes, é possível a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal. Essas cargas são aplicadas com um macaco hidráulico, e os deslocamentos e deformações referentes a cada incremento de carga são medidos até que se atinja o colapso. Cabe ressaltar que os protótipos utilizados são dimensionados para que o colapso se dê por cisalhamento longitudinal.

Esse tipo de colapso é caracterizado pelo aparecimento de uma fissura maior sobre as linhas de carga, bem como pelo deslizamento relativo entre a forma e o concreto.

$$V_{\ell,Rd} = \frac{b \times d_F \left[\left(\frac{m \times A_{F,ef}}{b \times L_S} \right) + k \right]}{\gamma_{S\ell}}$$

$V_{\ell,Rd}$: força cortante longitudinal resistente de cálculo de lajes com forma de aço incorporada;

b : largura unitária da laje, igual a 1000 mm;

d_F : distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da forma (mm);

m e k : constantes empíricas, obtidas por meio de ensaios, ou fornecidas nos catálogos do fabricante de formas de aço;

L_S : vão de cisalhamento (mm) deve ser tomado como:

- L_S é igual à distância entre o ponto de aplicação da carga e do apoio mais próximo, quando da ocorrência da aplicação de duas cargas concentradas simétricas;
- $L_S = L / 4$ para cargas uniformemente distribuídas;

Quando a laje mista é projetada como sendo contínua, permite-se que seja empregado o valor de um vão simplesmente apoiado com comprimento igual a 0,8 vez o vão real para vãos internos e 0,9 vez para vãos de extremidade.

O EUROCODE 4:1994 permite ainda que seja utilizado como vão de cisalhamento o valor referente à divisão do momento máximo pela maior reação de apoio.

A utilização de conectores nos extremos do vão ou deformações nas nervuras pode aumentar a resistência ao cisalhamento (Figura 3.10).

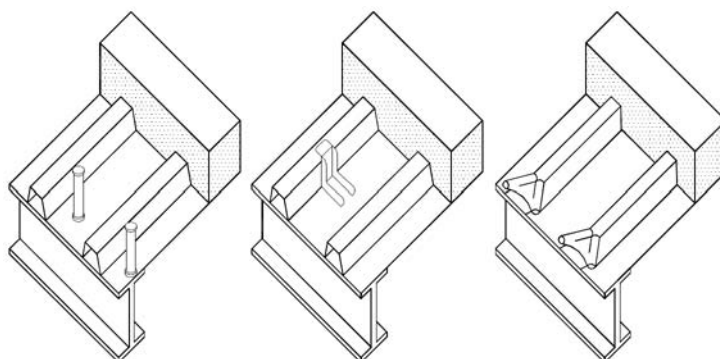


Figura 3.10 – Aumento da resistência por meio de conectores ou deformação nas extremidades. Fonte: Fabrizzi. (2007)

O EUROCODE 4:1994 propõe ainda um outro método para o cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal em sistemas com o comportamento dúctil. O comportamento dúctil em lajes ocorre quando a carga final alcançada pelo sistema é maior que 1,1 da carga referente ao escorregamento de 0,5 mm entre o aço e o concreto. O método para o dimensionamento de lajes mistas nessa situação é o denominado **Sistema de interação parcial**. Esse processo assemelha-se ao empregado no cálculo de vigas mistas, diferenciando-se apenas no modo de cálculo da transmissão de cisalhamento na interface aço-concreto.

- vigas mistas: a transmissão do cisalhamento na interface aço-concreto é calculada por processos analíticos, considerando a resistência dos conectores tipo pino com cabeça;

- lajes mistas: considera a capacidade de resistência das mossas, determinada por meio de ensaios, na transmissão do cisalhamento.

O método de interação parcial consiste basicamente na determinação de um momento resistente, sendo que, em nenhum ponto do sistema o momento de cálculo pode superar o valor encontrado para o momento resistente.

$$M_n = (N_C \times y) + M_{pr}$$

$$M_C = (\tau_{uRd} \times b \times L_x) + (\mu \times R) \leq N_{Cf}$$

Onde:

L_x : distância do ponto onde se quer calcular a resistência ao apoio mais próximo;

μ : coeficiente de atrito. Considerar $\mu = 0,5$;

R : reação de apoio;

τ_{uRd} : tensão resistente de cálculo ao cisalhamento longitudinal; tem seu valor calculado a partir de ensaios. O procedimento de cálculo de τ_{uRd} pode ser sintetizado pelas seguintes etapas:

- calcula-se um momento resistente, a partir da expressão exposta anteriormente $M_n = (N_C \times y) + M_{pr}$ para cada um dos protótipos. Contudo nesse momento, o valor de N_C é tomado por $N_C = \eta \times N_{Cf}$; onde η corresponde ao grau de interação da laje mista.

- o grau de interação da laje mista (η) é calculado a partir dos valores normalizados da capacidade de carga de cada um dos protótipos. Essa normalização é feita dividindo o valor da capacidade de carga de cada protótipo por um valor correspondente à máxima capacidade e que por sua vez é determinado a partir da suposição de interação total.

- a partir daí, calcula-se o valor de τ_u para cada protótipo a partir da expressão:

$$\tau_u = \frac{\eta \times N_{Cf}}{b \times (L_s \times L + L_c)}, \text{ sendo } L_c \text{ o comprimento do balanço da laje estudada.}$$

- o menor valor de τ_u encontrado será tomado como valor de resistência característica $\tau_{u,Rk}$, sendo ainda reduzido em 10%. Assim dividindo $\tau_{u,Rk}$ pelo coeficiente de resistência 1,25 obtemos $\tau_{u,Rd}$.

Nesse método, existe ainda uma formulação para consideração das armaduras adicionais no auxílio à resistência do momento positivo, bem como para a consideração dos conectores de cisalhamento nas extremidades dos vãos das formas.

Consideração das armaduras adicionais:

Para a consideração da armadura adicional, adicionamos a parcela $N_{ps} y'$ à expressão empregada para o cálculo do momento, exposta anteriormente. Assim, obtemos:

$$M_n = (N_c \times y) + M_{pr} + N_{ps} \times y'$$

$$y' = a' - 0,5 \times a$$

$$N_{ps} = \frac{A_s \times f_{ys}}{1,15}$$

Consideração dos conectores de cisalhamento:

A consideração dos conectores de cisalhamento nas extremidades dos vãos das formas, utilizados pelas vigas mistas que são o suporte da laje, é feita alterando-se o cálculo de N_c :

$$N_c = (\tau_{uRd} \times b \times L_x) + (\mu \times R) + V_{ld} \leq N_{cf}$$

V_{ld} : resistência ao cisalhamento dos conectores, obtida a partir da seguinte expressão:

$$V_{ld} = k_\phi \times d \times t_p \times f_{yp};$$

d : diâmetro do conector;

t_p : espessura da chapa da forma;

f_{yp} : tensão de escoamento do aço da forma;

$$k_\phi = 1 + \left(\frac{a}{d} \right) \leq 4, \text{ onde } a > 2d = \text{distância do centro do conector à borda da forma.}$$

3.6.1.3 Resistência ao cisalhamento vertical

Determina-se a força cortante vertical resistente de cálculo para lajes mistas por trecho de 1000 mm a partir da expressão:

$$V_{V,Rd} = V_{V,F,Rd} + V_{V,C,Rd} \leq V_{MAX}; \text{ onde}$$

$V_{V,F,Rd}$: força cortante resistente de cálculo relativa à forma de aço incorporada, determinada conforme prescrições da NBR 14762:2001;

$V_{V,C,Rd}$ = força cortante resistente de cálculo relativa ao concreto, determinada a partir da seguinte expressão:

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

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

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd}, \text{ onde: } f_{ctd} = \frac{\eta \times f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

$k_v = \left(1,6 - \frac{d}{1000}\right) \geq 1,0$; quando houver armadura longitudinal de tração se estendendo a mais que $(d + \ell_{b,nec})$

$k_v = 1,0$ nos outros casos;

A_v : área resistente do concreto (Figura 3.11);

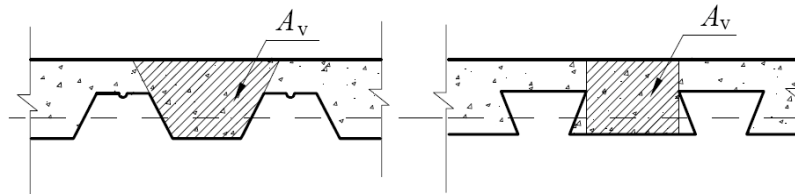


Figura 3.11 – Área A_v .(Fonte: NBR 8800:2008)

A_s : armadura longitudinal de tração referente à área A_v ;

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

b_n : largura entre duas nervuras consecutivas

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

3.6.1.4 Resistência à punção

A ruína por punção ocorre em casos de lajes pouco espessas e próximas a forças concentradas ou a pequenas áreas carregadas. Essa forma de ruína se caracteriza pelo

deslocamento vertical da laje ao longo de uma superfície troncocônica, cujas geratrizes possuem inclinação de aproximadamente 45° em relação ao plano médio da laje. A verificação é feita de maneira análoga à de lajes maciças de concreto.

A resistência de uma laje mista à punção (Figura 3.14) provocada por uma carga concentrada pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$V_{p,Rd} = u_{cr} \times d_1 \times \tau_{Rd}$$

u_{cr} : Perímetro crítico

$$d_1 = \frac{(d_F + t_c)}{2}$$

$$\tau_{Rd} = 0,13 \times k_p (100\rho \times f_{ck})^{\frac{1}{3}} > 0,3f_{ctd};$$

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

$$\rho = (\rho_F + \rho_S)^{\frac{1}{2}} \leq 0,02$$

Definem-se, ainda, os seguintes parâmetros:

d_F : distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da forma;

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

ρ_F e ρ_S : taxas de armadura longitudinal e transversal, calculadas por:

$$\rho_F = \frac{A_F + A_{Sl}}{d_F(b_p + 2h_r + 3d_F)}$$

$$\rho_S = \frac{A_{St}}{t_c(b_1 + 2h_r + 3d_F)}$$

Sendo:

A_F : área da seção da forma referente a $(b_p+2h_r+3d_F)$;

A_{Sl} : área da armadura longitudinal referente a $(b_p+2h_r+3d_F)$;

A_{St} : área da armadura transversal referente a $(b_p+2h_r+3d_F)$;

h_r : altura do revestimento da laje, caso exista o mesmo;

b_1 e b_p : determinar conforme figura abaixo.

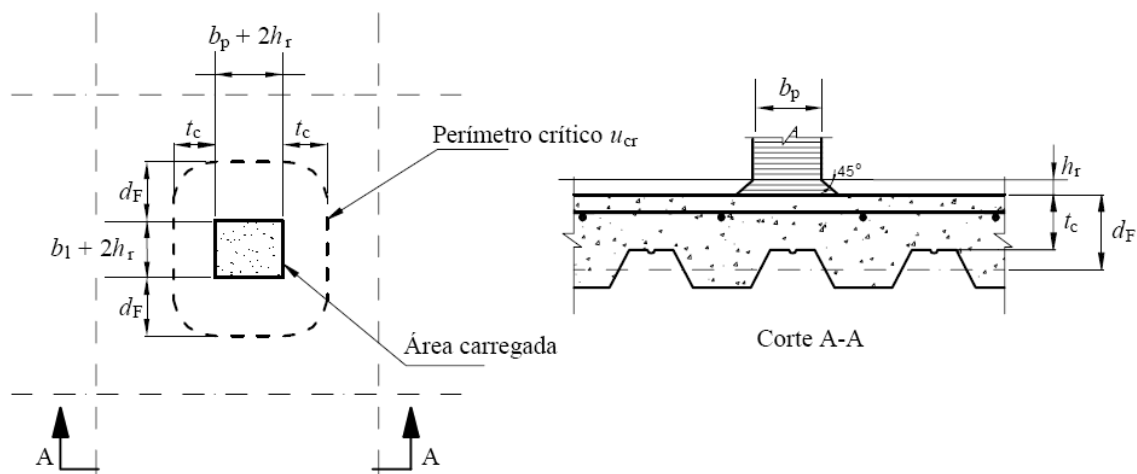


Figura 3.12 – Perímetro crítico para punção. (Fonte: NBR 8800:2008)

3.6.2 Estados limites de serviço:

As lajes mistas devem ser dimensionadas prevendo a sua resistência aos estados limites de serviço que correspondem à impossibilidade do uso normal da estrutura, que no caso, referem-se à verificação quanto à fissuração do concreto e quanto ao deslocamento vertical.

3.6.2.1 Fissuração do concreto

Este estado limite é verificado para o concreto existente em regiões de momento negativo, pois, na região do momento positivo, parte inferior da laje, temos a proteção da forma de aço. São empregadas as prescrições da NBR 6118:2003 nos casos de concreto de densidade normal. Quando o concreto não estiver nessas condições ou quando houver qualquer outra situação não contemplada pela norma brasileira, devem-se seguir as determinações do EUROCODE – 2 Part 1-1.

Em lajes simplesmente apoiadas, devem ser previstas armaduras responsáveis pela prevenção dos efeitos de retração e de temperatura.

Devem ser previstas armaduras com área superior a 10% da área de concreto acima da face superior, a ser colocada 20 mm abaixo do topo da laje. É interessante também que seja dada atenção especial aos locais onde há tendência de continuidade de elementos

estruturais, como por exemplo nas ligações de vigas secundárias e vigas principais e nas regiões de pilares, ao passo que são regiões sempre sujeitas à fissuração.

3.6.2.2 Deslocamento vertical

A verificação das lajes mistas no que tange ao deslocamento vertical, segundo a NBR 8800, consiste em garantir que o mesmo não ultrapassará o valor de $L_F / 350$ quando considerados apenas os efeitos das ações variáveis e sendo L_F o vão teórico das lajes no sentido de suas nervuras.

3.7 Laje com forma de aço incorporada e EPS

Atualmente uma das lajes que tem se destacado no Brasil em edifícios baixos e residências são as lajes pré-moldadas, onde se utilizam trilhos de concreto e lajota cerâmica ou de EPS, baseado nesse conceito e buscando melhorar sua resposta estrutural aos vãos livres mais longos, foi concebida uma laje mista feita de uma parte de aço e uma chapa de poliestireno extruído disposta lado a lado e com preenchimento de concreto (veja Figuras 3.13 e 3.14).

A seção de aço é responsável por fornecer a resistência necessária para o sistema de laje, excluindo-se, assim, a necessidade de escoramento temporário durante a fase de construção. Quando a ação mista é desenvolvida, a parte de aço sustenta o principal componente de tensão, enquanto a cobertura de concreto funciona principalmente na compressão. Para minimizar as fissuras na laje, uma malha de aço soldada é recomendada à meia altura da laje .

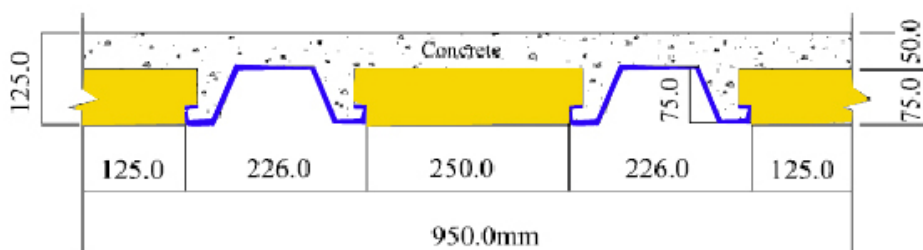


Figura 3.13 Sistema de laje mista idealizada . Fonte: Andrade et al. (2004)

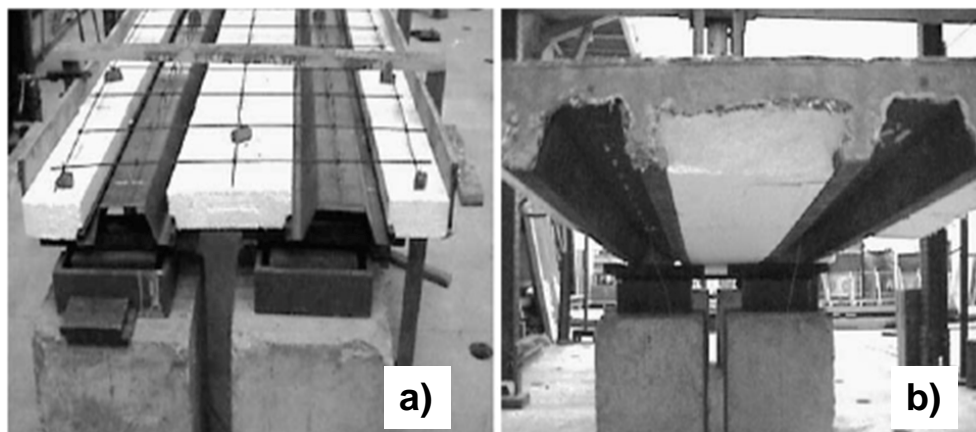


Figura 3.14 – Sistema de laje mista idealizado. Fonte: Andrade et al (2004)

Nas Figuras 3.14a e 3.14b, apresenta-se sistema de laje mista idealizada – fotos de ensaio feito na PUC.

As vantagens desse sistema de laje são a exclusão do escoramento e a rapidez de montagem, porém esse sistema de laje torna-se inviável devido ao fato de não existir no mercado perfis dobrados conforme especificado. Outra desvantagem acontece quando é necessário rebocar a parte inferior, sendo necessária a colocação de forro suspenso.

3.8 Sistema de construção mista com laje e viga mestra

O sistema de construção mista com laje e viga mestra foi desenvolvido pela empresa Girder-Slab Technologies, empresa de Cherry Hill, em New Jersey, com Peter A. Naccarato, vice-presidente da O'Donnell & Naccarato, na Filadélfia, com soluções criativas, utilizando laje alveolar com vigas metálicas.

O modelo misto com aço e concreto pré-moldado é o primeiro a usar lajes alveolares pré-moldadas de vãos longos com viga de aço para formar uma construção de laje estrutural monolítica.

Uma viga na forma de “T” invertido (fabricada a partir de uma seção com aba mais larga) usada como viga mestra interna sustenta a laje em sua aba inferior. A viga, ocultada dentro do plano da laje, exhibe apenas sua aba inferior e produz uma superfície estrutural plana similar à laje maciça de concreto. A eliminação de vigas convencionais de aço abaixo da laje, fornecendo apoio a partir da aba superior, permite alturas mínimas entre os andares.

A construção mista segue os requisitos de classificação contra incêndio do Código Internacional de Construção, pois é executada conforme Projeto de Montagem Piso-Teto,

UL K912, da Underwriters Laboratories Inc. A tecnologia utilizando viga mestra em aço e laje em concreto oferece uma superestrutura de concreto e aço como alternativa à laje maciça, que é moldada no local, utilizando-se formas, escoramento e montagem de armações. Em contrapartida, a tecnologia da Girder-Slab Technologies emprega o uso de componentes pré-fabricados que são montados no local, num tempo mais curto que as lajes maciças.

3.8.1 Tecnologia de construção com viga mestra e laje

A Girder-Slab Technologies desenvolveu um sistema estrutural eficiente para o mercado de construção de residências de classe média e alta, voltado mais especificamente para apartamentos, condomínios, hotéis, dormitórios universitários e outros prédios residenciais com múltiplos pavimentos.

Em oposição ao projeto com aço convencional, que utiliza perfis metálicos para vencer grandes vãos, principalmente em aplicações comerciais, a Girder-Slab Technologies escolheu aquilo que alguns considerariam ser uma abordagem ortodoxa para se encontrar uma solução. Inicialmente perceberam que as lajes pré-moldadas, comuns na construção de prédios residenciais, quando combinadas com uma estrutura em aço, ofereceriam grande flexibilidade e economia, pois os vãos para as vigas mestras, neste tipo de construção, são relativamente curtos; tornando-se apropriados para este tipo de estrutura. Embora os *layouts* dos projetos de apartamentos residenciais variem internamente, os esforços são avaliados e absorvidos pelo modelo estrutural adotado, considerando lajes, vigas e pilares. A solução da Girder-Slab Technologies era obter uma viga mestra padronizada que fosse utilizada exclusivamente para esses tipos de edificações.

Assim, a tecnologia com viga mestra e laje da Girder-Slab Technologies foi desenvolvida especificamente para satisfazer as exigências da construção residencial. O componente do piso primário envolve uma laje alveolar pré-moldada com 200 mm de espessura. As vigas mestras do piso envolvem vigas de aço dissimétricas (T invertido) com altura de 200 mm conhecidas como vigas “D” (Figuras 3.15 e 3.16) que ficam contidas dentro do plano do piso.



Figura 3.15 – Viga “D” assimétrica (Fonte: Sistema Girder-Slab®)

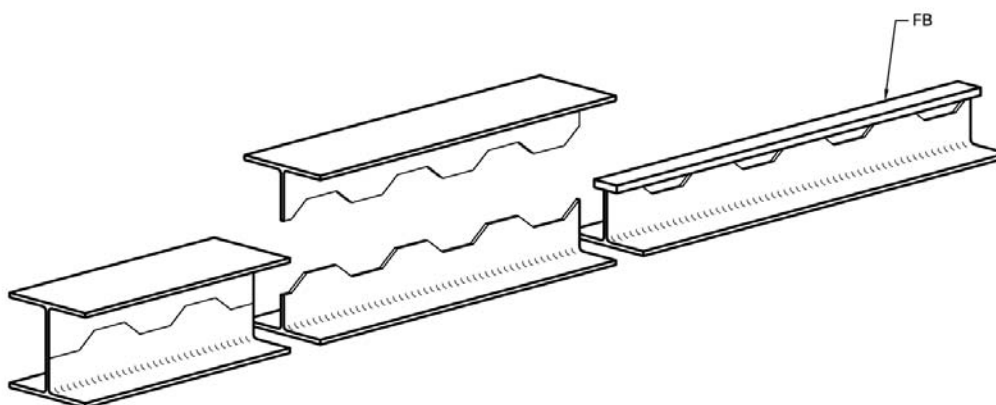


Figura 3.16 – Viga “D” assimétrica – corte da viga (Fonte: Sistema Girder-Slab®)

O Sistema Girder-Slab consiste de uma viga mestra interna (conhecida como viga dissimétrica de alma aberta ou viga D®) e lajes alveolares protendidas interligadas por concreto estrutural com pedrisco e alto “slump” e armadura de ligação para resistir aos esforços de fissuração.

A estrutura é dimensionada para resistir aos esforços, de acordo com as aplicações das lajes utilizadas, podendo ser forro ou piso. As vigas de abas largas (WF) são tipicamente usadas em arcos, hastes e outras condições.

A injeção de concreto (Figura 3.17) é efetuada após o assentamento das lajes. O concreto flui por meio das aberturas da alma da estrutura e chega à laje, desenvolvendo uma ação mista após a cura. O Sistema Girder-Slab e a tecnologia com viga D para alma aberta são o resultado de mais de dez anos de pesquisa e desenvolvimento.



Figura 3.17 – Detalhe de execução – injeção de concreto (Fonte: Sistema Girder-Slab®)

Esse sistema favorece a velocidade da obra, permitindo a realização de outros trabalhos dentro da edificação mais rapidamente. As lajes são de fácil colocação e o ajustamento final, com o concreto, é facilmente efetuado com pouca mão de obra. O concreto possui alto “slump” e pode ser bombeado por intermédio de uma mangueira. O concreto deve ser vibrado, a fim de preencher os espaços vazios da laje. Diferentemente das estruturas de concreto moldadas *in loco*, o Sistema Girder-Slab é montado quase que simultaneamente com a estrutura: pilares e vigas (Figura 3.18).



Figura 3.18 – Detalhe do pilar e Viga “D” simétrica (Fonte: Sistema Girder-Slab®)

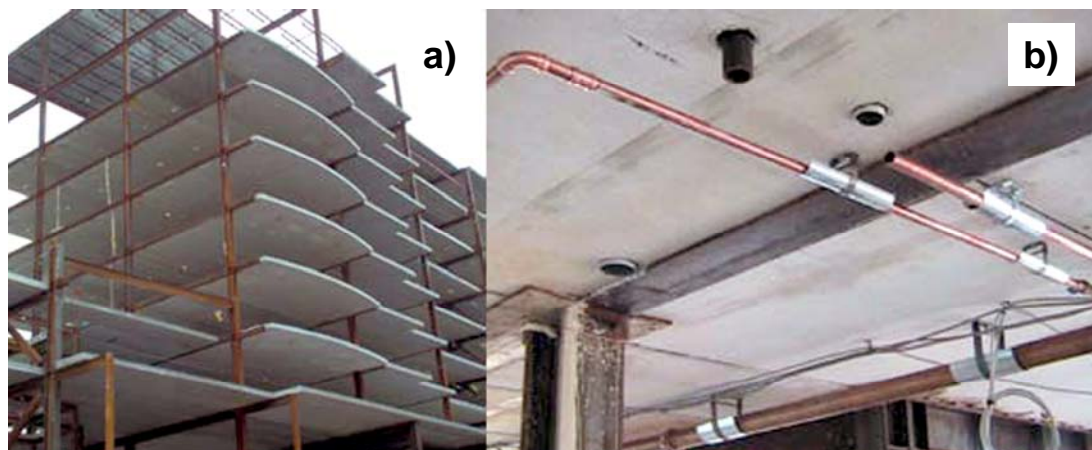


Figura 3.19 – Laje livre (Fonte: Sistema Girder-Slab®)

Na Figura 3.19a mostra uma vista da estrutura com laje livre, na Figura 3.19b nota-se a facilidade para execução do projetos complementares

A inovadora viga D foi projetada para permitir que a laje pré-moldada tenha sua aba superior e sua alma ocultadas. O lado inferior da laje fica livre de vigas de sustentação, propiciando uma superfície lisa para sistemas de dutos e tubulação (Figura 3.19).

Os benefícios do Sistema Girder-Slab® :

- Alturas baixas entre andares, minimizando a altura da edificação.
- Aumento de velocidade na execução da estrutura.
- Lado inferior da laje fica pronto para o acabamento do forro.
- Estrutura da edificação com peso reduzido.
- Flexibilidade no projeto do piso.
- Montagem da estrutura envolve um único processo.
- Integração dos espaços.
- Satisfaz as normas de tolerância do AISC.
- Satisfaz as normas no combate a incêndio.
- Redução de mão de obra.
- Custos reduzidos com despesas gerais.
- Componentes de fábrica feitos com qualidade.

Outros sistemas similares estão sendo desenvolvidos, utilizando-se perfis metálicos como, por exemplo, o Sistema IFB Integrated Flor Beam, desenvolvido por ARBED, que corresponde ao atual Grupo Arcelor, no qual as vigas IFB (Integrated Floor Beam) são constituídas por uma placa de aço soldada à alma da metade de um perfil I, laminado, formando assim uma seção assimétrica. A Figura 3.20 ilustra a viga IFB.

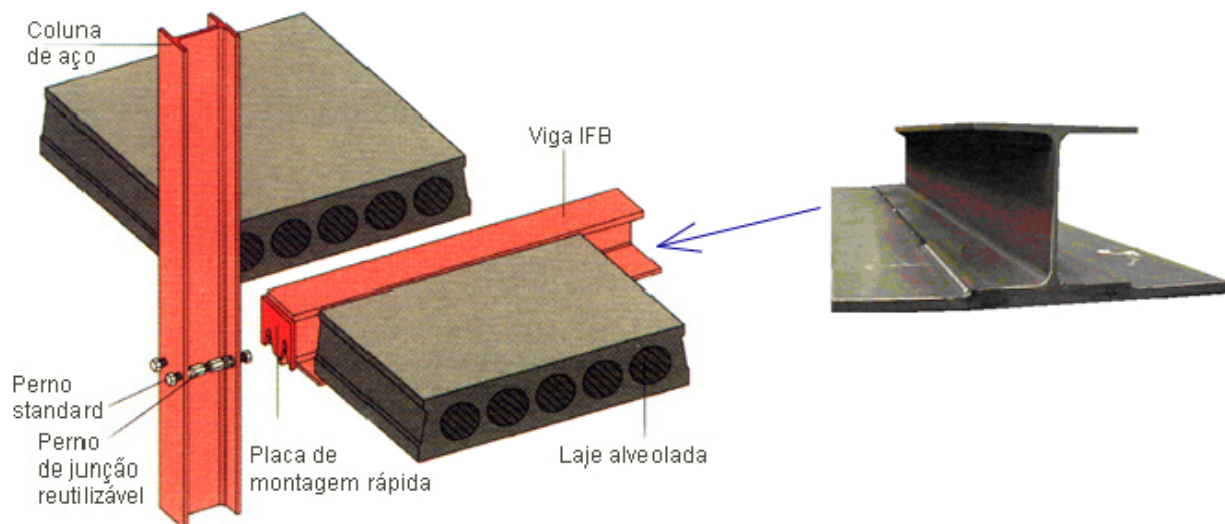


Figura 3.20 – Viga tipo IFB (Fonte: Arcelor Mittal)

As lajes apoiam-se sobre a mesa inferior formada por essa placa de aço. O espaço entre a laje e a alma da viga é preenchido com concreto. Pode-se empregar a utilização de lajes alveolares ou pré-lajes, obtendo-se assim um teto liso e sem interferências.

Nesse capítulo abordaram-se os tipos de laje para estrutura metálica que utilizam novas tecnologias e processos industrializados, tornando-se um diferencial para construções imobiliárias onde a antecipação da ocupação do imóvel é prioridade. Com o maior número de sistemas industrializados na construção, há a diminuição do prazo de execução, permitindo o rápido atendimento às condições de mercado e minimizando os riscos do empreendimento.

4 METODOLOGIA

A fim de atingir os objetivos propostos, as atividades foram divididas em:

Revisão bibliográfica: realizada com o objetivo de compreender e levantar dados existentes do comportamento de diversos tipos de pavimentos para estruturas metálicas, analisando o processo de cálculo e o processo de execução. Em função da revisão bibliográfica, foram escolhidos cinco tipos de laje para estudo comparativo. São elas: laje maciça, laje pré-moldada, laje nervurada, laje alveolar, laje mista com forma de aço incorporada (*steel deck*) com escoramento e laje com forma de aço incorporada com EPS.

Simulação numérica: para analisar e projetar as estruturas, serão utilizadas as seguintes ferramentas: software CAD-TQS (estrutura de concreto, avaliação estrutural), Mathcad (para preparação de planilhas de dimensionamento de elementos de aço) e Excel para levantamento quantitativo e orçamentário.

Os elementos de aço e misto de aço e concreto serão dimensionados segundo a NBR 8800:2008. As lajes em concreto e pré-moldadas serão dimensionadas segundo a NBR 6118:2003.

Estudo comparativo e análise de resultados: a partir de um edifício-exemplo, foram concebidas diversas opções para o projeto estrutural, entre as quais: estrutura convencional com laje maciça, laje pré-moldada, laje nervurada, laje alveolar, laje mista tipo *steel deck*. Cada alternativa foi analisada e dimensionada, considerando lajes, vigas, pilares, levando-se em conta todas as ações atuantes, menos a do vento que será suportada por um núcleo rígido de concreto.

Foram abordados fatores econômicos em função dos consumos de cada sistema de laje, o custo será composto considerando-se: mão de obra, material, tempo de execução e recursos necessários à execução. Pretende-se elaborar uma comparação de quantitativos e de custos, para servir de referência aos projetistas, ao elaborar um anteprojeto. Com base nas análises e estudos comparativos desenvolvidos neste item, serão elaboradas as conclusões possíveis e pertinentes ao assunto em questão.

O conhecimento do custo é, sem dúvida, um fator importante para a tomada de decisão na escolha do tipo de laje a ser adotada em um empreendimento.

Existem diversas formas e métodos para a determinação do custo total ou preço total estimado de uma obra.

Adotaremos o orçamento expedito, realizando-se composições genéricas para a obtenção dos preços unitários dos serviços, índices de consumo de materiais e mão de

obra, baseados na TCPO-12 Tabela de composições de preços para orçamento da Editora Pini. Esta comparação permitirá uma tomada de decisão com relação ao custo.

Foram consideradas para análise do custo apenas as diferentes lajes e a sequência dos diferentes serviços que entram na composição do orçamento e que podem ocorrer em função da escolha do tipo de laje adotada.

O objetivo é sistematizar o roteiro para a execução do orçamento, de modo a não omitir nenhum serviço necessário à execução da laje. Após análise da forma e levantamento quantitativo, realizou-se a composição dos custos unitários de cada serviço especificado. Cada serviço é diferenciado por meio das composições de serviços, compondo seus insumos: natureza, quantidade, unidade e preço unitário, permitindo obter o custo de serviço.

Não foi incluído no custo de cada serviço o BDI (Benefício e Despesas Indiretas).

A metodologia proposta foi inicialmente avaliada em um estudo de caso simplificado aqui denominado de caso 1. O estudo de caso é constituído por um trecho de pavimento que foi dimensionado e levantados os custos para diferentes soluções de laje.

5 ESTUDO DE CASOS

Foram analisadas duas situações ou dois casos, sendo o primeiro um trecho de um pavimento mais simples denominado caso 1 que foi utilizado como teste da metodologia proposta. O caso 2 é um edifício com uma arquitetura predefinida para uso comercial onde tornam-se possíveis comparações de custos mais próximos da realidade do mercado da construção civil.

5.1 Estudo de Caso 1

Trata-se de um trecho de um pavimento (Figura 5.1) onde serão comparados os seguintes sistemas de laje:

- 1 - Lajes maciças;
- 2 - Laje pré-moldada treliçada de concreto;
- 3 - Laje *deck* metálico com EPS;
- 4 - *Steel deck*.

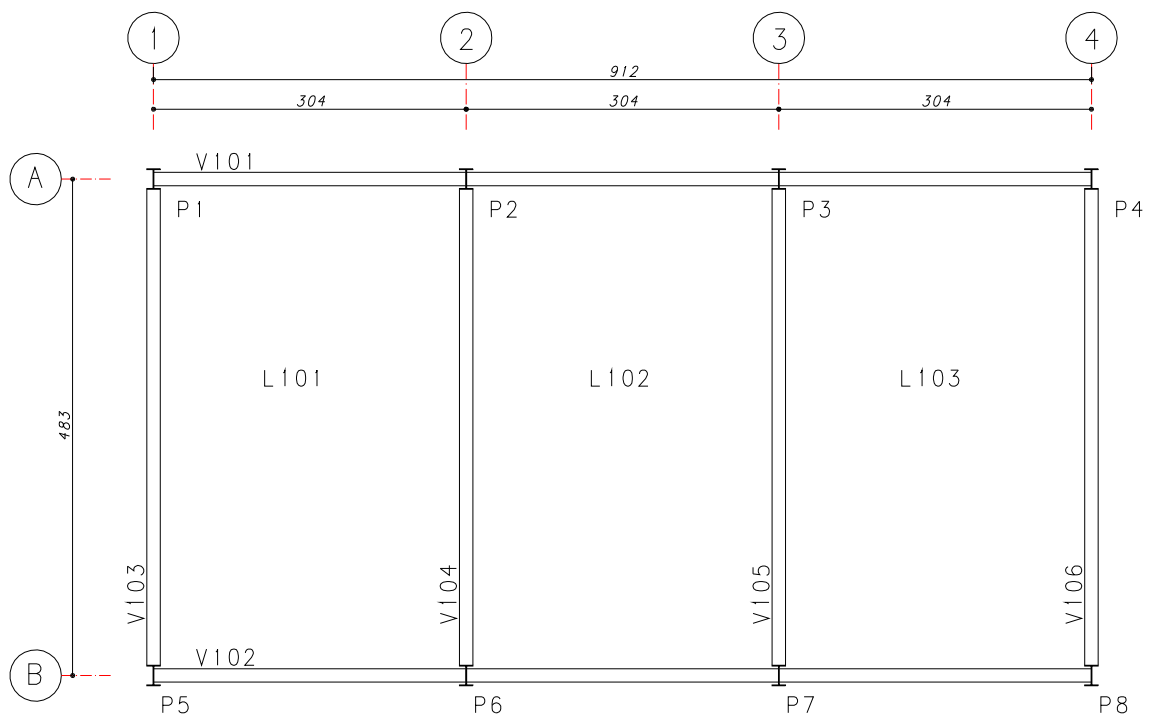


Figura 5.1 – Pavimento a ser estudado – Caso1

Neste caso será mantido o mesmo plano de vigas em aço A36 que servirá de suporte aos diversos tipos de laje.

As ações a serem utilizadas são as seguintes:

Ações permanentes : peso próprio → indicado em cada tipo de laje

$$\text{piso + revestimento} = 1,5 \text{ kN/m}^2$$

paredes: não serão consideradas paredes sobre as lajes

Ações variáveis : Sobrecarga de utilização: $2,0 \text{ kN/m}^2$

5.1.1 Estudo de Caso 1 – trecho de pavimento

Apresentam-se os resultados obtidos do trecho de um pavimento (Figura 5.2), onde foram dimensionadas as lajes para os seguintes sistemas: laje maciça, laje treliçada, laje *deck* metálico com poliestireno extruído e laje *steel deck*. Verificou-se o consumo de mão de obra e de material necessário para execução dessas lajes, baseando-se nas composições de serviços da TCPO-12 e dos preços de serviço e insumos obtidos na região de Ribeirão Preto.

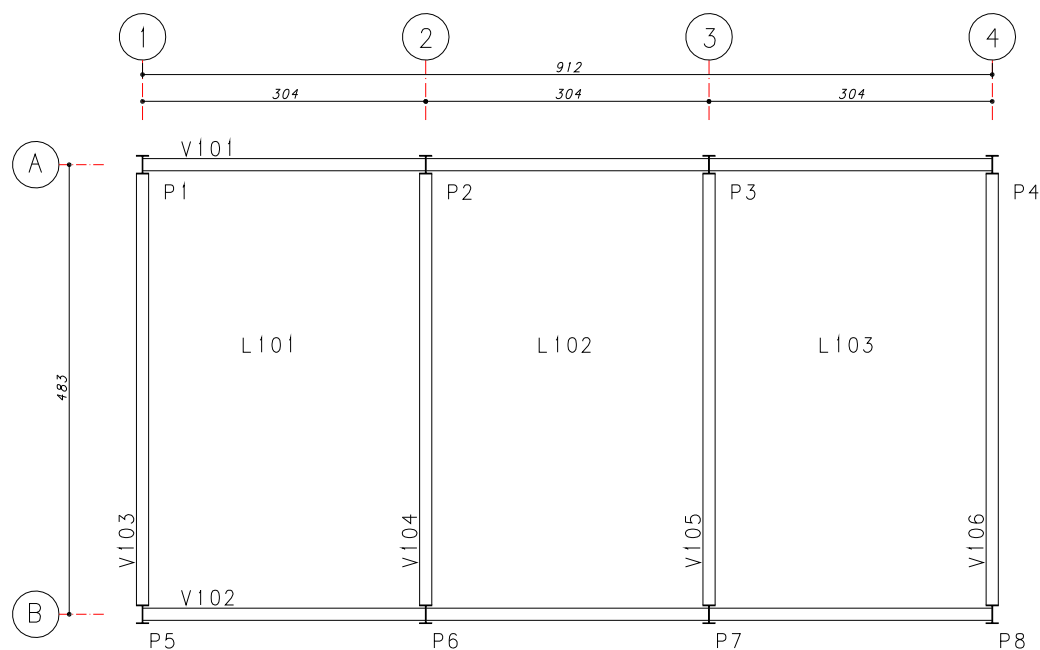


Figura 5.2 – Plano de vigas do caso 1

5.1.2 Caso 1 – Laje maciça

A resistência característica do concreto adotada para o sistema de laje maciça (Figura 5.3) foi de $f_{ck} = 25$ MPa para as lajes, para as armaduras foi adotado aço CA-50, e o cobrimento de 2 cm.

As composições de formas utilizadas para esse sistema foram basicamente em madeira com chapas resinadas com espessura igual a 12 mm. Foi considerado duas linhas de escoramento por vão de laje. Foi adotado carregamento conforme item 5.1, sendo o peso próprio para laje maciça igual a $2,5 \text{ kN/m}^2$.

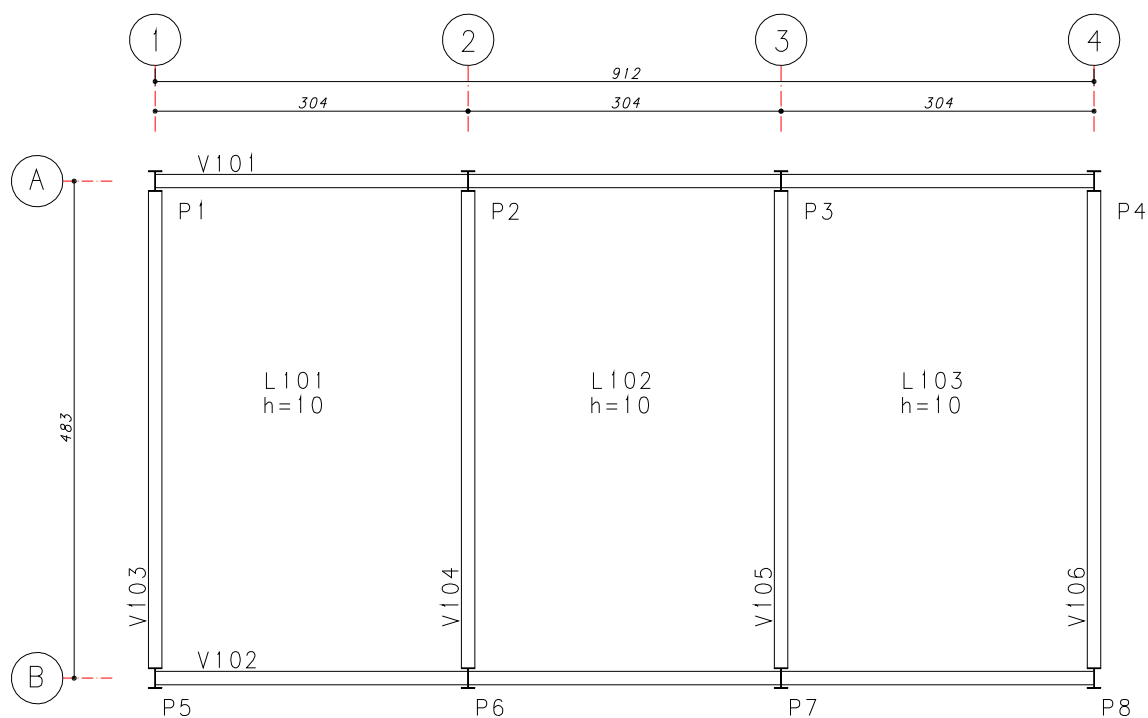


Figura 5.3 – Plano de vigas para lajes maciças

5.1.3 Caso 1 – Laje treliçada

A resistência característica do concreto adotada para o sistema de laje treliçada foi de $f_{ck} = 25$ MPa para as lajes, para as nervuras foram adotadas treliças Belgo que utilizam aço CA60, modelo TB 8L, altura da capa de concreto de 4 cm. Altura total da laje igual a 12 cm. As lajes foram consideradas unidirecionais, conforme Figura 5.4.

As composições de escoramento utilizadas para esse sistema foram de duas linhas de escoras metálicas por vão de laje.

Carregamento adotado conforme item 5.1, sendo o peso próprio para laje treliçada igual a $= 2,0 \text{ kN/m}^2$.

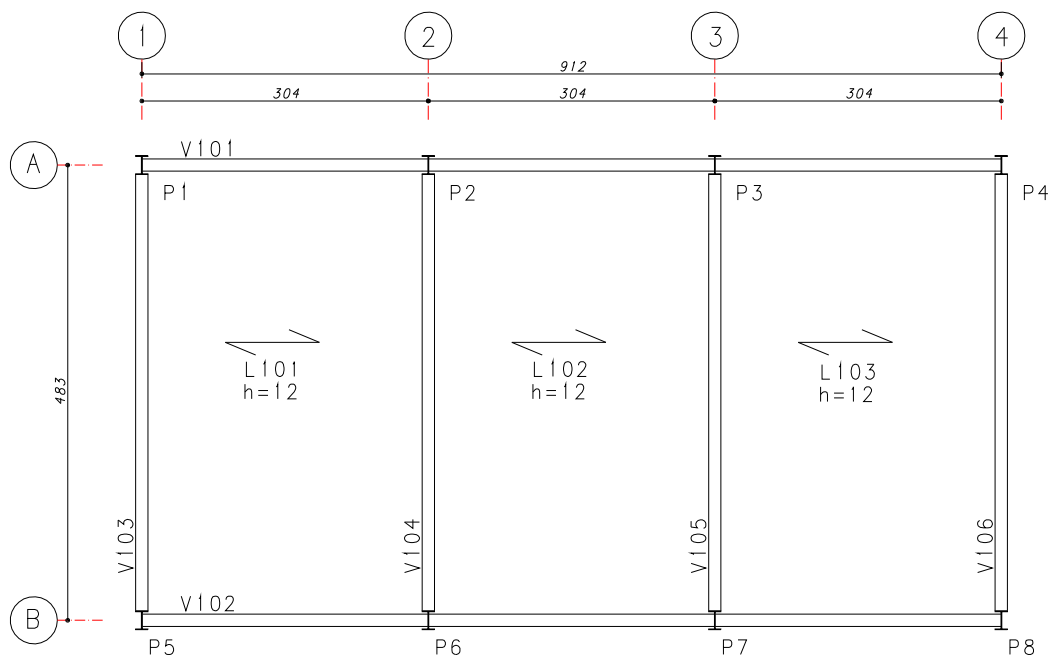


Figura 5.4 – Plano de vigas para lajes treliçadas

5.1.4 Caso 1 – Laje *deck* metálico com EPS

A resistência característica do concreto adotada para o sistema de laje com *deck* metálico (Figura 5.5) foi de $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ para as lajes. Altura total da laje igual a 10 cm. Carregamento adotado conforme item 5.1, sendo o peso próprio para laje com *deck* metálico igual a $= 1,35 \text{ kN/m}^2$. Na Figuras 5.5 à 5.7, são mostrados respectivamente a seção do perfil do *deck* metálico e o elemento de enchimento utilizado.

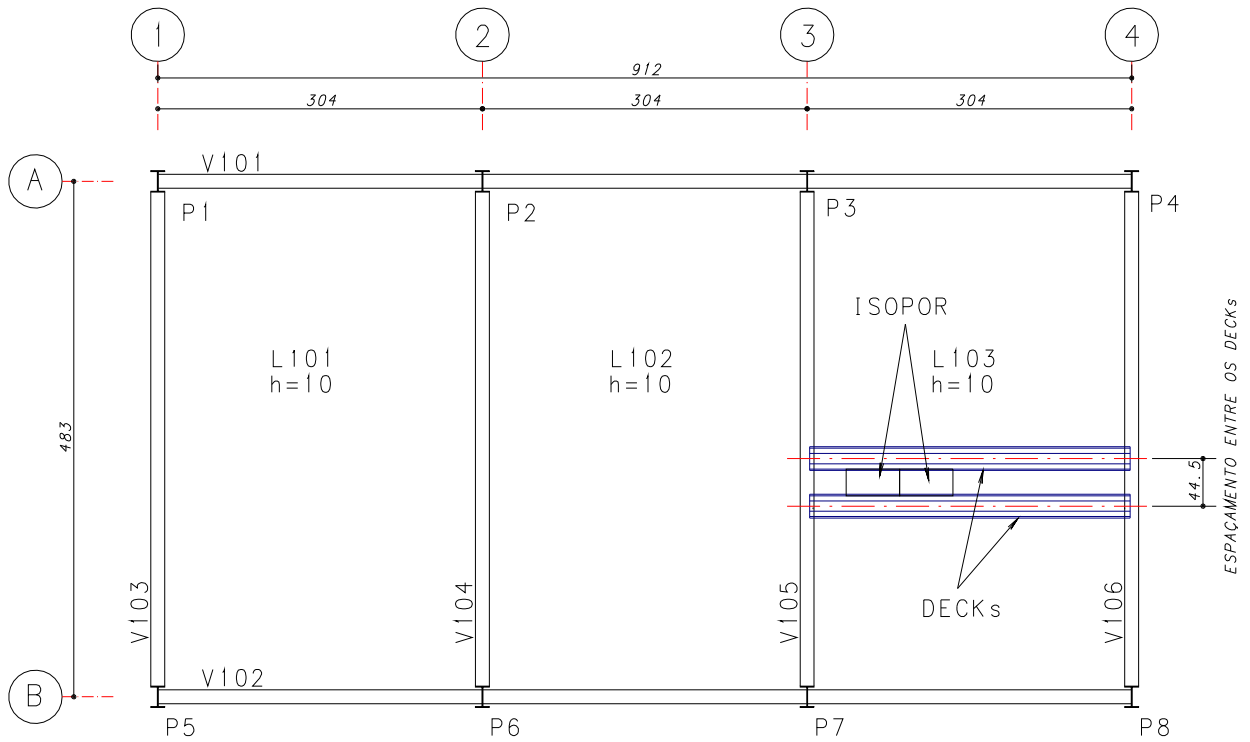


Figura 5.5 – Plano de vigas para lajes com *deck* metálico

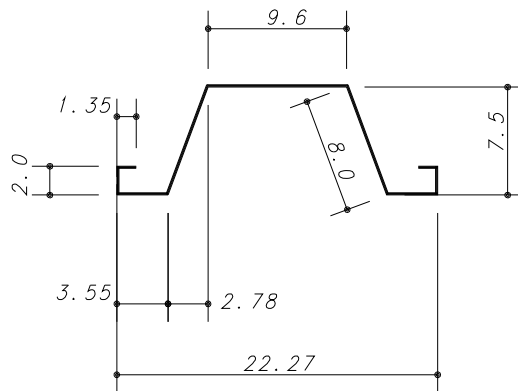


Figura 5.6 – perfil do *deck* metálico

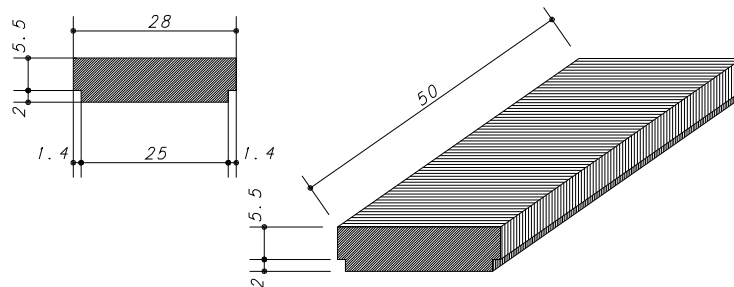


Figura 5.7 – Elemento de enchimento EPS

5.1.5 Caso 1 – Laje mista com MF-75 (*steel deck*)

A resistência característica do concreto, adotada para o sistema de laje *steel deck* (Figura 5.8), foi o concreto - C 25 para as lajes. Altura total da laje igual a 14 cm. Foi adotado laje *steel deck* sem escoramento. O carregamento foi adotado conforme o item 5.1, sendo o peso próprio da laje *steel deck* igual a $= 2,79 \text{ kN/m}^2$.

Foi utilizado para laje mista com forma de aço incorporada o *steel deck* MF-75 (Figura 5.9) da METFORM, constituído de uma forma de aço galvanizado, ASTM A 653 Grau 40 (ZAR- 280) tensão de escoamento $f_y = 280 \text{ MPa}$.

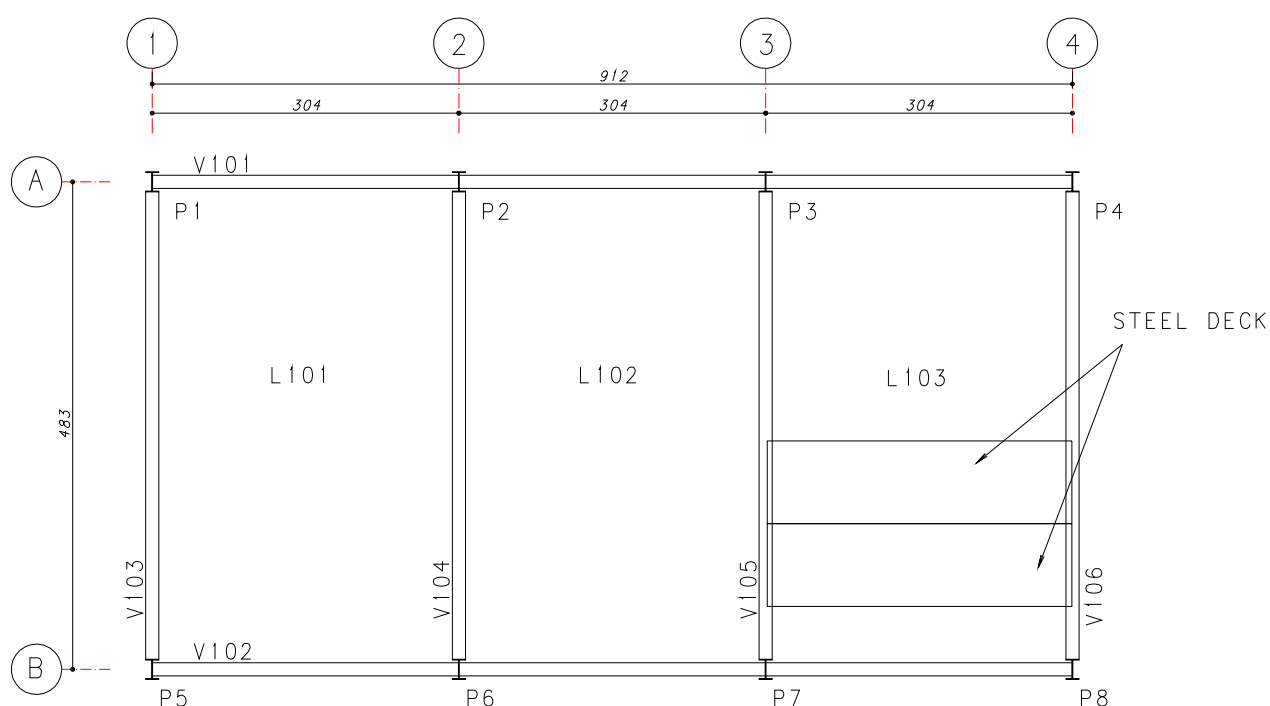


Figura 5.8 – Plano de vigas para lajes *steel deck*

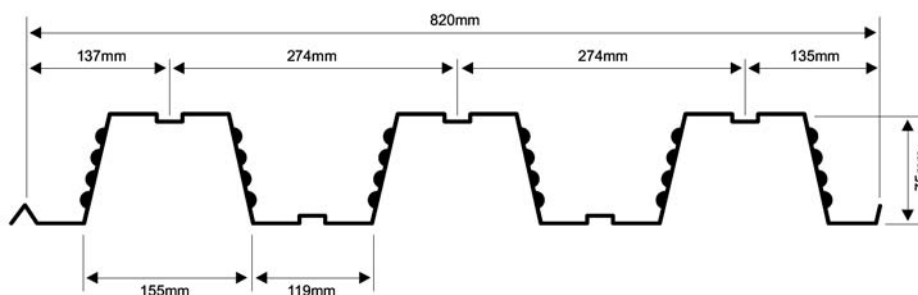


Figura 5.9 – seção do *steel deck* MF-75

5.1.6 Comparação de resultados

A Tabela 5.1 apresenta os quantitativos, custo unitário e total de material e mão de obra obtidos para cada sistema de laje, utilizando a metodologia do orçamento Expedito.

Tabela 5.1 – Custo comparativo das lajes

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total			custo por m2
				Material	M.Obra	Material	M.Obra	Total	
1	Laje Maciça - Superestrutura					2.703,16	1.510,30	4.213,46	95,76
1.	Forma chapa resinada 12mm	m2	41,25	15,26	20,00	629,48	825,00	1.454,48	
2.	Armação aço CA-50	kg	190,00	4,10	1,00	779,00	190,00	969,00	
3.	Concreto usinado C25	m3	4,13	257,25	60,00	1.062,44	247,80	1.310,24	
4.	Escoramento	m2	41,25	5,63	6,00	232,24	247,50	479,74	
2	Laje pré-moldada treliçada-Superestrut.					2.231,38	859,65	3.091,03	70,25
1.	Armação aço CA-60 (tela p/ fiss- Q-92)	m2	41,25	7,10	1,00	292,88	41,25	334,13	
2.	Concreto usinado C25	m3	2,64	257,25	60,00	679,14	158,40	837,54	
3.	Laje pré moldada treliçada	m2	41,25	24,90	10,00	1.027,13	412,50	1.439,63	
4.	Escoramento	m2	41,25	5,63	6,00	232,24	247,50	479,74	
3	Laje com deck metálico + EPS - Superestrutura					3.081,68	1.728,62	4.810,30	109,33
1.	Estrutura metálica	kg	432,61	4,71	2,00	2.037,59	865,22	2.902,81	
2.	Isolamento térmico tipo EPS	pç	198,00	1,25	1,00	247,50	198,00	445,50	
3.	Concreto usinado C25	m3	2,29	257,25	60,00	589,10	137,40	726,50	
4.	Armação aço CA-60 (tela p/ fiss- Q-75)	m2	41,25	5,03	1,00	207,49	41,25	248,74	
5.	Mão de obra de montagem do <i>steel deck</i>	m2	41,25		11,80	-	486,75	486,75	
4	Laje mista <i>steel deck</i> MF-75 - Superestrutura					3.585,60	1.051,95	4.637,55	105,40
1.	Estrutura metálica	m2	41,25	47,75	7,00	1.969,69	288,75	2.258,44	
2.	Concreto usinado C25	m3	3,92	257,25	60,00	1.008,42	235,20	1.243,62	
3.	Armação aço CA-60 (tela p/ fiss- Q-75)	m2	41,25	5,03	1,00	207,49	41,25	248,74	
4.	Mão de obra de montagem do <i>steel deck</i>	m2	41,25		11,80	-	486,75	486,75	
5.	Mobilização montagem do <i>steel deck</i>	vb	1,00	400,00		400,00	-	400,00	

Os dados utilizados para a composição de custo são referentes a janeiro de 2009 na região de Ribeirão Preto – SP, os resultados refletem uma situação momentânea que pode ser alterada devido a economia do país.

Pelos gráficos (Figuras 5.10 a 5.13), visualizam-se os resultados comparativos dos custos realizados na Tabela 5.1. Apresentam-se os resultados para: volume de concreto, mão de obra, material e custo total.

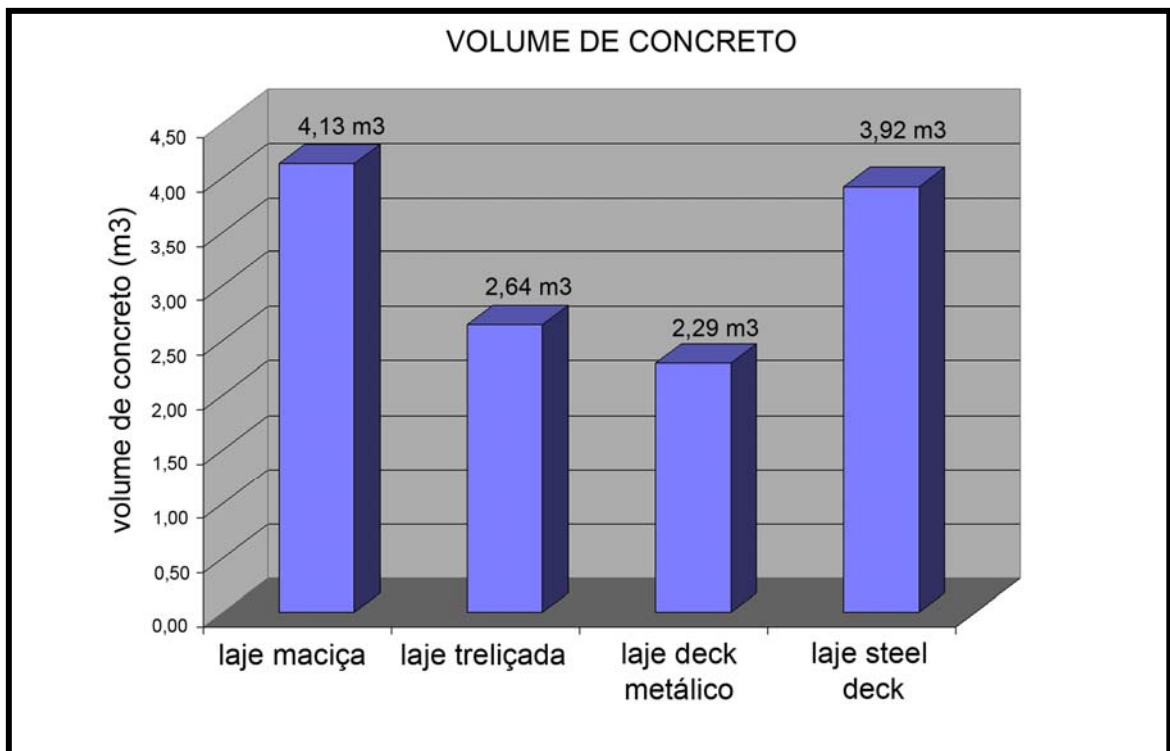


Figura 5.10 – Comparativo do volume de concreto entre os sistemas de lajes adotados

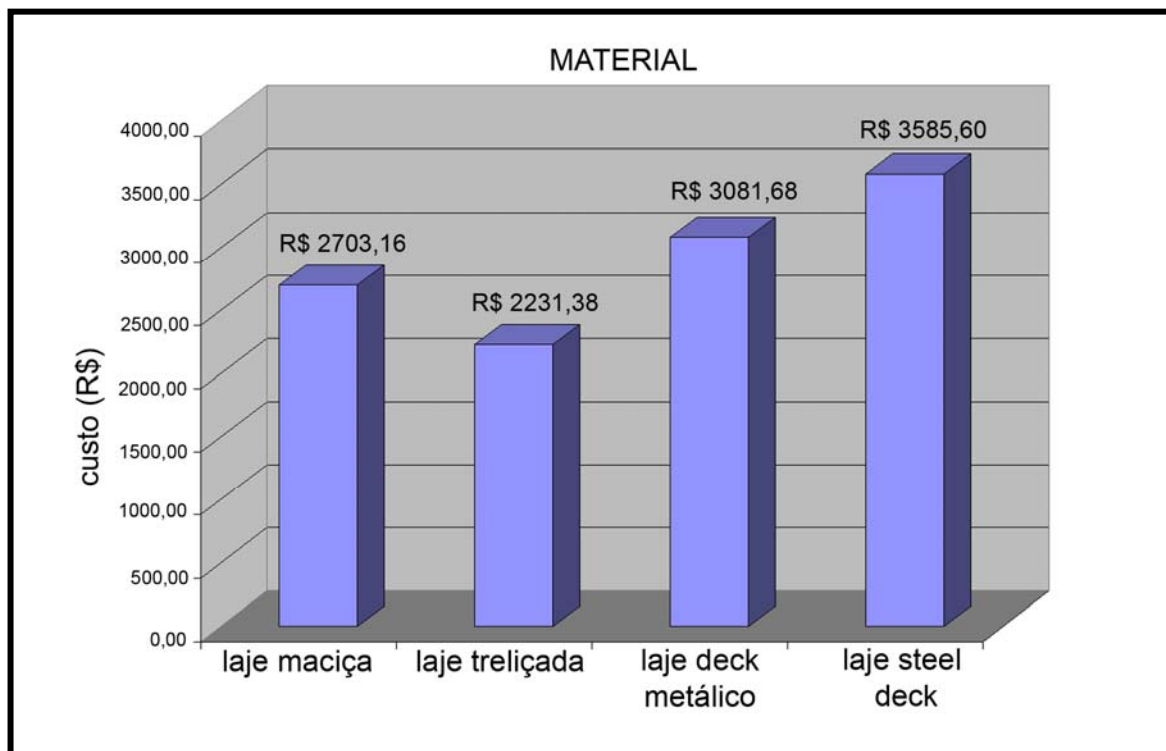


Figura 5.11 – Comparativo do material entre os sistemas de lajes adotados

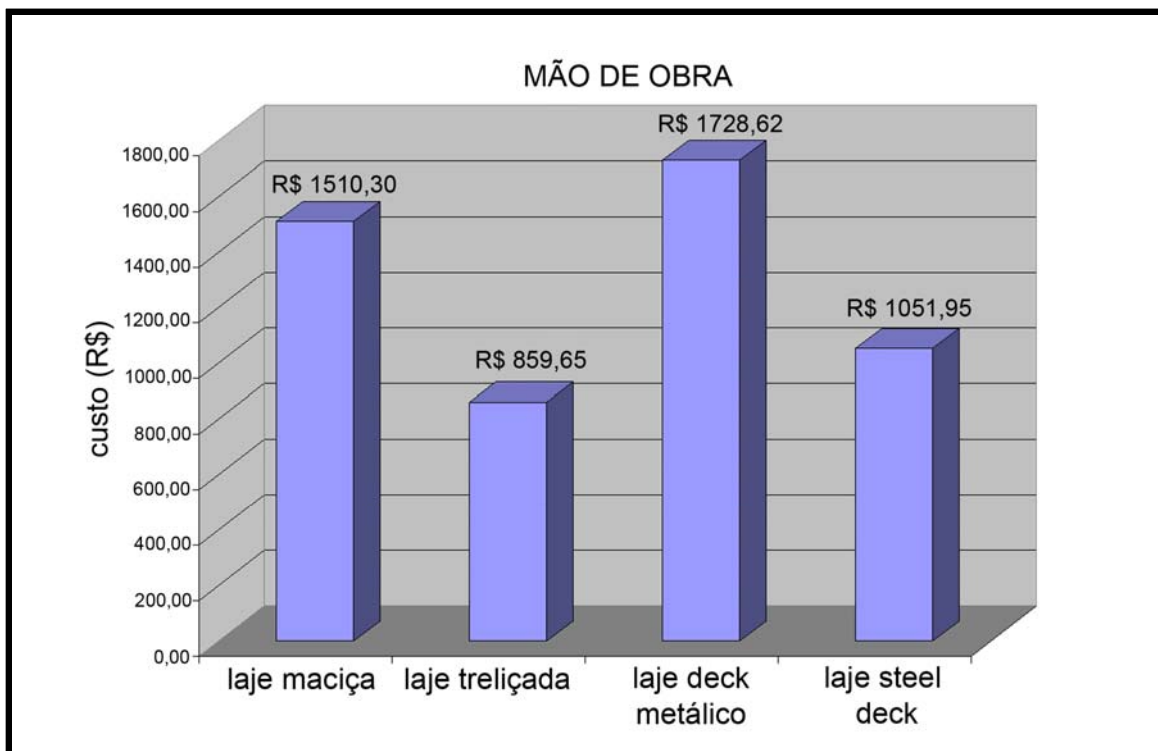


Figura 5.12 – Comparativo da mão de obra entre os sistemas de lajes adotados

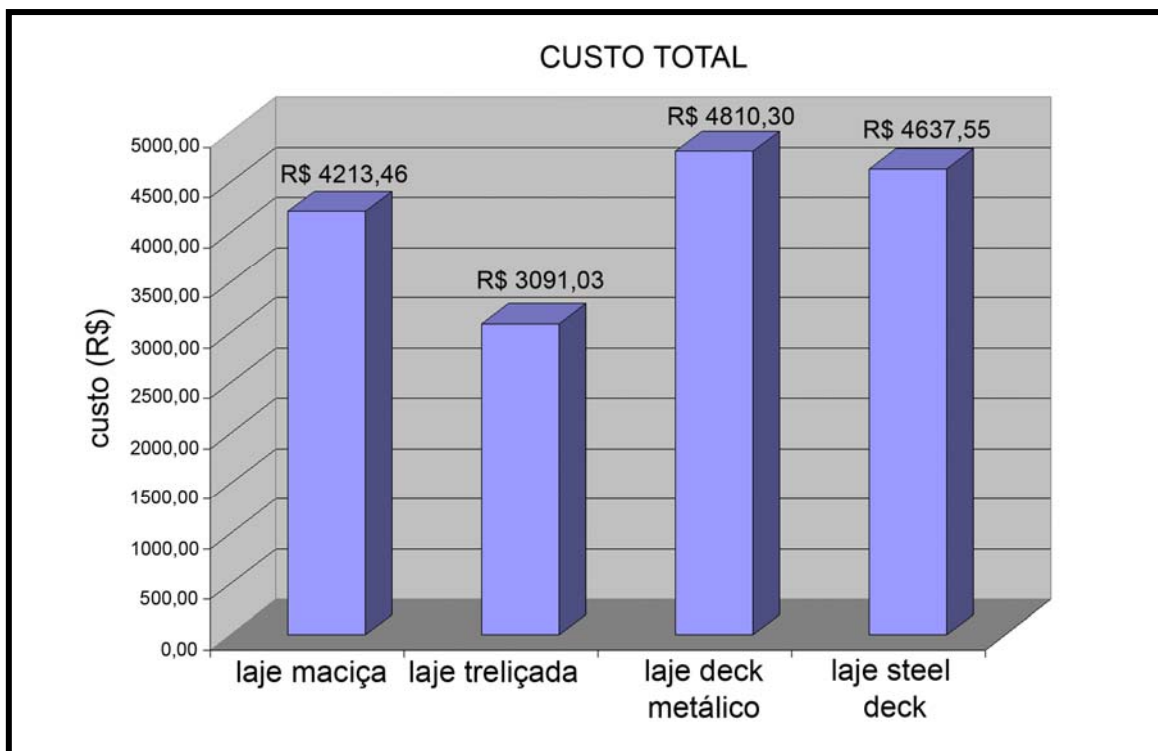


Figura 5.13 – Comparativo do custo total entre os sistemas de lajes adotados

5.1.7 Conclusão parcial do Caso 1

Os custos de um sistema estrutural foram quantificados levando-se em conta alguns critérios, tais como: consumo de materiais, mão de obra, tempo de execução, cronograma da obra, entre outros.

Para se obter uma avaliação mais completa dos valores totais de uma obra, é preciso considerar os pormenores de cada sistema, bem como suas implicações no processo construtivo global, analisando as interferências com os projetos de instalações, projeto de alvenaria, revestimentos e forros, etc.

No caso 1, apresentamos um trecho de pavimento composto por três lajes adjacentes e constatamos que a estrutura convencional em laje maciça e a laje treliçada apresentaram os menores custos, de material e custo total, porém a laje maciça apresentou o maior volume de concreto.

É visto que este estudo do caso 1 refere-se a uma estrutura com uma área pequena, onde o viga para os quatro tipos de laje permaneceu fixo, não aproveitando-se do melhor arranjo estrutural para cada tipo de laje, o que torna a comparação entre os sistemas de laje inconsistente, tendo como objetivo apenas testar a metodologia que foi aplicada no caso 2.

5.2 Estudo de Caso 2

Trata-se de um edifício de 8 lajes, com área total de 4320 m², com pé direito de 3 m, e espaçamento entre pilares de 6 m, conforme arquitetura apresentada da Figura 5.14 à Figura 5.18. Trata-se de uma arquitetura bastante compatível com o que é utilizado nas construções de edifícios comerciais em aço.

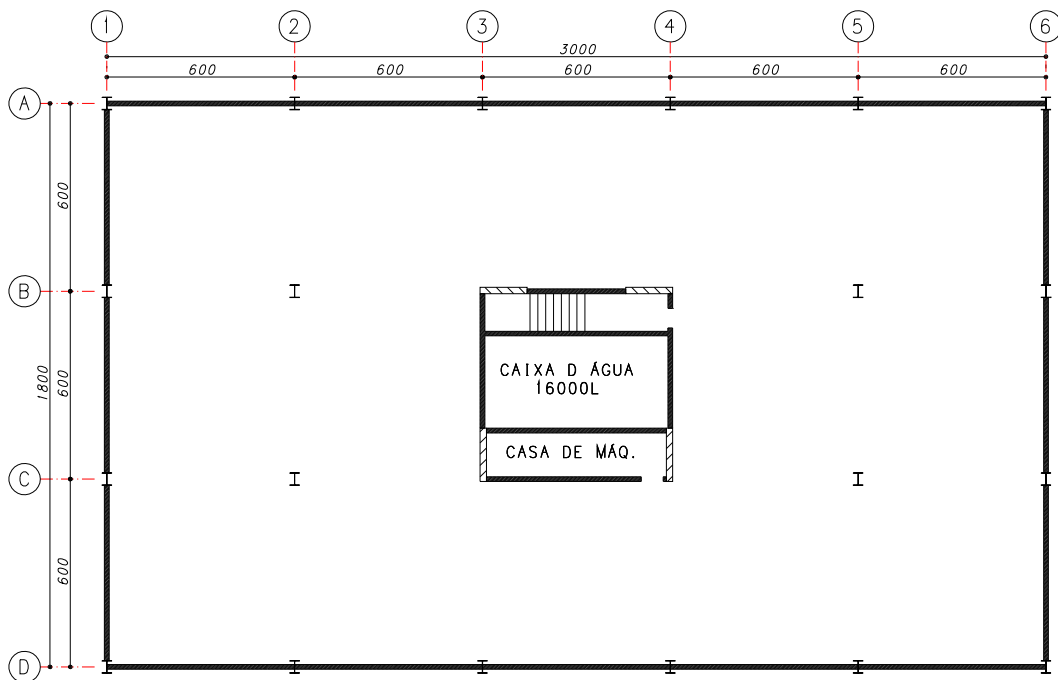


Figura 5.14 – pavimento Cobertura – Planta baixa

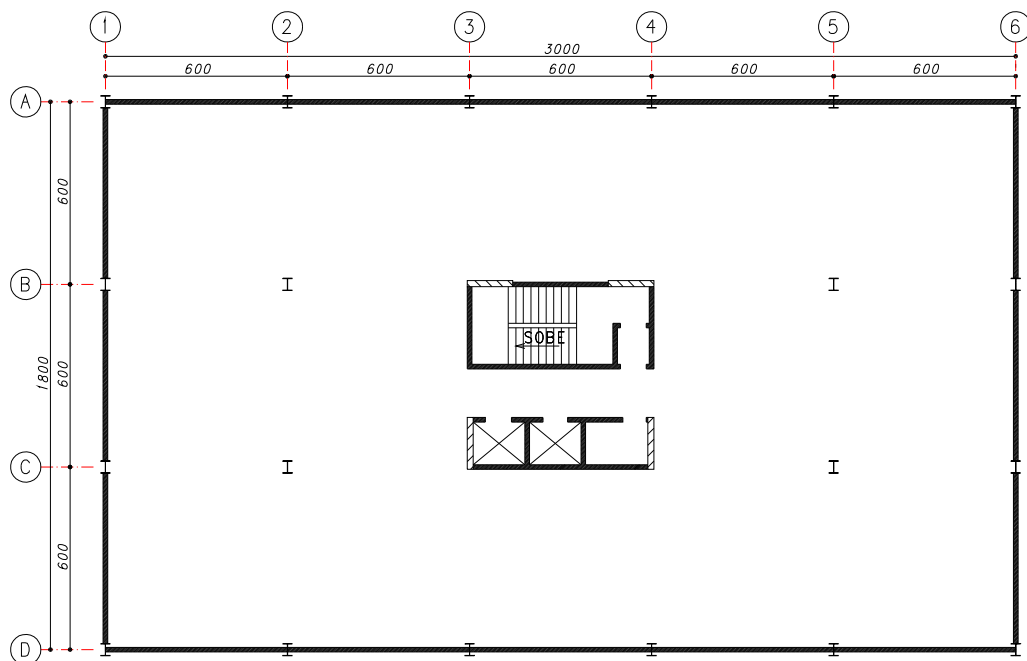


Figura 5.15 – pavimento Tipo – Planta baixa

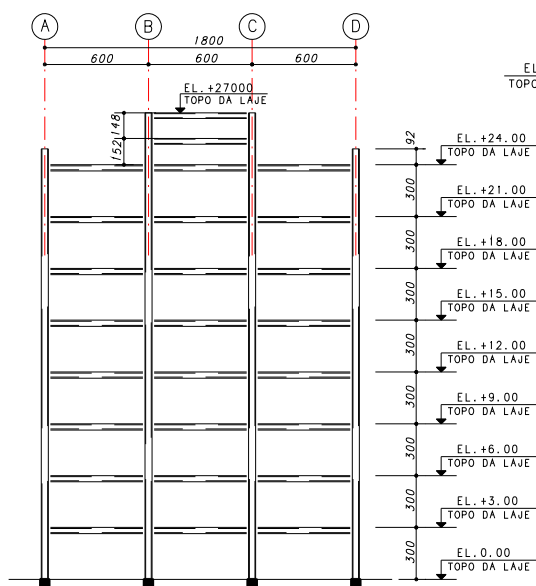


Figura 5.16 – Elevação eixos 3 e 4

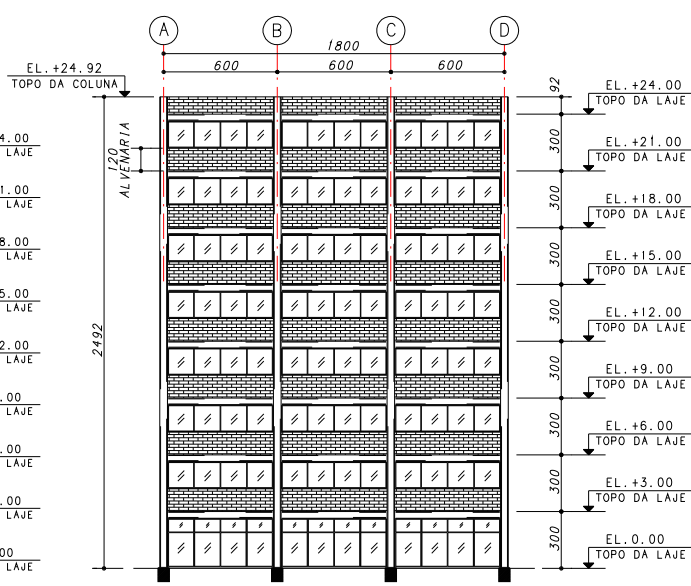


Figura 5.17 – Elevação eixos 1 e 6

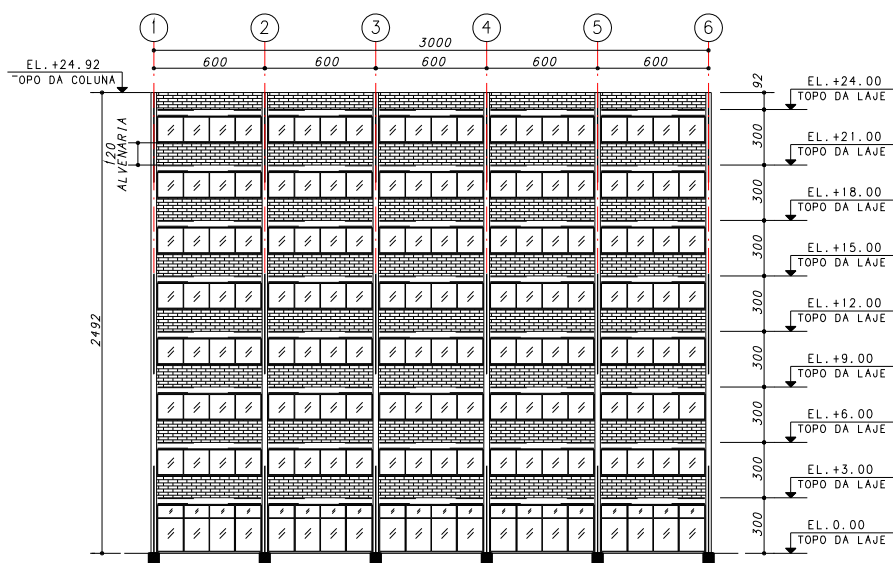


Figura 5.18 – Fachada eixos A e D

O edifício que constitui o caso de análise 2 foi adaptado do exemplo apresentado por Belley (2008). Com o objetivo de comparar comportamento estrutural e custos, o edifício foi totalmente calculado utilizando diferentes soluções para os sistemas de laje.

Os sistemas de lajes escolhidos para a análise são aqueles mais comumente utilizados em construções de edifícios residenciais e comerciais, ou seja:

- 1 - Lajes maciças;
- 2 – Laje pré-moldada protendida de concreto;

3 – Laje nervurada;

4 – Laje mista aço-concreto ;

5 – Laje alveolar.

Para cada tipo de laje, foi lançada uma distribuição de vigas diferentes e adequadas para o sistema de laje em análise.

Para todas as soluções do sistema de laje, a estabilidade lateral do edifício é garantida por um núcleo rígido de concreto.

As estruturas foram analisadas no *software* CAD-TQS com um modelo de pórtico espacial. O *software* CAD-TQS também foi utilizado para o dimensionamento das lajes, exceto a laje mista aço-concreto. As lajes em concreto foram dimensionadas de acordo com a NBR 6118:2003, já as lajes mistas de acordo com a NBR 8800:2008.

Para a parte metálica foi adotado aço do tipo ASTM A36 utilizando seções tipo I soldadas e /ou laminadas. As seções foram dimensionadas segundo os procedimentos da NBR 8800:2008, utilizando as planilhas apresentadas no Anexo 1.

As ações adotadas para a análise estrutural são as indicadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – ações consideradas

Ações consideradas	
Ações permanentes	peso próprio → indicado em cada tipo de laje
	piso + revestimento = $1,5 \text{ kN/m}^2$
	paredes: não serão consideradas paredes sobre as lajes
Ações variáveis	Sobrecarga de utilização: $5,0 \text{ kN/m}^2$
Ação do vento	considerada segundo as prescrições na NBR 6123:1986.

5.2.1 Caso 2 – Laje maciça

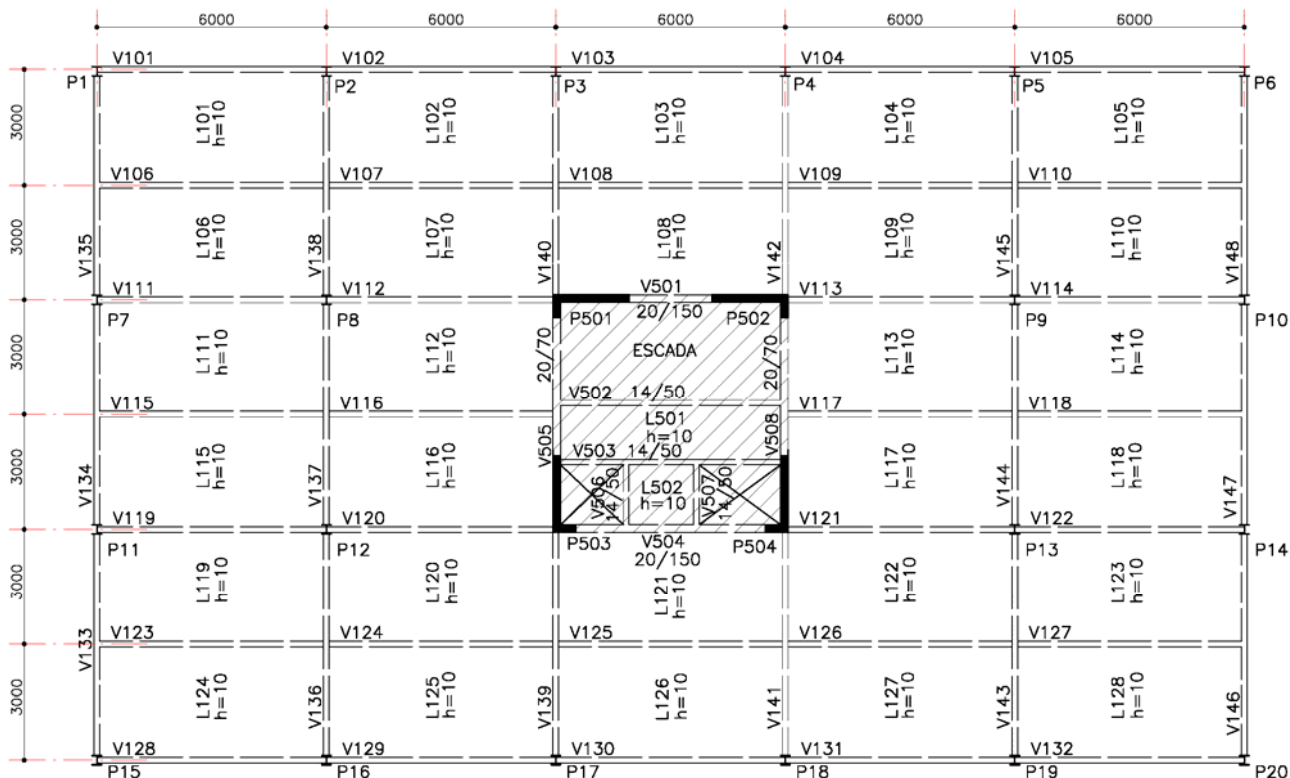


Figura 5.19 – Plano de vigas – laje maciça

Na Figura 5.19, é apresentado o plano de viga para alternativa estrutural em laje maciça. O dimensionamento das lajes maciças segue as diretrizes da NBR – 6118:2003. Foi adotada a classe de agressividade ambiental II (moderada – Urbana); concreto – C 25 , conforme tabela 7.1 da NBR 6118:2003. Cobrimento nominal da laje = 2,5 cm. Massa específica para o concreto armado de 2.500 kg/m³. E para as armaduras foi adotado aço CA-50.

A Tabela 5.3 apresenta os esforços nos pilares, obtidos da análise estrutural, e as seções finais dimensionadas. Como foi utilizado somente o núcleo rígido como sistema resistente às ações laterais, os pilares estão submetidos à compressão simples e para o seu dimensionamento podem ser considerados birrotulados.

Tabela 5.3 – Esforços nos pilares e dimensionamento – laje maciça

Pilares P1=P6=P15=P20 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1030	910	770	630	490	350	210	80
Perfil	CS 250x52							
Pilares P2=P3=P4=P5=P16=P17=P18=P19 (8x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1690	1500	1280	1050	820	590	360	140
Perfil	CS 250x76				CS 250x52			
Pilares P7=P10=P11=P14 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1600	1420	1210	990	780	560	350	130
Perfil	CS 250x76		CS 250x52					
Pilares P8=P9=P12=P13 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	2630	2370	2010	1660	1310	950	600	250
Perfil	CS 350x112		CS 300x62		CS 250x52			

Na Tabela 5.4, são apresentados os momentos de cálculo nas vigas e as seções dimensionadas. Todas as ligações viga-pilar são flexíveis e conseqüentemente todas as vigas são birrotuladas. Para o sistema de laje maciça, é natural dimensionar as vigas como mistas de aço-concreto. Esse dimensionamento foi feito segundo os procedimentos da NBR 8800:2008 com o auxílio das planilhas do Anexo 1.

Tabela 5.4 – Momentos nas vigas e dimensionamento – laje maciça

Viga Logintudinal de BORDA 10x	V101=V102=V103=V104=V105=V128=V129 =V130 =V131 =V132						
	Md (kNcm)	6970	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	20	16 mm
Viga Logintudinal INTERNA 12x	V106=V107=V108=V109=V110=V115=V118 =V123 =V124=V125=V126 =V127						
	Md (kNcm)	9290	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	20	16 mm
Viga Logintudinal INTERNA 4x	V111=V114=V119=V122						
	Md (kNcm)	11090	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	20	16 mm
Viga Logintudinal INTERNA 4x	V112=V113=V120=V121						
	Md (kNcm)	10630	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	20	16 mm
Viga Logintudinal INTERNA 2x	V116=V117						
	Md (kNcm)	8030	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	20	16 mm
Viga Transversal BORDA 6x	V133=V134=V135=V146=V147=V148						
	Md (kNcm)	11100	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	20	16 mm
Viga Transversal INTERNA 6x	V136=V137=V138=V143=V144=V145						
	Md (kNcm)	15800	Perfil	VS 250x28	N.Conectores	26	16 mm
Viga Transversal INTERNA 4x	V139=V140=V141=V142						
	Md (kNcm)	15520	Perfil	VS 250x28	N.Conectores	26	16 mm

Como base no dimensionamento, foram levantados os custos de materiais, mão de obra com encargos sociais e tempo de execução. Para o levantamento destes custos, foi considerada a concretagem de uma laje a cada 28 dias, utilizando apenas um jogo de formas para as oito lajes do edifício. A Tabela 5.5 apresenta o custo total da estrutura para a solução laje maciça opção construtiva 1.

Tabela 5.5 – Planilha de custo para laje maciça opção construtiva 1

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total		%	
				Material	M. Obra	Material	M.Obra		Total
1A	Laje Maciça 1 - Superestrutura					780.066,48	399.552,00	1.179.618,48	100,00
1.	Forma chapa resinada 12mm	m2	4.032,00	15,26	20,00	61.528,32	80.640,00	142.168,32	12,05
2.	Armação Aço CA-50	kg	24.000,00	4,10	1,00	98.400,00	24.000,00	122.400,00	10,38
3.	Concreto Usinado C25	m3	408,00	257,25	60,00	104.958,00	24.480,00	129.438,00	10,97
4.	Escoramento	m2	4.032,00	5,63	6,00	22.700,16	24.192,00	46.892,16	3,98
5.	Pilares Metálicos	Kg	29.520,00	6,00	3,00	177.120,00	88.560,00	265.680,00	22,52
6.	Vigas metálicas	kg	52.560,00	6,00	3,00	315.360,00	157.680,00	473.040,00	40,10

Em outra alternativa para a composição de custo apresentada na Tabela 5.6, considerou-se a concretagem de uma laje a cada sete dias, utilizando três jogos de forma, dois jogos que serão utilizados até a laje completar 14 dias (100% de laje escorada) e ½ jogo para a laje com 21 dias (50% de laje escorada) e mais ½ jogo para a laje com 28 dias

(50% de laje escorada). Na Figura 5.20, apresenta-se o esquema de escoramento das lajes maciças para a opção laje maciça para a opção construtiva 2.

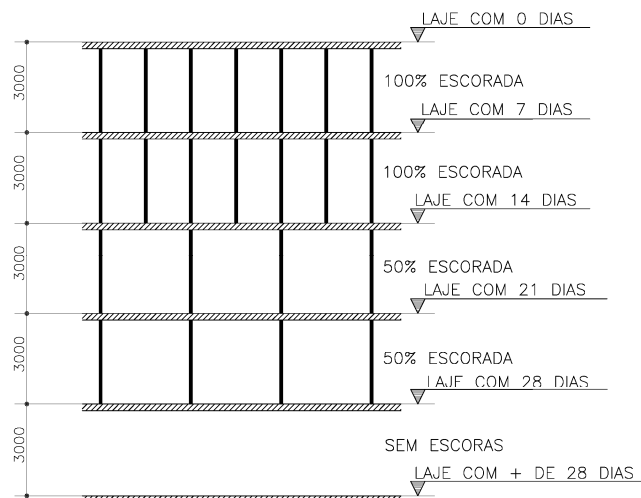


Figura 5.20 – Esquema de escoramento

Tabela 5.6 – Planilha de custo para laje maciça opção construtiva 2

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total		%	
				Material	M. Obra	Material	M.Obra		Total
1B	Laje Maciça 2					903.123,12	399.552,00	1.302.675,12	100,00
1.	Forma chapa resinada 12mm (reutilização)	m2	4.032,00	45,78	20,00	184.584,96	80.640,00	265.224,96	20,36
2.	Armação Aço CA-50	kg	24.000,00	4,10	1,00	98.400,00	24.000,00	122.400,00	9,40
3.	Concreto Usinado C25	m3	408,00	257,25	60,00	104.958,00	24.480,00	129.438,00	9,94
4.	Escoramento	m2	4.032,00	5,63	6,00	22.700,16	24.192,00	46.892,16	3,60
5.	Pilares Metálicos	Kg	29.520,00	6,00	3,00	177.120,00	88.560,00	265.680,00	20,39
6.	Vigas metálicas	kg	52.560,00	6,00	3,00	315.360,00	157.680,00	473.040,00	36,31

A distribuição dos custos para a estrutura com solução em laje maciça fica mais bem visualizada no gráfico da Figura 5.21.

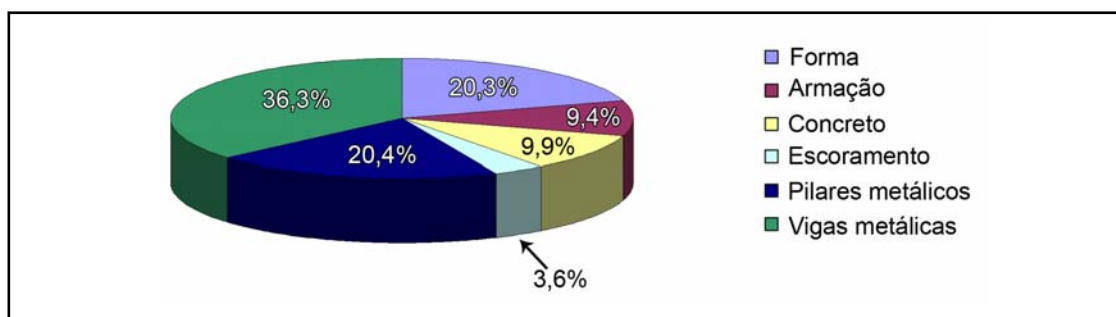


Figura 5.21 – Composição de custo para a laje maciça opção construtiva 2

O percentual de custos com forma é compatível com o que se obtém em uma estrutura de concreto convencional, levando-se em consideração que, no caso em estudo, as vigas e pilares são metálicas e, portanto, não há formas para esses elementos.

Como se pode observar, a estrutura metálica representa 56% do custo total, enquanto formas representam cerca de 20% deste custo que é bastante elevado.

5.2.2 Caso 2 – Laje pré-moldada com trilhos protendidos

Na Figura 5.22, é apresentado o plano de viga para alternativa estrutural com laje pré-moldada com trilhos protendidos. Foi utilizado concreto C25 com massa específica de 2.500 kg/m^3 . O peso próprio para laje pré-moldada com protendidos é igual a $1,8 \text{ kN/m}^2$.

O funcionamento estrutural da laje pré-fabricada protendida é o mesmo de uma laje maciça armada em uma só direção. Em princípio, as vigotas protendidas constituem o único elemento resistente da laje, suportando as cargas das vigota, das lajotas, e da capa de concreto, além da sobrecarga para execução do capeamento. Após a cura da capa de concreto, a seção resistente da laje passa a ser constituída por nervuras resistindo à flexão, e a mesa resistindo à compressão.

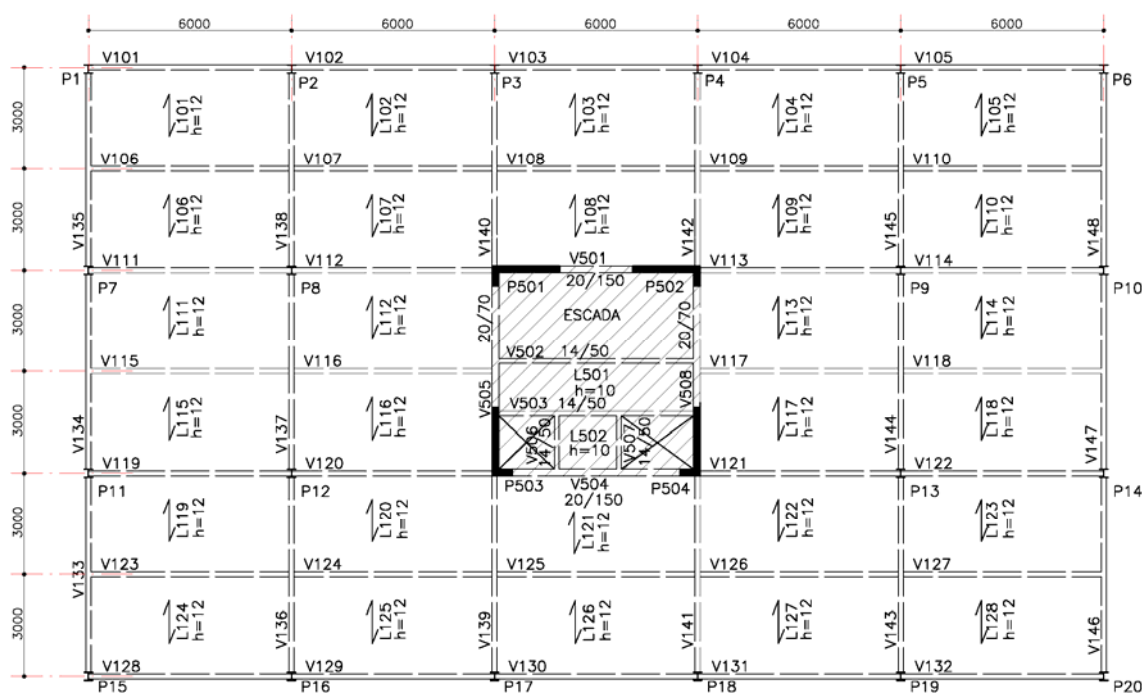


Figura 5.22 – Plano de vigas – laje pré-moldada com trilhos protendidos

A utilização do núcleo rígido, como único sistema resistente às ações laterais, permitiu o dimensionamento dos pilares como birrotulados, e sofrendo ação apenas de compressão simples, os esforços e dimensionamento estão apresentados na Tabela 5.7. Os pilares foram dimensionados segundo a NBR 8800:2008 com o auxílio das planilhas do Anexo 1.

Tabela 5.7 – Esforços nos pilares e dimensionamento – laje pré-moldada

Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	840	730	630	530	420	320	210	110
Perfil	CS 250x52							
Pilares P2=P3=P4=P5=P16=P17=P18=P19 (8x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1560	1360	1160	970	770	580	390	200
Perfil	CS 250x76		CS 250x52					
Pilares P7=P10=P11=P14 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1440	1260	1080	900	720	540	360	180
Perfil	CS 250x76		CS 250x52					
Pilares P8=P9=P12=P13 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	2350	2060	1760	1470	1170	880	590	300
Perfil	CS 300x95		CS 250x76		CS 250x52			

Na Tabela 5.8, são apresentados os momentos de cálculo das vigas. As vigas foram dimensionadas como vigas isoladas, segundo a NBR 8800:2008 com o auxílio das planilhas do Anexo 1. O uso de vigas mistas para essa solução de laje fica prejudicado pela dificuldade de se obter o comportamento misto por meio de ligações mecânicas entre laje de concreto e viga metálica. Seria necessário concretar um trecho de laje maciça sobre as vigas, o que acarretaria a utilização de forma e escoramentos, reduzindo as vantagens do sistema construtivo pré-fabricado.

Tabela 5.8 – Momentos nas vigas e dimensionamento – laje pré-moldada

Viga Logitudinal de BORDA 10x	V101=V102=V103=V104=V105=V128=V129 =V130 =V131 =V132						
	Md (kNcm)	7880	Perfil	VS 300x33	N.Conectores	X	16 mm
Viga Logitudinal INTERNA 12x	V106=V107=V108=V109=V110=V115=V118 =V123 =V124=V125=V126 =V127						
	Md (kNcm)	10000	Perfil	VS 300x33	N.Conectores	X	16 mm
Viga Logitudinal INTERNA 4x	V111=V114=V119=V122						
	Md (kNcm)	8930	Perfil	VS 300x33	N.Conectores	X	16 mm
Viga Logitudinal INTERNA 4x	V112=V113=V120=V121						
	Md (kNcm)	9590	Perfil	VS 300x33	N.Conectores	X	16 mm
Viga Logitudinal INTERNA 2x	V116=V117						
	Md (kNcm)	10080	Perfil	VS 300x33	N.Conectores	X	16 mm
Viga Transversal BORDA 6x	V133=V134=V135=V146=V147=V148						
	Md (kNcm)	11050	Perfil	VS 325x46	N.Conectores	X	16 mm
Viga Transversal INTERNA 6x	V136=V137=V138=V143=V144=V145						
	Md (kNcm)	15020	Perfil	VS 325x46	N.Conectores	X	16 mm
Viga Transversal INTERNA 4x	V139=V140=V141=V142						
	Md (kNcm)	15220	Perfil	VS 325x46	N.Conectores	X	16 mm

Utilizaram-se as lajes pré-moldadas com trilhos protendidos que são compostas por vigotas pré-fabricadas em concreto protendido e lajotas cerâmicas utilizadas como elementos de enchimento. A execução é realizada colocando-se as vigotas sobre as vigas metálicas, espaçadas a cada 40 cm e preenchem-se os espaços vazios com o elemento de enchimento. Utiliza-se uma malha de distribuição Q-61, e faz-se a concretagem da capa de concreto com espessura de 4 cm. Para o vão de 3 m, as vigotas suportam o carregamento da fase executiva sem auxílio de escoramento. Na Tabela 5.9 é apresentada a planilha de custo para esta opção de laje.

Tabela 5.9 – Planilha de custo – laje pré-moldada com trilhos protendidos

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total			%
				Material	M. Obra	Material	M.Obra	Total	
2	Laje pré-moldada c/ trilhos protendidos - Superestrutura					888.018,84	399.528,00	1.287.546,84	100,00
1.	Armação Aço CA-60 (tela p/ fiss- Q-61)	m2	4.032,00	4,01	1,00	16.168,32	4.032,00	20.200,32	1,57
2.	Concreto Usinado C25	m3	204,00	257,25	60,00	52.479,00	12.240,00	64.719,00	5,03
3.	Laje pré moldada protendida	m2	4.032,00	33,11	10,00	133.499,52	40.320,00	173.819,52	13,50
4.	Pilares metálicos	kg	28.296,00	6,00	3,00	169.776,00	84.888,00	254.664,00	19,78
5.	Vigas metálicas	kg	86.016,00	6,00	3,00	516.096,00	258.048,00	774.144,00	60,13

O gráfico da Figura 5.23 ilustra a composição do custo para laje pré-moldada com trilhos protendidos.

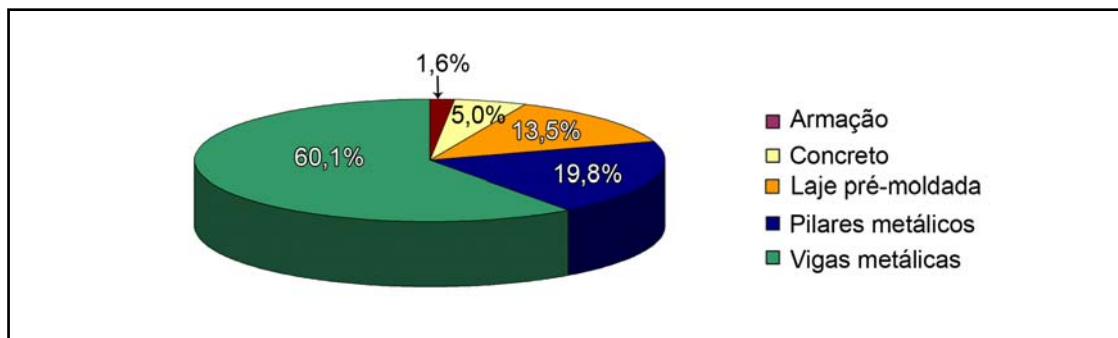


Figura 5.23 – Composição de custo em porcentagem – laje pré-moldada com trilhos protendidos

Percebe-se que a participação dos pilares no custo total não se modificou em relação à solução em laje maciça, porém pelo fato de não se terem utilizado vigas mistas aço-concreto, o percentual do custo relativo às vigas aumentou sensivelmente. No entanto o custo desta solução estrutural com laje treliçada ainda resultou menor que o custo da solução em laje maciça. E ainda há o fato de o processo construtivo para as lajes pré-fabricadas com protendida ser mais racional, eliminando ou reduzindo formas e escoramentos.

5.2.3 Caso 2 – Laje nervurada

Na Figura 5.24, é apresentado o plano de viga para alternativa de laje nervurada. O estudo para as lajes nervuradas segue as diretrizes da NBR – 6118/2003. Adotada a classe de agressividade ambiental II (moderada – Urbana). Classe do concreto – C 25 , conforme tabela 7.1 da NBR 6118/2003. Cobrimento nominal: laje = 2,5 cm. Massa específica para o concreto armado de 2.500 kg/m³. Para as armaduras, foi adotado aço CA-50.

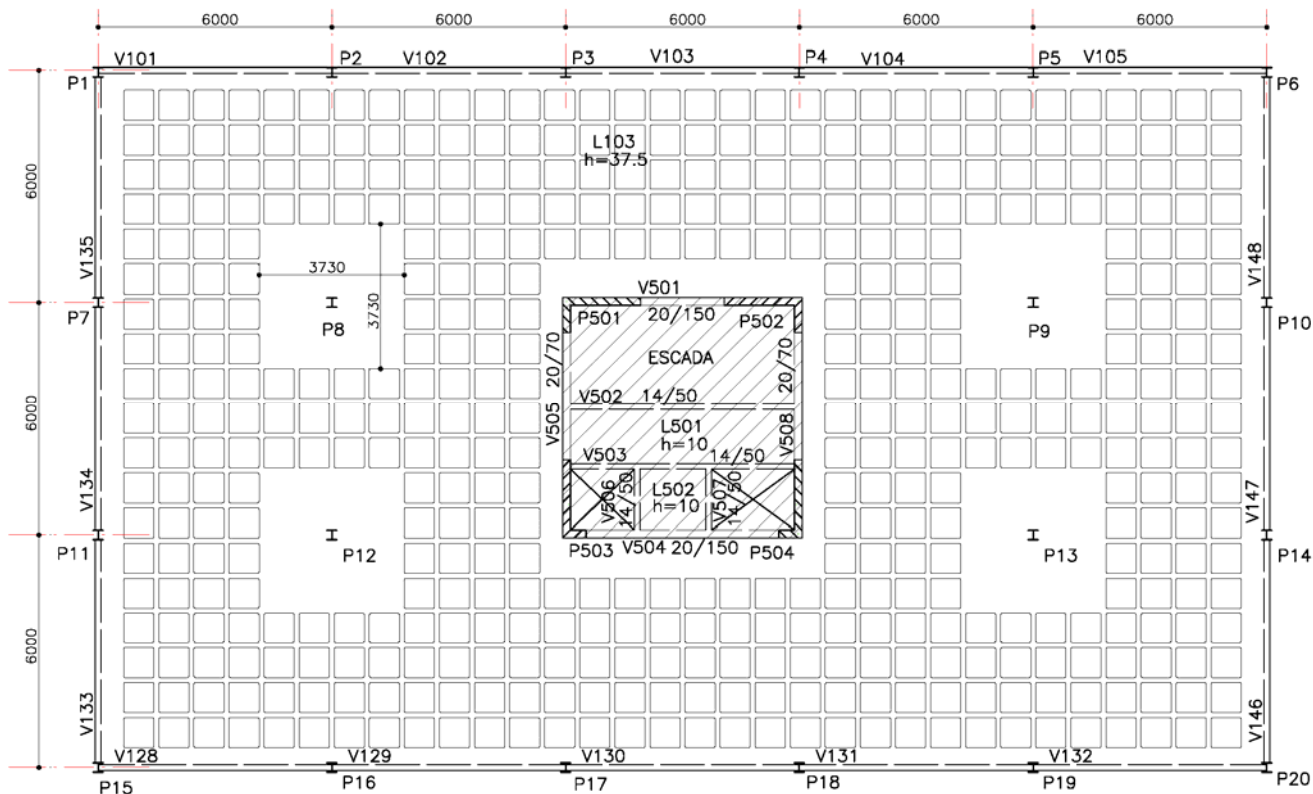


Figura 5.24 – Plano de vigas – laje nervurada

Carregamento adotado conforme o item 5.2. Utilizou-se a forma da Atex (Tabela 5.10), com altura da forma de 32,5 cm, capa de concreto de 5 cm, portanto uma altura total de 37,5 cm, compondo um peso próprio de $4,33 \text{ kN/m}^2$. Na Figura 5.25, são apresentadas as dimensões das formas da Atex.

Tabela 5.10 – Sistemas de forma Atex 900. (Fonte: www.atex.com.br)

Altura da Forma	Espessura da Lâmina	Altura Total	Largura da Nervura			Área da Seção	Distância do CGA		Inércia	Módulo de Fluxão		Volume do Vazio		Peso Próprio	Volume Concreto
			Inferior	Superior	Média		Superior	Inferior		WS	Wi	M3	M3/M2		
22,5	5,0	27,5	12,5	21,5	17,0	816	8,3	19,2	49561	5971	2581	0,116	0,143	3,30	0,132
	7,5	30,0				1040	8,7	21,3	65670	7548	3083			4,55	0,157
	10,0	32,5				1266	9,5	23,0	84158	8859	3659			4,33	0,182
32,5	5,0	37,5	12,5	25,5	19,0	1043	12,2	25,3	125718	10305	4969	0,163	0,202	4,95	0,198
	7,5	40,0				1268	12,3	27,7	159245	12947	5749			0,558	0,223
	10,0	42,5				1493	12,8	29,7	194449	15191	6547			5,63	0,225
42,5	5,0	47,5	12,5	29,5	21,0	1310	16,5	31,0	255029	15456	8227	0,202	0,250	6,25	0,250
	7,5	50,0				1536	16,3	33,7	314390	19288	9329			6,88	0,275
	10,0	52,5				1761	16,5	36,0	374573	22701	10405				
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	Ws	Wi	v/v	Concreto 25 KN/M3		

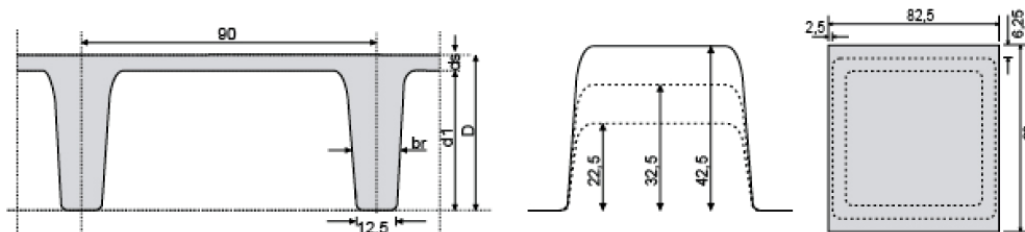


Figura 5.25 – Forma Atex.(Fonte: www.atex.com.br)

Para resistir aos esforços laterais, considerou-se o núcleo rígido como único sistema resistente, tornando-se possível o dimensionamento dos pilares como birrotulado à compressão simples. Na Tabela 5.11, são apresentados os principais esforços nos pilares. Os pilares foram dimensionados segundo a NBR 8800:2008 com o auxílio das planilhas do Anexo 1.

Tabela 5.11 – Esforços nos pilares e dimensionamento – laje nervurada

Pilares P1=P6=P15=P20 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1000	870	740	620	490	370	240	120
Perfil	CS 250x52							
Pilares P2=P3=P4=P5=P16=P17=P18=P19 (8x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1900	1660	1420	1190	950	710	470	230
Perfil	CS 250x76			CS 250x52				
Pilares P7=P10=P11=P14 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1540	1340	1150	960	770	580	390	200
Perfil	CS 250x76			CS 250x52				
Pilares P8=P9=P12=P13 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	3870	3400	2920	2430	1950	1470	980	510
Perfil	CS 450x154			CS 400x106		CS 250x76		

Na Tabela 5.12, são apresentados os momentos de cálculo das vigas. As vigas foram dimensionados como vigas isoladas, segundo a NBR 8800:2008 com o auxílio das planilhas do Anexo 1. As vigas foram dimensionadas como viga de aço isolada, pois se trata apenas de vigas de borda que irão contribuir para o travamento da estrutura e recebem pouco carregamento da laje.

Tabela 5.12 – Momentos nas vigas e dimensionamento – laje nervurada

Viga Logintudinal de BORDA 10x	V101=V102=V103=V104=V105=V128=V129 =V130 =V131 =V132						
	Md (kNcm)	6700	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	X	16 mm
Viga Transversal INTERNA 6x	V133=V134=V135=V146=V147=V148						
	Md (kNcm)	8600	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	X	16 mm

Após a colocação das vigas metálicas, monta-se o escoramento, conforme Figura 5.26, observa-se que, diferente do escoramento da laje maciça, não foi montado um tablado para a montagem das armações, pois as formas plásticas são apoiadas diretamente sobre o escoramento, após a montagem de todas as formas plásticas, coloca-se as armações positivas nas nervuras, por fim utiliza-se uma malha de distribuição Q-138, e faz-se a concretagem da capa de concreto com espessura de 5 cm. Para levantamento de custo, foi considerada a concretagem da mesma forma da laje maciça, isso é, concretar-se uma laje a cada sete dias. Na Tabela 5.13, apresenta-se a planilha de custo para opção com laje nervurada.

Figura 5.26 – Escoramento para laje nervurada (Fonte: www.atex.com.br)

Tabela 5.13 – Planilha de custo – laje nervurada

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total			%
				Material	Mão Obra	Material	M.Obra	Total	
3	Laje Nervurada - Superestrutura					835.930,04	305.553,60	1.141.483,64	100,00
1.	Forma 1 - Caçambas (472unX7dias/lajeX8lajes)	un.	26.432,00	0,80	0,30	21.145,60	7.929,60	29.075,20	2,55
2.	Forma chapa resinada 12mm	m2	850,00	15,26	20,00	12.971,00	17.000,00	29.971,00	2,63
3.	Armação Aço CA-60 (tela p/ fiss- Q-138)	m2	4.032,00	10,14	1,00	40.884,48	4.032,00	44.916,48	3,93
4.	Concreto Usinado C25	m3	752,00	257,25	60,00	193.452,00	45.120,00	238.572,00	20,90
5.	Armação Aço CA-50	kg	59.608,00	4,10	1,00	244.392,80	59.608,00	304.000,80	26,63
6.	Escoramento	m2	4.032,00	6,88	6,00	27.740,16	24.192,00	51.932,16	4,55
7.	Pilares metálicos	kg	33.096,00	6,00	3,00	198.576,00	99.288,00	297.864,00	26,09
8.	Vigas metálicas	kg	16.128,00	6,00	3,00	96.768,00	48.384,00	145.152,00	12,72

Para melhor visualização da composição do custo, apresenta-se o gráfico da Figura 5.27.

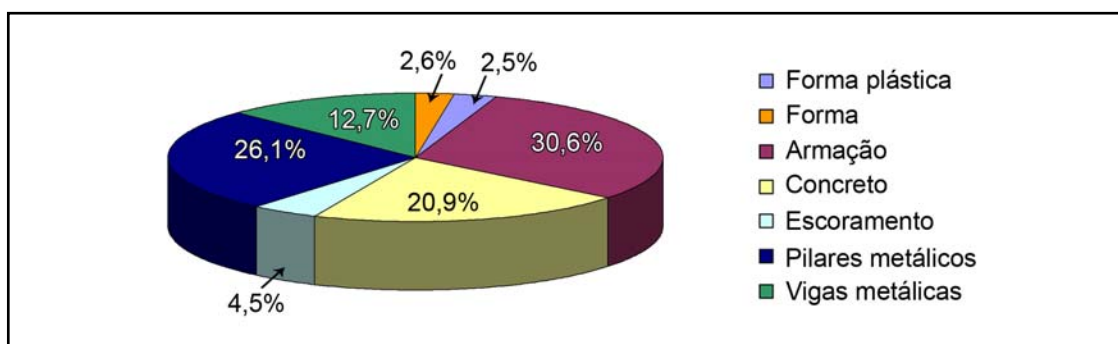


Figura 5.27 – Composição de custo em porcentagem – laje nervurada

Obviamente o custo da estrutura de aço representa um percentual pequeno, quando comparado às demais soluções estruturais. Os custos com a laje aumentaram, mas o custo total desta solução ainda resultou inferior aos custos das soluções com lajes maciça e protendida.

5.2.4 Caso 2 – Laje alveolar

Na Figura 5.28, é apresentado o plano de viga para alternativa estrutural com laje alveolar protendida. Para essa opção, as lajes alveolares utilizadas são painéis de concreto protendido que possuem seção transversal com altura de 16 cm (Figura 5.29) e alvéolos longitudinais que promovem a redução do peso da peça que neste caso é de 250kg/m². Os painéis protendidos são produzidos em concreto de alto desempenho com resistência característica a compressão de C45 e com aços para protensão, na largura de 124,5 cm.

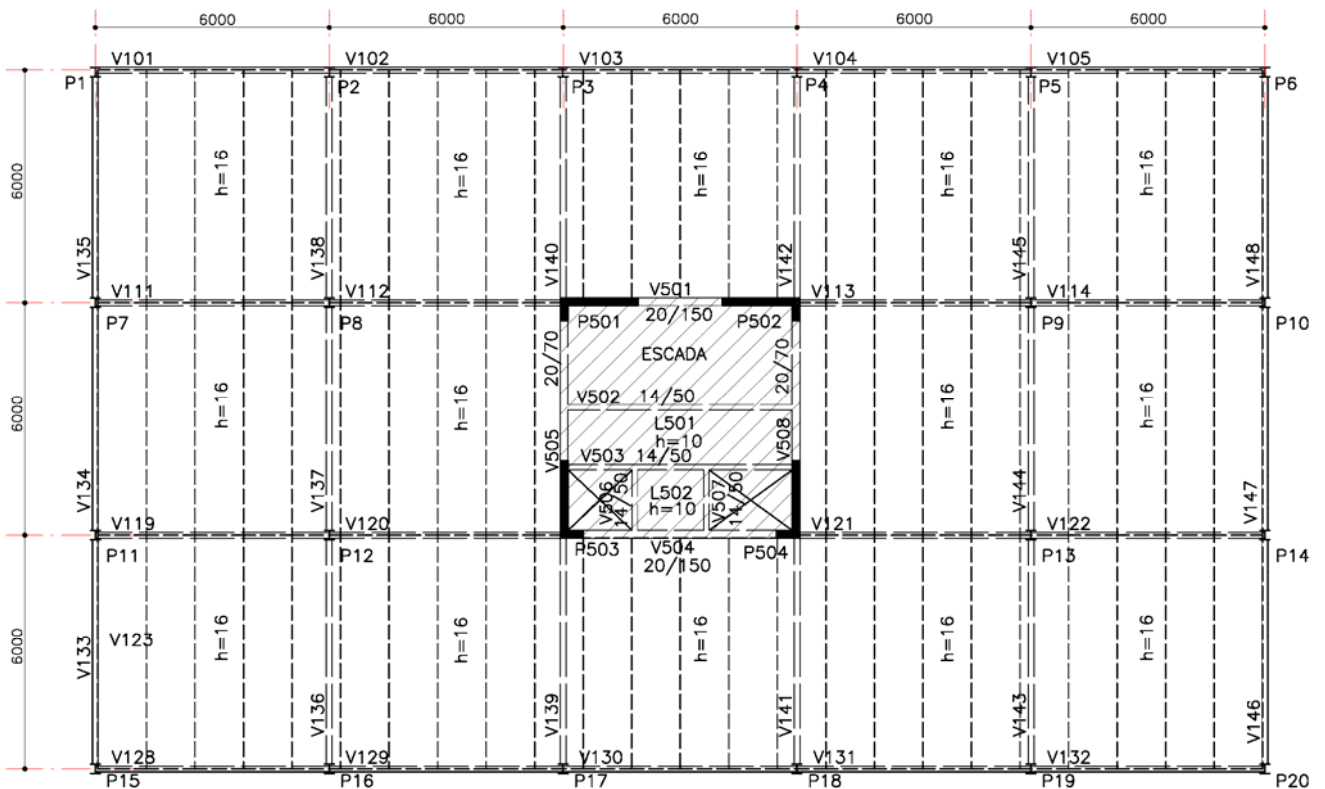


Figura 5.28 – Plano de vigas – laje alveolar

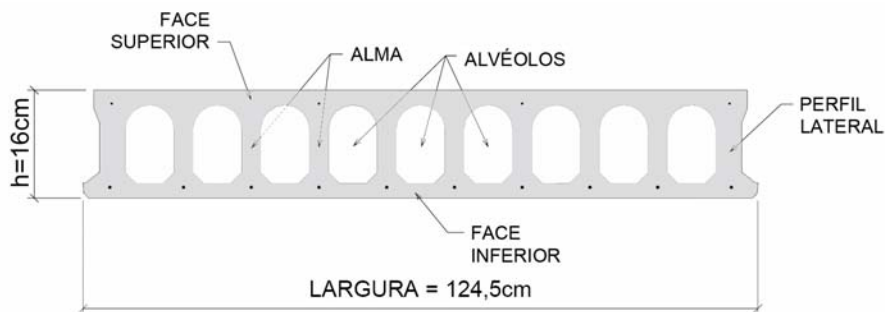


Figura 5.29 – Painéis alveolares (Fonte: www.tatu.com.br)

Na Tabela 5.14, estão apresentados os esforços nos pilares obtidos da análise estrutural e as seções finais dimensionadas. Para a laje alveolar, manteve-se o núcleo rígido como sistemas resistentes às ações laterais, e os pilares estão submetidos apenas à compressão simples e para o dimensionamento podem ser considerados birrotulados.

Tabela 5.14 – Esforços nos pilares e dimensionamento – laje alveolar

Pilares P1=P6=P15=P20 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	940	820	700	580	470	350	230	120
Perfil	CS 250x52							
Pilares P2=P3=P4=P5=P16=P17=P18=P19 (8x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1590	1390	1200	990	800	590	390	200
Perfil	CS 250x76		CS 250x52					
Pilares P7=P10=P11=P14 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	2080	1830	1560	1300	1040	780	520	260
Perfil	CS 300x95			CS 250x52				
Pilares P8=P9=P12=P13 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	2330	2040	1750	1460	1160	870	580	290
Perfil	CS 300x95			CS 250x52				

Para essa opção com laje alveolar, todas as ligações viga-pilar são flexíveis e consequentemente todas as vigas são birrotuladas. Não foi considerada a viga mista, pois exigiria um chanfro nos painéis alveolares para proporcionar a ligação laje-viga. Isto alteraria a produção dos painéis de laje, elevando os custos de produção. Esse aumento nos custos de produção poderia ser compensado com a redução no peso de vigas e pilares de aço, porém essa alternativa não foi investigada neste trabalho.

A seguir na Tabela 5.15, são apresentados os momentos de cálculo nas vigas e as seções dimensionadas.

Tabela 5.15 – Momentos nas vigas e dimensionamento – laje alveolar

Viga Logintudinal de BORDA 10x	V101=V102=V103=V104=V105=V128=V129=V130=V131=V132						
	Md (kNcm)	14630	Perfil	VS 400x49	N.Conectores	X	16 mm
Viga Logintudinal INTERNA 8x	V111=V112=V113=V114=V119=V120=V121=V122						
	Md (kNcm)	20850	Perfil	VS 400x49	N.Conectores	X	16 mm
Viga Transversal BORDA 6x	V133=V134=V135=V146=V147=V148						
	Md (kNcm)	2460	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	X	16 mm
Viga Transversal INTERNA 10x	V136=V137=V138=V139=V140=V141=V142=V143=V144=V145						
	Md (kNcm)	2460	Perfil	VS 250x21	N.Conectores	X	16 mm

O processo de montagem da laje alveolar exige guindaste na obra, desde o recebimento dos painéis na obra até a colocação do mesmo nos pavimentos, porém uma equipe de montagem com três operários pode render sem dificuldade a 50 m²/h, que equivale a 400 m² em 8 horas de trabalho, montando praticamente 80% do pavimento tipo em um dia. Na Tabela 5.16, é levantada a planilha de custo para essa solução.

Tabela 5.16 – Planilha de custo – laje alveolar

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total		%	
				Material	Mão Obra	Material	M.Obra		Total
4	Laje Alveolar - Superestrutura					978.808,98	401.676,00	1.380.484,98	100,00
1.	Armação Aço CA-60 (tela p/ fiss- Q-138)	m2	4.032,00	10,14	1,00	40.884,48	4.032,00	44.916,48	3,25
2.	Laje Alveolar Protendida	m2	4.032,00	88,50		356.832,00	-	356.832,00	25,85
3.	Concreto Usinado C25 (capa + rejunte)	m3	202,00	257,25	60,00	51.964,50	12.120,00	64.084,50	4,64
4.	Pilares Metálicos	kg	29.724,00	6,00	3,00	178.344,00	89.172,00	267.516,00	19,38
5.	Vigas metálicas	kg	58.464,00	6,00	3,00	350.784,00	175.392,00	526.176,00	38,12
6.	Mão de obra + equipamentos	m2	4.032,00		30,00	-	120.960,00	120.960,00	8,76

A composição de custo pode ser melhor visualizada no gráfico da Figura 5.30.

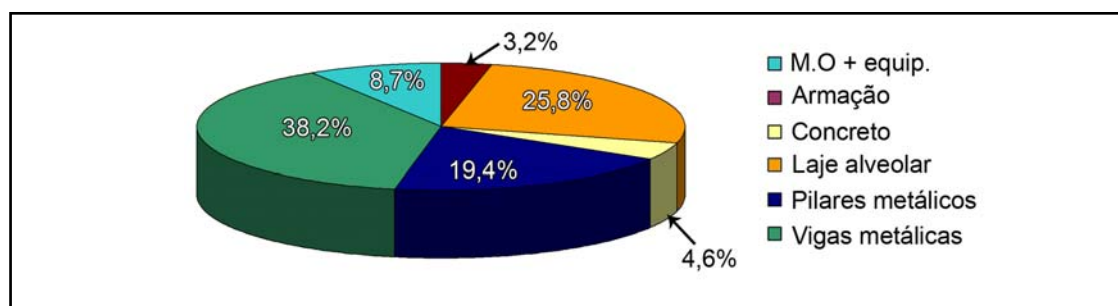


Figura 5.30 – Composição de custo em porcentagem – laje alveolar

Para o sistema com laje alveolar, considerou-se à parte o custo das atividades de apoio, como equipamentos para içamento das peças, mão de obra para executar os serviços de concretagem da capa e colocação das telas, atividades que normalmente são de responsabilidade da construtora.

A combinação da estrutura metálica com a laje alveolar permite total racionalização da obra, reduzindo o tempo de execução, oferecendo maior agilidade no processo produtivo e, por não necessitar de escoramento, permitindo que outras atividades sejam executadas em conjunto.

Na NBR 8800:2008 é comentado que os pilares devem ter travamento nas duas direções, o que se fez necessário foi a colocação das vigas de travamento V136 à V145.

5.2.5 Caso 2 – Laje mista MF-50 e MF-75

Na Figura 5.31 e Figura 5.32, é apresentado respectivamente o plano de viga para alternativa estrutural com laje mista, utilizando as formas da Metform, o *steel deck* MF-50 e o *steel deck* MF-75. O *steel deck* MF-50 conta com a largura útil de 915 mm e com peso próprio de 2,08 KN/m², o *steel deck* MF-75 conta com a largura útil de 820 mm, e com peso próprio de 2,79 KN/m², ambos os produtos são fabricados com o aço especial galvanizado ASTM A653 grau 40.

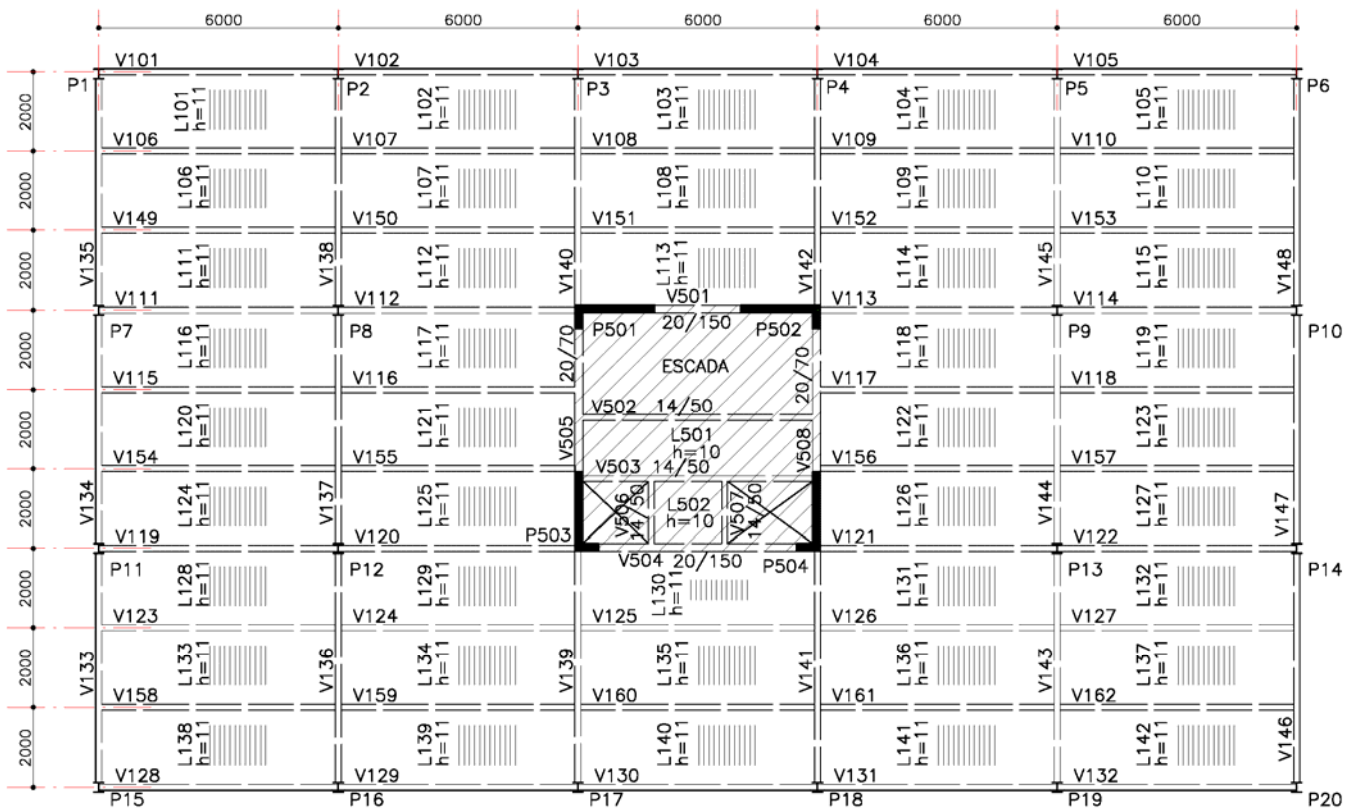


Figura 5.31 – Plano de vigas – laje mista MF-50

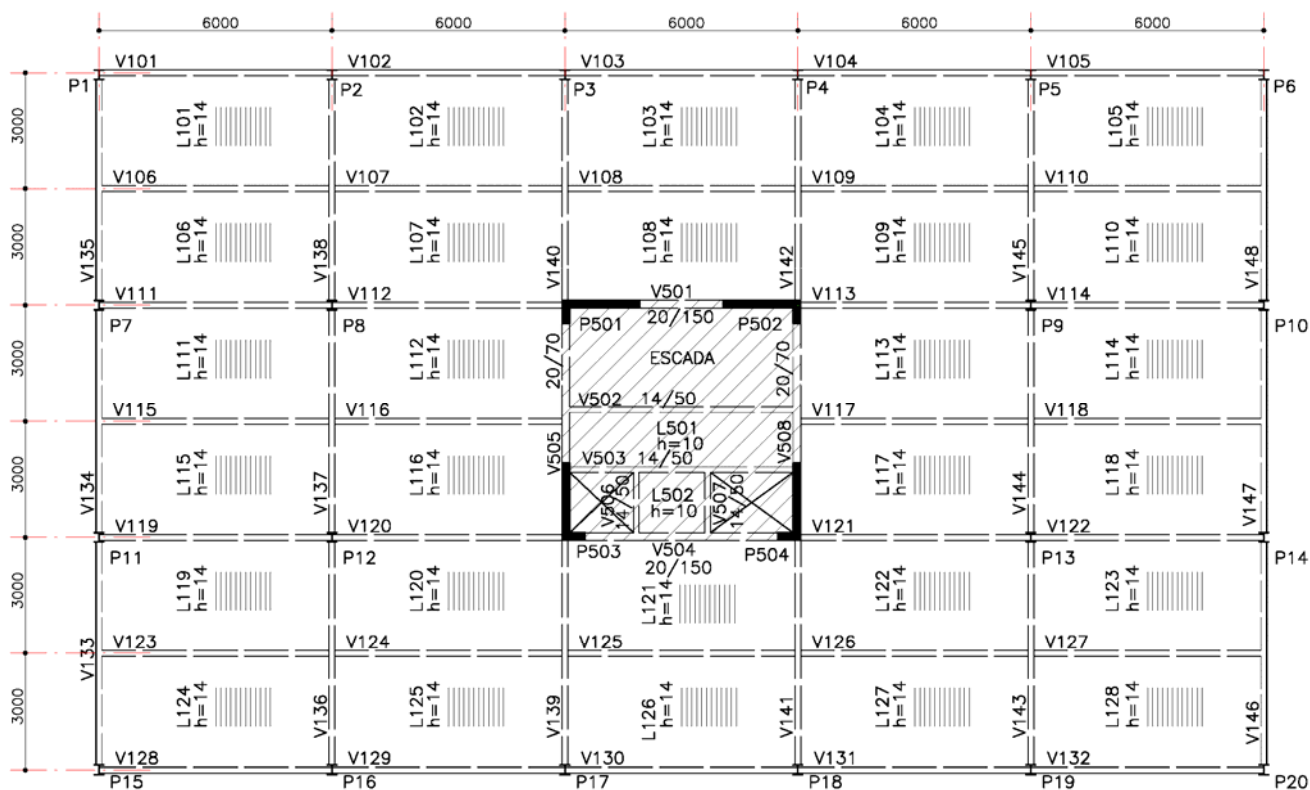


Figura 5.32 – Plano de vigas – laje mista MF-75

Nota-se que, para o plano de vigas do *steel deck* MF-50, foram necessárias mais vigas para dispensar a utilização de escoramento na laje, e apenas as vigas metálicas foram escoradas.

Como premissa foi utilizado o núcleo rígido como sistema resistente às ações laterais. Os pilares são submetidos apenas à compressão simples e são birrotulados, os esforços e dimensionamento estão apresentados, na Tabela 5.17, para o *steel deck* MF-50 e, na Tabela 5.18, os resultados para o *steel deck* MF-75.

Tabela 5.17 – Esforços nos pilares e dimensionamento – *steel deck* MF-50

Pilares P1=P6=P15=P20 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	860	750	640	540	430	320	210	110
Perfil	CS 250x52							
Pilares P2=P3=P4=P5=P16=P17=P18=P19 (8x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1510	1320	1130	940	750	560	380	190
Perfil	CS 250x76		CS 250x52					
Pilares P7=P10=P11=P14 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1410	1240	1060	880	700	530	350	180
Perfil	CS 250x76		CS 250x52					
Pilares P8=P9=P12=P13 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	2290	2000	1710	1430	1140	860	570	290
Perfil	CS 300x76		CS 250x76		CS 250x52			

Tabela 5.18 – Esforços nos pilares e dimensionamento – *steel deck* MF-75

Pilares P1=P6=P15=P20 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	870	760	650	540	430	320	210	110
Perfil	CS 250x52							
Pilares P2=P3=P4=P5=P16=P17=P18=P19 (8x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1630	1430	1220	1020	820	610	410	200
Perfil	CS 250x76		CS 250x52					
Pilares P7=P10=P11=P14 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	1510	1320	1130	940	760	570	380	190
Perfil	CS 250x76		CS 250x52					
Pilares P8=P9=P12=P13 (4x)								
Pav.	1	2	3	4	5	6	7	8
Normal (kN)	2490	2180	1870	1110	1250	940	620	310
Perfil	CS 300x76			CS 250x52				

As ligações entre viga-pilar foram consideradas flexíveis, permitindo o dimensionamento de vigas simplesmente apoiadas. Para o sistema de laje mista, adotou-se o procedimento de construção escorada, o elemento estrutural entra em serviço somente após a cura do concreto (resistência superior a 75% de f_{ck}), ou seja, após a retirada do escoramento das vigas e o desenvolvimento da ação conjunta, quando todas as cargas são suportadas pela seção mista.

Na Tabela 5.19 e Tabela 5.20, são apresentados os momentos de cálculo nas vigas e as seções dimensionadas, para as duas opções de laje mista. O dimensionamento das vigas foi feito segundo o procedimento da NBR 8800:2008 com o auxílio das planilhas do Anexo 1.

Tabela 5.19 – Momentos nas vigas e dimensionamento - *steel deck* MF-50

Viga Logintudinal de BORDA 10x	V101=V102=V103=V104=V105=V128=V129 =V130 =V131 =V132						
	Md (kNcm)	6310	Perfil	W 150x13	N.Conectores	20	16 mm
Viga Logintudinal INTERNA 36x	V106=V107=V108=V109=V110=V111=V112=V113=V114=V115=V116=V117 =V118=V119=V120=V121=V122=V123=V124=V125=V126=V127 =V149=V150 =V151=V152=V153=V154=V155=V156=V157=V158 =V159=V160=V161=V162						
	Md (kNcm)	7000	Perfil	W 150x13	N.Conectores	20	16 mm
Viga Transversal BORDA 6x	V133=V134=V135=V146=V147=V148						
	Md (kNcm)	10480	Perfil	W 200x15	N.Conectores	16	16 mm
Viga Transversal INTERNA 10x	V136=V137=V138=V139=V140=V141=V142= V143=V144=V145						
	Md (kNcm)	16160	Perfil	W 310x21	N.Conectores	28	16 mm

Tabela 5.20 – Momentos nas vigas e dimensionamento - *steel deck* MF-75

Viga Logintudinal de BORDA 10x	V101=V102=V103=V104=V105=V128=V129 =V130 =V131 =V132						
	Md (kNcm)	8160	Perfil	W 200x15	N.Conectores	20	16 mm
Viga Logintudinal INTERNA 22x	V106=V107=V108=V109=V110=V111=V112=V113=V114=V115=V116=V117 =V118=V119=V120=V121=V122=V123=V124=V125=V126=V127						
	Md (kNcm)	9670	Perfil	W 200x15	N.Conectores	20	16 mm
Viga Transversal BORDA 6x	V133=V134=V135=V146=V147=V148						
	Md (kNcm)	11560	Perfil	W 310x21	N.Conectores	28	16 mm
Viga Transversal INTERNA 10x	V136=V137=V138=V139=V140=V141=V142= V143=V144=V145						
	Md (kNcm)	18020	Perfil	W 310x21	N.Conectores	28	16 mm

O processo de montagem da laje *steel deck* inicia-se após a montagem das vigas metálicas; os fardos são içados e os painéis retirados manualmente e posicionados sobre as vigas, conforme o projeto de paginação, tomando o cuidado para não montá-lo invertido. Os recortes no contorno dos pilares são feitos mediante o uso de máquinas com disco para corte de metal. A fixação dos painéis é garantida com a solda do *stud bolts*. Posicionam-se as telas Q-75 na parte superior da laje e faz-se a concretagem com cautela, evitando o acúmulo de materiais e profissionais sobre os painéis.

Nas Tabelas 5.21 e 5.22, são apresentadas respectivamente as planilhas de custo para o *steel deck* MF-50 e para o *steel deck* MF-75.

Tabelas 5.21 – Planilha de custo – *steel deck* MF-50

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total		%	
				Material	Mão Obra	Material	M.Obra		Total
5	Laje mista MF-50 - Superestrutura					694.488,90	288.561,60	983.050,50	100,00
1.	Armação Aço CA-60 (tela pl fiss- Q-75)	m2	4.032,00	5,03	1,00	20.280,96	4.032,00	24.312,96	2,47
2.	Concreto Usinado C25	m3	344,00	257,25	60,00	88.494,00	20.640,00	109.134,00	11,10
3.	Escoramento das vigas	un.	62,00	33,27	6,00	2.062,74	372,00	2.434,74	0,25
4.	<i>Steel deck</i>	m2	4.032,00	36,60		147.571,20	-	147.571,20	15,01
5.	Pilares metálicos	kg	27.840,00	6,00	3,00	167.040,00	83.520,00	250.560,00	25,49
6.	Vigas metálicas	kg	44.140,00	6,00	3,00	264.840,00	132.420,00	397.260,00	40,41
7.	Mobilização montagem do <i>steel deck</i>	vb	1,00	1.900,00		1.900,00	-	1.900,00	0,19
8.	Mobilização máquina <i>stud bolt</i>	vb	1,00	2.300,00		2.300,00	-	2.300,00	0,23
9.	Mão de obra de montagem do <i>steel deck</i>	m2	4.032,00		11,80	-	47.577,60	47.577,60	4,84

A Figura 5.33 representa o custo da laje mista *steel deck* MF-50 em gráfico.

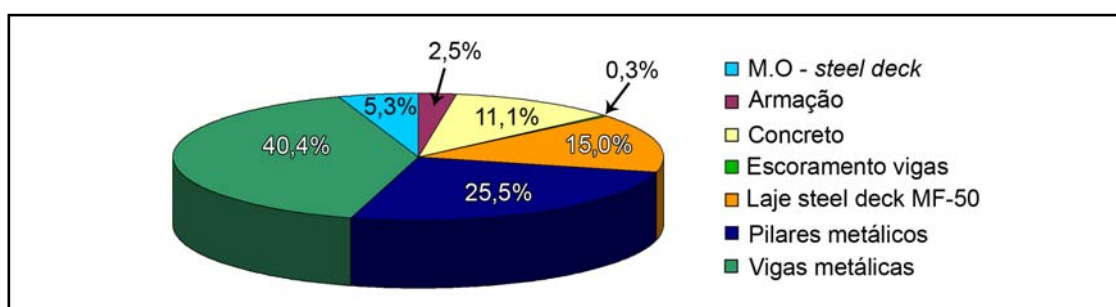


Figura 5.33 – Composição de custo em porcentagem – laje mista *steel deck* MF-50

A laje mista *steel deck* MF-50, apesar de ter um número maior de vigas, para eliminar o escoramento da laje, assim mesmo apresentou um custo inferior às demais lajes utilizadas.

Tabelas 5.22 – Planilha de custo – *steel deck* MF-75

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total		%	
				Material	Mão Obra	Material	M.Obra		
6	Laje mista MF-75 - Superestrutura					703.197,48	279.603,60	982.801,08	100,00
1.	Armação Aço CA-60 (tela p/ fiss- Q-75)	m2	4.032,00	5,03	1,00	20.280,96	4.032,00	24.312,96	2,47
2.	Concreto Usinado C25	m3	416,00	257,25	60,00	107.016,00	24.960,00	131.976,00	13,43
3.	Escoramento das vigas	un.	44,00	33,03	6,00	1.453,32	264,00	1.717,32	0,17
4.	<i>Steel deck</i>	m2	4.032,00	40,85		164.707,20	-	164.707,20	16,76
5.	Pilares metálicos	kg	27.552,00	6,00	3,00	165.312,00	82.656,00	247.968,00	25,23
6.	Vigas metálicas	kg	40.038,00	6,00	3,00	240.228,00	120.114,00	360.342,00	36,66
7.	Mobilização montagem do <i>steel deck</i>	vb	1,00	1.900,00		1.900,00	-	1.900,00	0,19
8.	Mobilização máquina <i>stud bolt</i>	vb	1,00	2.300,00		2.300,00	-	2.300,00	0,23
9.	Mão de obra de montagem do <i>steel deck</i>	m2	4.032,00		11,80	-	47.577,60	47.577,60	4,84

O gráfico da Figura 5.34 ilustra o custo da laje mista *steel deck* MF-75 em gráfico.

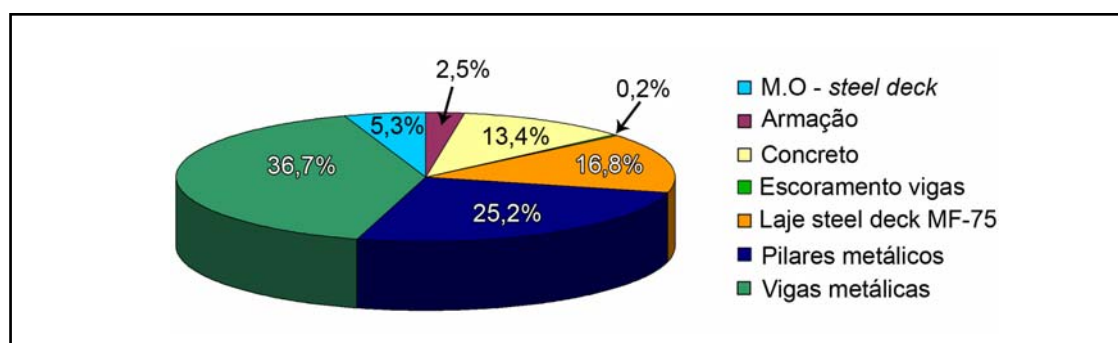


Figura 5.34 – Composição de custo em porcentagem – laje mista *steel deck* MF-75

Dentre todos os sistemas de laje apresentados, a solução com *steel deck* MF-75 apresentou o menor custo total, em percentuais pode-se afirmar que as duas opções de laje com *steel deck* obtiveram o mesmo resultado, o *steel deck* MF-50 teve um custo total de 0,03% maior que o *steel deck* MF-75.

5.2.6 Comparação de resultados

Neste item são analisados, de forma comparativa, os resultados de custos obtidos para cada uma das soluções estruturais adotadas para o estudo de caso 2.

No gráfico da Figura 5.35, são apresentados os custos de mão de obra, de materiais e custo total, para as soluções estudadas.

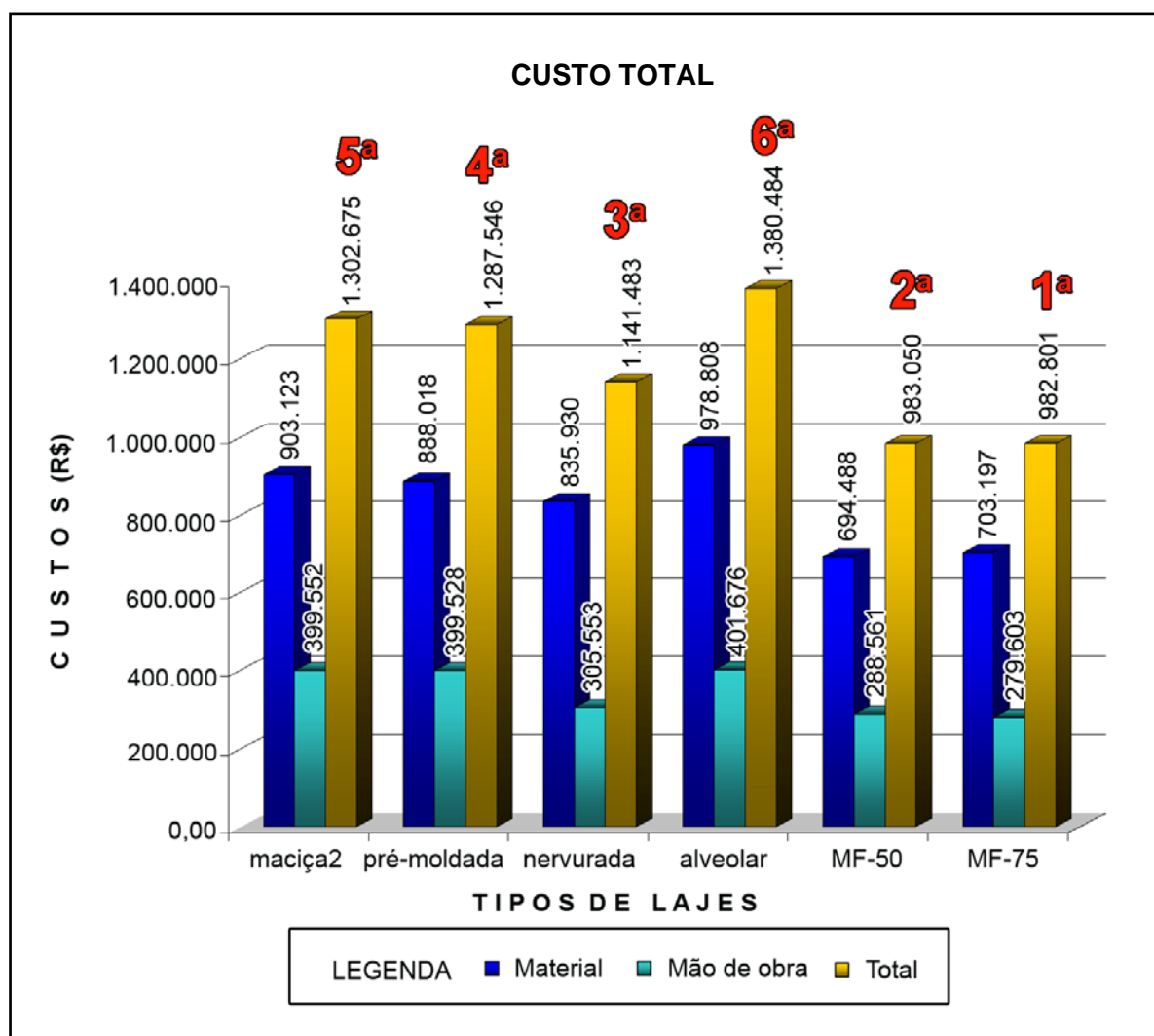


Figura 5.35 – Composição - custos de materiais, mão de obra e custo total

Na Tabela 5.23, podem ser verificadas numericamente as diferenças de custos para as soluções estruturais adotadas para o caso 2.

Tabelas 5.23 – Planilha de custo geral com todas as lajes

Item	Descrição	Un	Quant.	Unitário		Total			%	custo por m2
				Material	Mão Obra	Material	M.Obra	Total		
1B	Laje Maciça 2 - Superestrutura					903.123,12	399.552,00	1.302.675,12	100,00	
1.	Forma chapa resinada 12mm	m2	4.032,00	15,26	20,00	61.528,32	80.640,00	142.168,32	10,91	301,55
2.	Amiação Aço CA-50	kg	24.000,00	4,10	1,00	98.400,00	24.000,00	122.400,00	9,40	
3.	Concreto Usinado C25	m3	408,00	257,25	60,00	104.958,00	24.480,00	129.438,00	9,94	
4.	Escoramento	m2	4.032,00	5,63	6,00	22.700,16	24.192,00	46.892,16	3,60	
5.	Pilares Metálicos	Kg	29.520,00	6,00	3,00	177.120,00	88.560,00	265.680,00	20,39	
6.	Vigas metálicas	kg	52.560,00	6,00	3,00	315.360,00	157.680,00	473.040,00	36,31	
7.	Acréscimo de forma para acompanhar steel Deck	Kg	4.032,00	30,52		123.056,64	-	123.056,64	9,45	
2	Laje pré-moldada protendidos - Superestrutura					888.018,84	399.528,00	1.287.546,84	100,00	
1.	Amiação Aço CA-60 (tela pl/ fis-s- Q-61)	m2	4.032,00	4,01	1,00	16.168,32	4.032,00	20.200,32	1,57	298,04
2.	Concreto Usinado C25	m3	204,00	257,25	60,00	52.479,00	12.240,00	64.719,00	5,03	
3.	Laje pré moldada protendida	m2	4.032,00	33,11	10,00	133.499,52	40.320,00	173.819,52	13,50	
4.	Pilares metálicos	kg	28.296,00	6,00	3,00	169.776,00	84.888,00	254.664,00	19,78	
5.	Vigas metálicas	kg	86.016,00	6,00	3,00	516.096,00	258.048,00	774.144,00	60,13	
3	Laje Nervurada - Superestrutura					835.930,04	305.553,60	1.141.483,64	100,00	
1.	Forma 1 - Caçambas (472unX7dias/lajeX8lajes)	un.	26.432,00	0,80	0,30	21.145,60	7.929,60	29.075,20	2,55	264,23
2.	Forma chapa resinada 12mm	m2	850,00	15,26	20,00	12.971,00	17.000,00	29.971,00	2,63	
3.	Amiação Aço CA-60 (tela pl/ fis-s- Q-138)	m2	4.032,00	10,14	1,00	40.884,48	4.032,00	44.916,48	3,93	
4.	Concreto Usinado C25	m3	752,00	257,25	60,00	193.452,00	45.120,00	238.572,00	20,90	
5.	Amiação Aço CA-50	kg	59.608,00	4,10	1,00	244.392,80	59.608,00	304.000,80	26,63	
6.	Escoramento	m2	4.032,00	6,88	6,00	27.740,16	24.192,00	51.932,16	4,55	
7.	Pilares metálicos	kg	33.096,00	6,00	3,00	198.576,00	99.288,00	297.864,00	26,09	
8.	Vigas metálicas	kg	16.128,00	6,00	3,00	96.768,00	48.384,00	145.152,00	12,72	
4	Laje Alveolar - Superestrutura					978.808,98	401.676,00	1.380.484,98	100,00	
1.	Amiação Aço CA-60 (tela pl/ fis-s- Q-138)	m2	4.032,00	10,14	1,00	40.884,48	4.032,00	44.916,48	3,25	319,56
2.	Laje Alveolar Protendida	m2	4.032,00	88,50		356.832,00	-	356.832,00	25,85	
3.	Concreto Usinado C25 (capa + rejunte)	m3	202,00	257,25	60,00	51.964,50	12.120,00	64.084,50	4,64	
4.	Pilares metálicos	kg	29.724,00	6,00	3,00	178.344,00	89.172,00	267.516,00	19,38	
5.	Vigas metálicas	kg	58.464,00	6,00	3,00	350.784,00	175.392,00	526.176,00	38,12	
6.	Mão de obra + equipamentos	m2	4.032,00		30,00	-	120.960,00	120.960,00	8,76	
5	Laje mista MF-50 - Superestrutura					694.488,90	288.561,60	983.050,50	100,00	
1.	Amiação Aço CA-60 (tela pl/ fis-s- Q-75)	m2	4.032,00	5,03	1,00	20.280,96	4.032,00	24.312,96	2,47	227,56
2.	Concreto Usinado C25	m3	344,00	257,25	60,00	88.494,00	20.640,00	109.134,00	11,10	
3.	Escoramento das vigas	un.	62,00	33,27	6,00	2.062,74	372,00	2.434,74	0,25	
4.	Steel Deck	m2	4.032,00	36,60		147.571,20	-	147.571,20	15,01	
5.	Pilares metálicos	kg	27.840,00	6,00	3,00	167.040,00	83.520,00	250.560,00	25,49	
6.	Vigas metálicas	kg	44.140,00	6,00	3,00	264.840,00	132.420,00	397.260,00	40,41	
7.	Mobilização montagem do steel deck	vb	1,00	1.900,00		1.900,00	-	1.900,00	0,19	
8.	Mobilização máquina stud bolt	vb	1,00	2.300,00		2.300,00	-	2.300,00	0,23	
9.	Mão de obra de montagem do steel deck	m2	4.032,00		11,80	-	47.577,60	47.577,60	4,84	
6	Laje mista MF-75 - Superestrutura					703.197,48	279.603,60	982.801,08	100,00	
1.	Amiação Aço CA-60 (tela pl/ fis-s- Q-75)	m2	4.032,00	5,03	1,00	20.280,96	4.032,00	24.312,96	2,47	227,50
2.	Concreto Usinado C25	m3	416,00	257,25	60,00	107.016,00	24.960,00	131.976,00	13,43	
3.	Escoramento das vigas	un.	44,00	33,03	6,00	1.453,32	264,00	1.717,32	0,17	
4.	Steel Deck	m2	4.032,00	40,85		164.707,20	-	164.707,20	16,76	
5.	Pilares metálicos	kg	27.552,00	6,00	3,00	165.312,00	82.656,00	247.968,00	25,23	
6.	Vigas metálicas	kg	40.038,00	6,00	3,00	240.228,00	120.114,00	360.342,00	36,66	
7.	Mobilização montagem do steel deck	vb	1,00	1.900,00		1.900,00	-	1.900,00	0,19	
8.	Mobilização máquina stud bolt	vb	1,00	2.300,00		2.300,00	-	2.300,00	0,23	
9.	Mão de obra de montagem do steel deck	m2	4.032,00		11,80	-	47.577,60	47.577,60	4,84	

Os dados utilizados para a composição de custo são referentes a janeiro de 2009 na região de Ribeirão Preto – SP, os resultados refletem uma situação momentânea que pode ser alterada devido a economia do país.

Como se pode perceber a solução de menor custo foi com a laje mista *steel deck* MF-75 que apresentou custo praticamente igual à solução com lajes mistas *steel deck* MF-50. A laje nervurada apresentou a terceira solução com menor custo, reduzindo significativamente o percentual com estrutura metálica em relação ao *steel deck*.

Na estrutura com laje pré-moldada, as vigas foram dimensionadas com vigas de aço isolada, em consequência disto o percentual da estrutura de aço chegou a 79,9%, fazendo com que esta solução fosse a quarta em termos de custos entre as alternativas analisadas. Provavelmente se a viga fosse dimensionada como viga mista, o custo da estrutura de aço reduziria, no entanto aumentaria o custo com forma e escoramento; além de dificuldades construtivas adicionais.

Pode-se avaliar que a laje maciça, estrutura mais convencional, tem o segundo custo maior com mão de obra, perdendo apenas para a laje alveolar, em relação à laje *steel deck* MF-75 o custo da mão de obra está 42% maior.

Entre as duas lajes que apresentam a maior racionalização do processo construtivo, a laje alveolar e a laje *steel deck* MF-75, para este estudo, a solução com laje alveolar apresentou um custo superior de 40,46%.

Nos gráficos das figuras subsequentes, é analisada a composição de custos dos itens isolados. Na Figura 5.36, são apresentados os gráficos para os custos do aço, envolvendo mão de obra com a montagem das armações e colocação das telas e o custo do material.

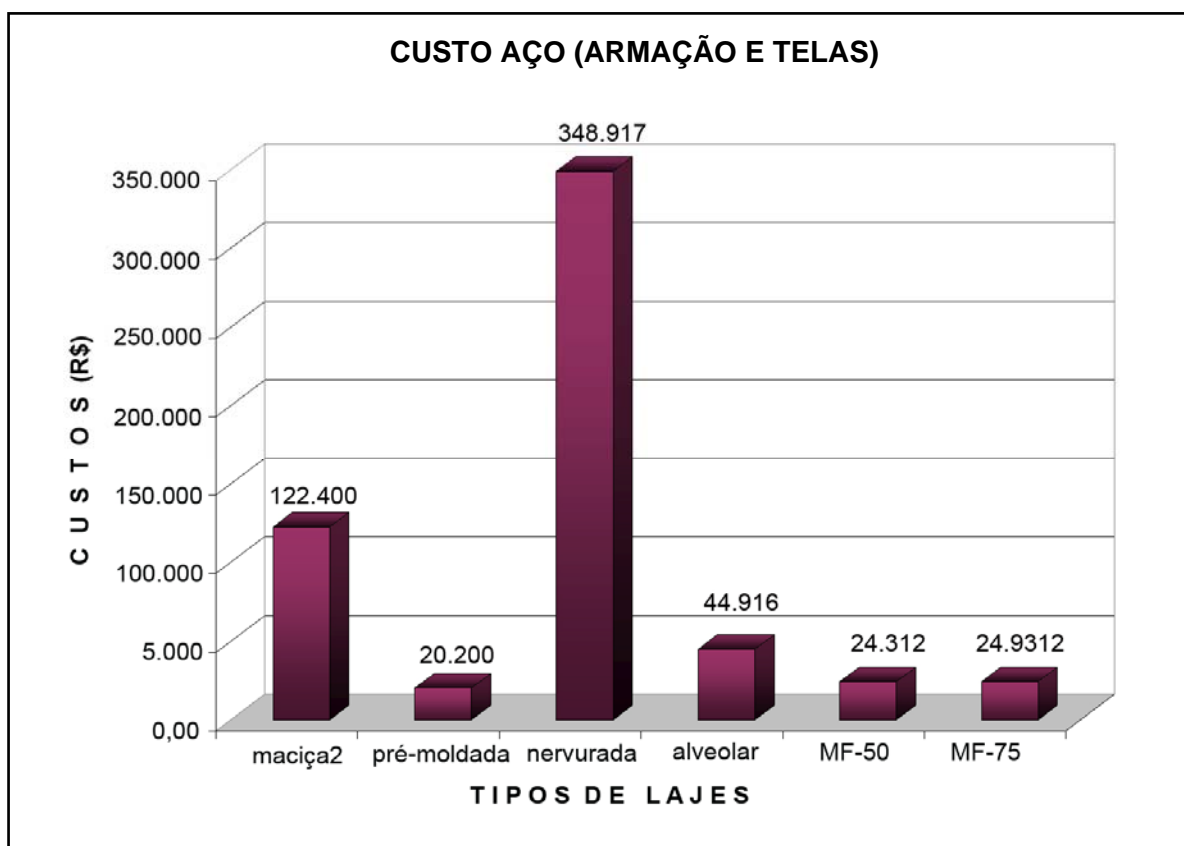


Figura 5.36 – Composição – custo aço (armação e telas)

Na Figura 5.31, o custo com armação é predominante na solução com laje nervurada, opção onde a estrutura metálica foi reduzida, trabalhando-se apenas com vigas nas bordas. A laje maciça também apresentou elevado custo em relação às outras soluções, pelo fato das outras opções trabalharem apenas com telas para a concretagem do capeamento.

No gráfico da Figura 5.37, são apresentados os custos do volume de concreto para cada tipo de laje.

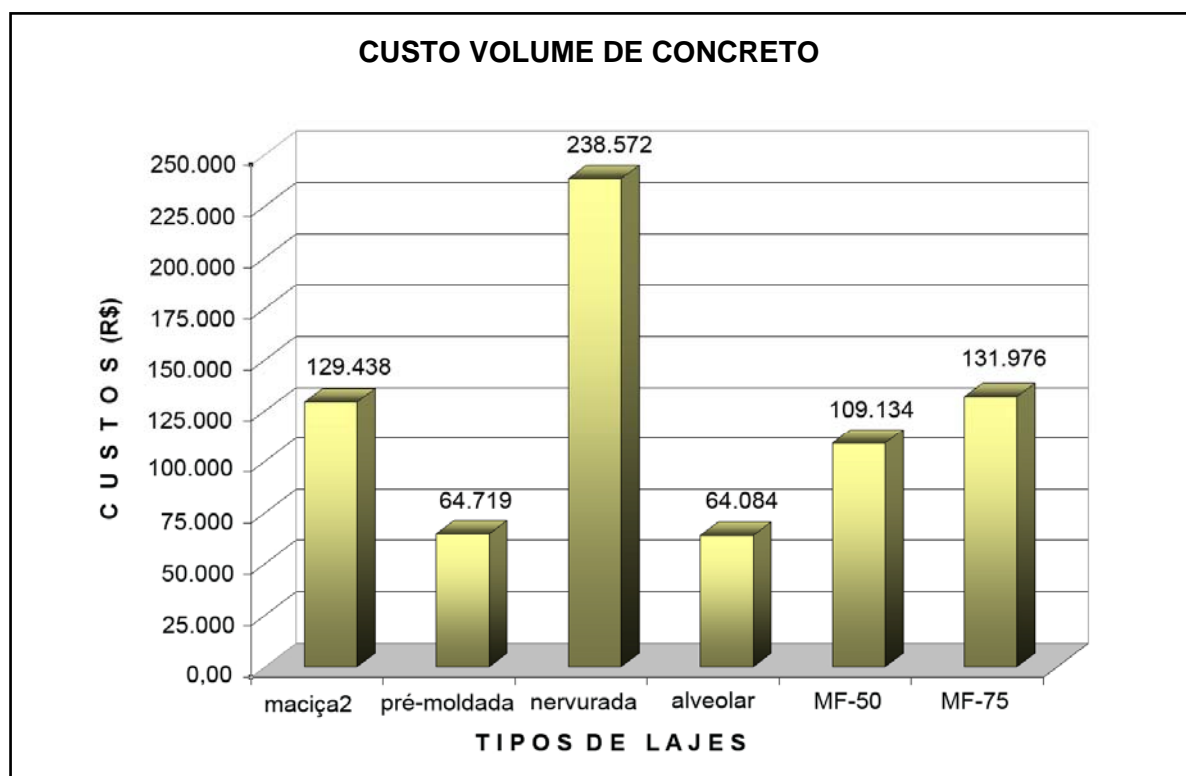


Figura 5.37 – Composição – custo volume de concreto

Na Figura 5.37, o custo com o volume de concreto foi mais significativo na laje nervurada, isso aconteceu devido à redução de vigas e à espessura maior da laje, a solução com *steel deck* MF-75 que apresentou o menor custo total tem o segundo maior custo de volume de concreto. A laje alveolar que apresentou o menor custo de volume de concreto utiliza a capa de concreto para duas funções: função estrutural contribuindo na resistência final, formando um sistema monolítico que proporciona melhor distribuição dos esforços entre os painéis e também como função de acabamento, nivelando a laje e deixando-a pronta para receber o piso.

No gráfico da Figura 5.38, são apresentados os custos com escoramento.

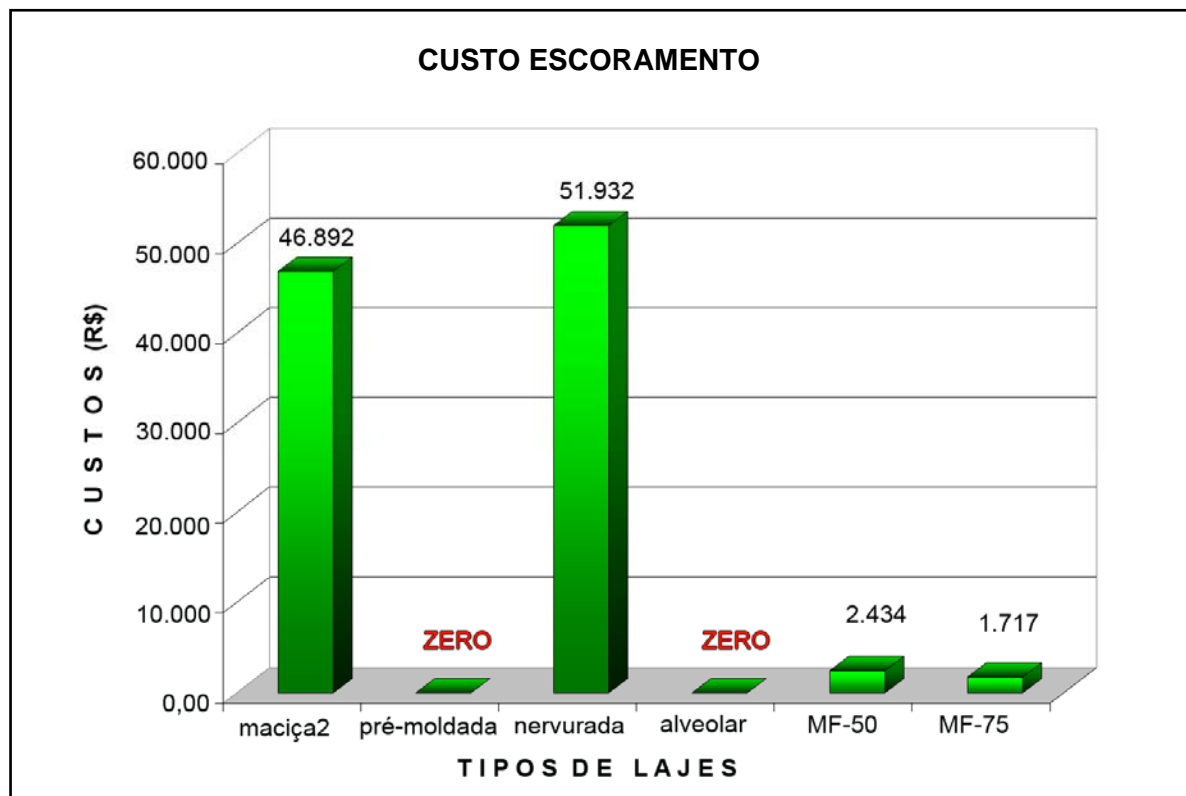


Figura 5.38 – Composição – custo escoramento

A laje nervurada apresenta, no gráfico da Figura 5.38, o maior custo com escoramento, seguido da laje maciça com uma diferença de quase 11%. As lajes pré-moldada e alveolar não utilizaram escoramento, e as vigas foram dimensionadas como viga de aço isolada. Na solução com *steel deck*, o custo com escoramento foi muito baixo, somente as vigas foram escoradas, pois foi considerada para dimensionamento construção escorada, isto é, as mesmas só podem ser solicitadas como vigas mistas após a cura da laje.

A Figura 5.39 ilustra o custo com a estrutura metálica.

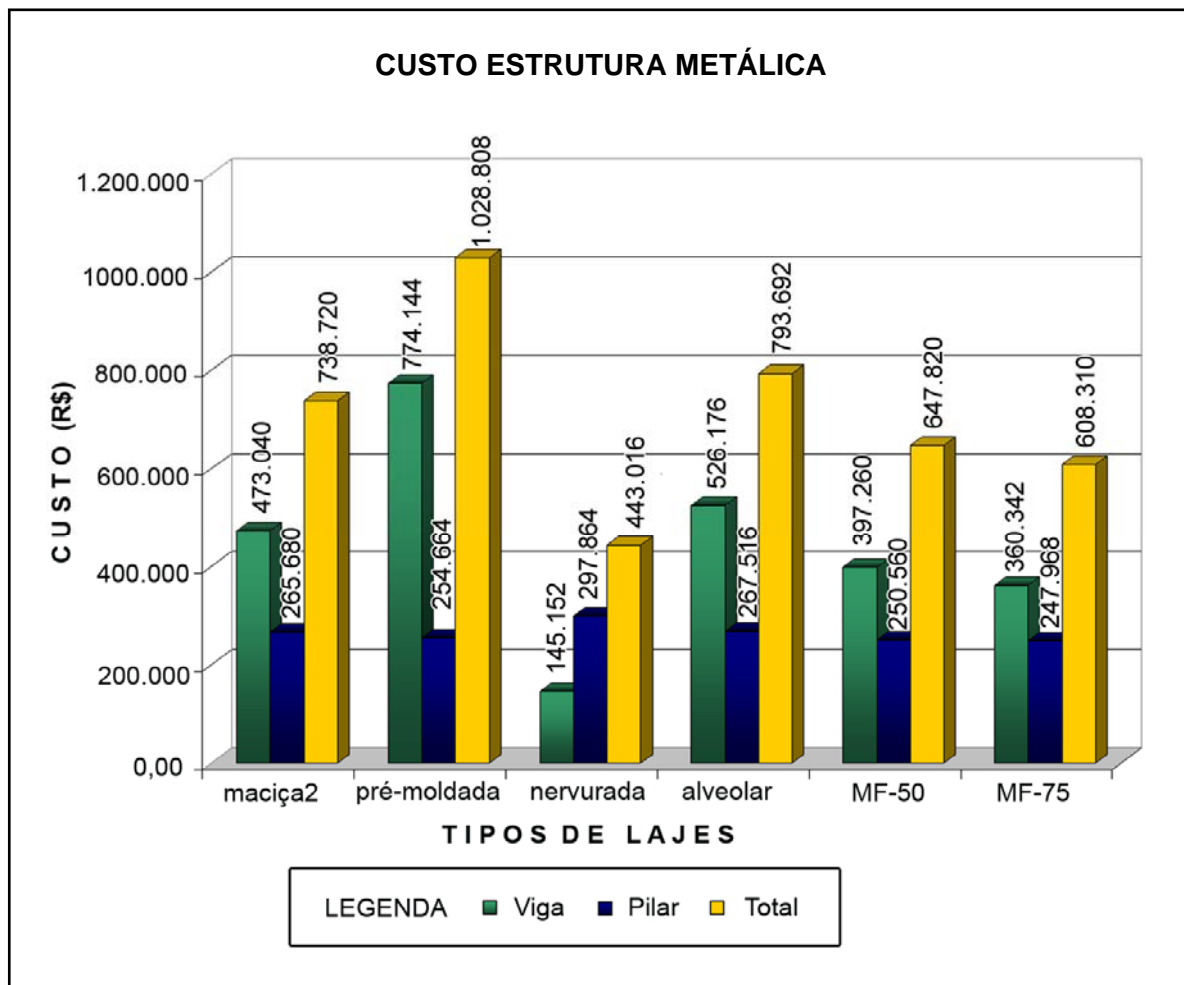


Figura 5.39 – Composição – estrutura metálica

Tirando a laje nervurada, onde eliminaram-se as vigas internas, o custo da estrutura metálica, vigas e pilares está entre 56,7% e 79,9%. O índice de 79,9% aconteceu na laje pré-moldada onde as vigas foram dimensionadas como vigas isoladas.

Conforme mostra na Figura 5.39, o sistema que teve o menor custo com a estrutura metálica foi a laje *steel deck* MF-75, porém analisando as lajes onde foram consideradas vigas mistas (laje maciça, *steel deck* MF-50 e *steel deck* MF-75) percebe-se que o custo da estrutura metálica não varia significativamente. No caso da laje alveolar, deve-se levar em conta o aumento do custo, devido às vigas de travamento (V136 a V145).

5.2.7 Conclusão caso 2

Para o estudo do caso 2, analisaram-se seis sistemas de laje, considerando um cronograma com prazo curto para a execução da estrutura, as lajes que precisaram de escoramento, como a laje maciça e nervurada, necessitaram de escoramento e formas adicionais para acompanhar o ritmo de montagem e concretagem das demais lajes.

A avaliação, feita no caso 2, mostrou que a laje mista com *steel deck* MF-75 apresentou o menor custo total, o dimensionamento dessa estrutura contou com a utilização eficiente dos materiais estruturais, aço e concreto. Esta associação entre o perfil de aço e a estrutura de concreto, denominada estrutura mista, apresentou uma vantagem econômica substancial em relação a outros sistemas de laje. O gráfico da Figura 5.40 ilustra a diferença em porcentagem entre as soluções estudadas, tendo como base a solução de menor custo que é a laje mista *steel deck* MF-75.

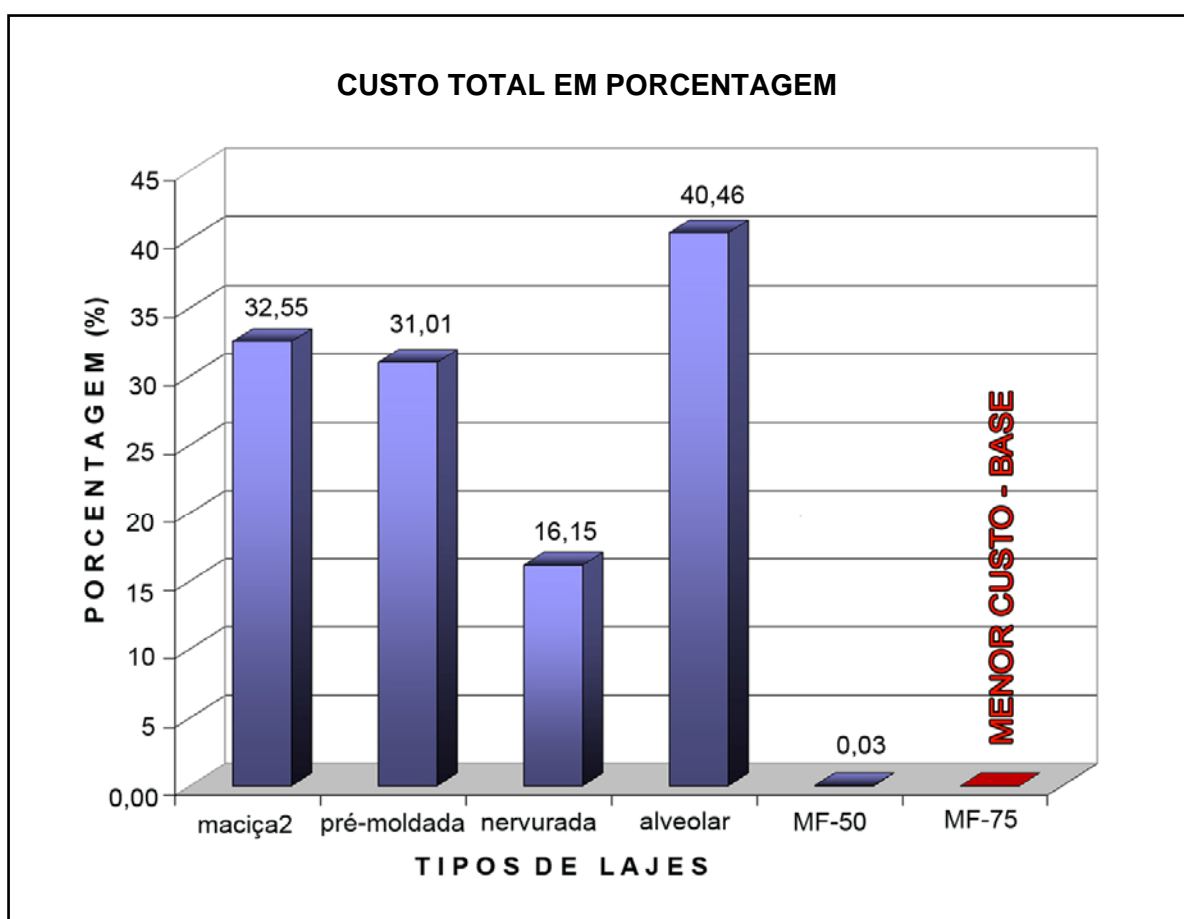


Figura 5.40 – Custo total em porcentagem

Na Figura 5.40, tomou-se como base a laje com o menor custo, laje mista *steel deck* MF-75 e, balizando-se por esta, apresentou a diferença de custo em porcentagem. Nota-se que, na laje alveolar, o custo total da estrutura é 40% maior. Já laje maciça tradicional é 32% mais cara que a solução com laje mista aço-concreto. Na laje maciça, mesmo se utilizando das vigas mistas, não houve um diferencial no custo total, isso se deve ao elevado custo de forma, pois até mesmo o custo do volume de concreto das lajes mistas são maiores.

A laje pré-moldada não teve o custo reduzido por não considerar as vigas como mista, nos outros itens, como volume de concreto, armação, vigotas e lajotas, apresentou um desempenho significativo e superior às lajes mistas.

Conclui-se que a combinação aço-concreto nas vigas mistas apresentou vantagens em relação ao dimensionamento das vigas de aço isolada, e a opção por sistemas de lajes mista sem forma e sem escoramento apresentou o melhor custo.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi feito um estudo com vários sistemas de laje para estrutura metálica. Na revisão bibliográfica, apresentaram-se as vantagens e desvantagens para cada sistema, como também as principais características, critérios para dimensionamento e procedimentos construtivos.

Com o objetivo de avaliar o sistema de laje com o menor custo, foi feito um estudo de dois casos. Em ambos, a análise foi feita seguindo os procedimentos das normas e dimensionados pelo CAD-TQS e planilhas desenvolvidas no Mathcad. O primeiro caso foi analisado um trecho de pavimento simples, onde foram estudados os seguintes casos de lajes: laje maciça, laje pré-moldada com treliça, laje com *deck* metálico mais EPS e laje mista *steel deck* MF-50.

No caso1, o sistema de laje mais econômico ficou sendo a laje pré-moldada percentualmente 55% mais econômica que a laje mista *steel deck* MF-75 que resultou na laje com o maior custo. Porém o vigaumento permaneceu fixo, não acompanhando a melhor solução estrutural para cada tipo de laje.

Para o caso 2, foi analisado um edifício de oito pavimentos, uma estrutura compatível com as construções realizadas comercialmente, onde foram comparados os seguintes sistemas de lajes: laje maciça, laje pré-moldada, laje nervurada, laje alveolar, laje mista com *steel deck* MF-50 e MF-75. Neste caso foi avaliado não somente o custo da laje, mas a estrutura como um todo. Para o caso 2, o sistema de laje mais econômico ficou sendo a laje mista com *steel deck* MF-75, com o custo 40% menor que a opção com laje alveolar que foi a menos favorável.

Analisando os dois casos, entendendo-se que os exemplos não foram feitos na mesmas condições, percebe-se que o *steel deck* onerou os custos para um exemplo hipotético com área pequena, e tornou-se extremamente viável para uma estrutura comercial com uma área maior. Isso se deve ao fato de ter levado em consideração no custo, a estrutura como um todo, e a diluição do custo da mão de obra e material, na execução de um pavimento maior e com maior número de repetições.

Não se pretende, com este trabalho, indicar uma solução-padrão ou ideal, essas diferenças de custos numéricos não podem ser analisadas friamente, devem ser avaliadas dentro do contexto do empreendimento; e que nem sempre o melhor custo é a solução mais viável. Além dos custos devem ser verificadas as condições construtivas, a equipe de trabalho, a mão de obra e os materiais disponíveis na região. Numa comparação genérica,

se todos esses aspectos forem semelhantes, com base nos resultados obtidos neste trabalho o sistema de laje mais adequado seria a laje mista *steel deck* MF-75

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTIONS. AISC-LRFD. **Specification for structural steel buildings**. Chicago – Illinois. March, 2005.

ANDRADE, S. A. L. de. **Laje mista com deck-metálico**, 6º CECAP. Colóquio sobre Estruturas de Concreto Armado e Protendido. Rio de Janeiro, 1990. v. 2, p. 54–75.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - procedimentos**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800:2006. Texto base para revisão da NBR 8800:1986. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Abril, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323: **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2000.

BEZERRA, D. P. **Análise de estruturas tridimensionais de edifícios altos considerados a rigidez transversal à flexão das lajes**. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.

DAVID, D.L. **Vigas mistas com laje treliçada e perfis fôrmos a frio: análise do comportamento estrutural**. 218p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

DAVID, D. L. **Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço fôrmos a frio e laje de vigotas pré-moldadas**. São Carlos. 250p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

DE NARDIN, S. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. São Carlos. 148p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

EUROCODE 4. EN 1994. **Design of composite steel and concrete structures Part 1.1 General rules and rules for buildings**. CEN, European Committee for Standardisation. Document CEN/TC 250/SC 4, Brussels, 2001. p. 135.

EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION (1994). **ENV 1994-1-1: Eurocode 3 – Design of steel and structures**, Part 1.1: General rules and rules for buildings. Bressels.

FRUCHTENGARTEN, J. **Sobre a estabilidade de perfis de seção aberta**. São Paulo. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

GIRDER-SLAB AND D-BEAM ARE TRADEMARKS OF GIRDER-SLAB TECHNOLOGIES LLC. **Take speed of construction to a higher level**.

GOMES L. C. **Estudo do sistema de lajes mistas com forma de aço incorporada empregando concreto estrutural leve**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

MALITE, M. **Sobre o Cálculo de Vigas Mistas Aço-Concreto: Ênfase em Edifícios**. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

MALITE, M. **Análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada**. 2 v. Tese. (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

MALITE, M.; NIMIR, W.A.; SÁLES, J.J.; GONÇALVES, R.M. **Cold-formed shear connectors for composite constructions**. In: 14th INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, St. Louis – USA, 15-16 October 1998. p.409-421.

MALITE, M.; SÁLES, J.J. **Estruturas de aço constituídas por perfis de chapa dobrada: dimensionamento de barras**. São Carlos, EESC-USP, 1993. 97p. (Publicação 015/93)

OLIVEIRA, L. A. F. **Estudo do comportamento e da resistência das vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis fôrmos a frio e lajes pré-fabricadas**. 92 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SALES, J.J. **Estudo do projeto e da construção de edifícios de andares múltiplos com estruturas de aço**. Escola de Engenharia de São Carlos Tese (Doutorado). São Carlos, 1995.

SALES, J.J. **Construções em aço - PROJETO**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 1998.

WWW.ATEX.COM.BR. **A forma da laje nervurada**. Disponível em: <<http://www.atex.com.br/>>. Acesso em: 05 ago.2008.

WWW.TATU.COM.BR. **Blocos, lajes, pisos e telhas**. Disponível em: <<http://www.tatu.com.br/>>. Acesso em: 12 set.2008.

WWW.ARCELORMITTAL.COM.BR. **Referencia Mundial na industria de aço**. Disponível em: <<http://www.arcelormittal.com.br/>>. Acesso em: 03 nov.2008.

WWW.METFORM.COM.BR. **Edificando o futuro**. Disponível em: <<http://www.metform.com.br/>>. Acesso em: 22 mai.2008.

WWW.R4TECNO.COM.BR. **R4 tecnologia aplicada**. Disponível em: <<http://www.r4tecno.com.br/>>. Acesso em: 19 abr.2008.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ANDRADE, A., VELLASCO, P., SILVA, J., TAKEY, T. Standardized composite slab systems for building constructions. *Journal of Constructional Steel Research*, 60, p. 493–524. 2004.

ALVA, G. M. S. ***Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto***. 277p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

BELTRÃO, A. J. N. ***Comportamento estrutural de lajes mistas com corrugações na alma de perfis de chapa dobrada***. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil – PUC–Rio, 2003. 124p. (Dissertação de Mestrado).

CRISINEL, M., MARIMON, F. A new method for the design of composite slabs. *Journal of Constructional Steel Research*, 60, p. 481–491. 2004.

CSA S136–01. ***North american specification for the design of cold-formed steel structural members***, AISI Committee on Specifications, CSA's S136 Committee and CANACERO, 2001.

DROPPA, A J. ***Análise estrutural de lajes fôrmas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada***. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

KIRCHHOF, L. D. ***Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio***. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

KOTINDA T. I. ***Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga***. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

LEMA, L.G. **Comportamento em Carga Última de Vigas Mistas com Conectores Rígidos e Flexíveis**. 269 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia Civil – Estruturas). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1982.

MALITE, M; NIMIR, W.A.; GONÇALVES, R.M; SÁLES, J.J. **On the structural behavior of composite beams using cold-formed shapes**. In: 15th INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, St. Louis – USA, 19-20 October 2000. p.307-319.

PETER A. NACCARATO, P.E., *Vice-president of O'Donnell & Naccarato*, (2001). **Steel & Precast slab construction system for mid and high-rise residential buildings**.

PFEIL, W., PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático segundo as normas brasileiras**. 7a ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

TRISTÃO, G. A. **Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica**. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

VIANNA, J. C. **Sistema de laje mista para edificações residenciais com uso de perfis embossados de chapa dobrada**. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil – PUC–Rio. 2005. 189p. (Dissertação de Mestrado).

VERÍSSIMO, G.S. **Análise e comportamento de vigas de aço e vigas mistas com aberturas na alma**. Belo Horizonte-MG, 1v. 265p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

VERÍSSIMO, G. S.; VALENTE, I.; PAES, J. L. R.; CRUZ, P. J. S.; FAKURY R. H. **Análise experimental de um conector de cisalhamento em chapa de aço endentada para estruturas mistas de aço e concreto**. In: XXXII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 2006, Campinas-SP. Anais das XXXII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural p. 410-419

VIEIRA, F. J. R. **Estudo teórico-experimental de vigas-mistas constituídas por perfis de aço preenchidos com concreto armado**. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil - Estruturas Metálicas). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

VIEIRA, J. D. ***Estudo teórico–experimental do comportamento de lajes mistas com perfis incorporados de aço***. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil – PUC–Rio, 2003. 121p. (Dissertação de Mestrado).

ANEXO 1

Verificação das vigas mistas: NBR 8800:2008 Interação completa - construção escorada

1 Entrada de dados

1.1 Dados da seção de aço W 200x15

Altura total	d := 200	mm
Largura da mesa	bf := 120	mm
Espessura da alma	tf := 6.3	mm
Espessura da mesa	tw := 4.75	mm
Espessura da laje de concreto:	tc := 60	mm
Altura da forma:	hf := 50	mm
Vão	$L_w := 6000$	mm
Distancia a viga adjacente esquerda:	L1 := 3000	mm
Distancia a viga adjacente direita:	L2 := 3000	mm
Diamêtro dos conectores	$\theta := 16$	mm

1.2 Dados dos materiais

Aço	Concreto	Conector
$f_y := 25$ kN/cm ²	$f_{ek} := 20$ MPa	$f_{ucs} := 25$ kN/cm ²
$E_s := 20000$ kN/cm ²		
$f_u := 40$ kN/cm ²		
Momento de cálculo total	$M_{sd} := 13714$	KNcm

2 Cálculo das propriedades geométricas

2.1 Propriedades geométricas da viga de aço

$$h := d - 2t_f \quad h = 187.4 \text{ mm}$$

$$A := \frac{(2b_f \cdot t_f + h \cdot t_w)}{100} \quad A = 24.02 \text{ cm}^2$$

$$I_{ax} := \frac{\left[2 \cdot \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + 2 \cdot (b_f \cdot t_f) \cdot \left(\frac{h + t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w \cdot h^3}{12} \right]}{10000} \quad I_{ax} = 1679.25 \text{ cm}^4$$

$$x_o := \frac{d}{2} \quad x_o = 100 \text{ mm} \quad W_a := \frac{I_{ax}}{\frac{x_o}{10}} \quad W_a = 167.93 \text{ cm}^3$$

Classificação da viga de aço

$$\lambda_w := \frac{h}{t_w} \quad \lambda_w = 39.45 \quad \lambda_p := 3.76 \cdot \left(\frac{E_s}{f_y} \right)^{0.5} \quad \lambda_r := 5.6 \cdot \left(\frac{E_s}{f_y} \right)^{0.5}$$

Alerta := **"Seção semi-compacta: verificar tensões na viga e na laje"** if $\lambda_p < \lambda_w \leq \lambda_r$
"Seção esbelta: não pode ser utilizada" if $\lambda_w > \lambda_r$

Alerta = ■

3 Largura efetiva da laje

$$b := \min \left[\frac{L}{4}, 16t_c + b_f, b_f + \left(\frac{L1 + L2}{2} \right) \right] \quad b = 1080 \text{ mm}$$

$$b := 540$$

4 Cisalhamento na interface

$$T_d := A \cdot \frac{f_y}{1.1} \quad T_d = 545.94 \text{ kN}$$

$$C_d := \frac{0.85 \frac{f_{ck}}{10} \cdot \frac{b}{10} \cdot \frac{t_c}{10}}{1.4} \quad C_d = 393.43 \text{ kN}$$

$$V_{hrd} := \min(T_d, C_d) \quad V_{hrd} = 393.43 \text{ kN}$$

5 Resistência dos conectores Stud Bolt

$$A_{cs} := \frac{\pi \cdot \theta^2}{4 \cdot 100}$$

$$A_{cs} = 2.01 \quad \text{cm}^2$$

$$E_c := 4760 (f_{ck})^{0.5}$$

$$E_c = 21287.37 \quad \text{MPa}$$

$$q_{n1} := 0.5 \cdot \frac{A_{cs}}{1.25} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} \cdot \frac{E_c}{10} \right)^{0.5}$$

$$q_{n1} = 52.48 \quad \text{kN ruptura do conector}$$

$$q_{n2} := A_{cs} \cdot \frac{f_u}{1.25}$$

$$q_{n2} = 64.34 \quad \text{kN esmagamento do concreto}$$

$$q_{rd} := \min(q_{n1}, q_{n2})$$

$$q_{rd} = 52.48 \quad \text{kN resistência do conector}$$

Número de conectores para interação completa

$$Q_{rd} := V_{hrd} \quad Q_{rd} = 393.43 \quad \text{kN}$$

$$n := \frac{Q_{rd}}{q_{rd}} \quad n = 7.5 \quad \text{para meia viga}$$

6 Posição da Linha neutra Plástica

$$PLNP := \begin{cases} \text{"LNP na laje"} & \text{if } C_d > T_d \\ \text{"LNP na viga"} & \text{if } C_d \leq T_d \end{cases} \quad PLNP = \text{"LNP na viga"}$$

7 Resistência ao momento fletor

Se LNP na Laje

$$T_d := A \cdot \frac{f_y}{1.1}$$

$$T_d = 545.94 \quad \text{kN}$$

$$a := \frac{T_d}{0.85 \frac{f_{ck} \cdot b}{10 \cdot 10}}$$

$$a = 8.33 \quad \text{cm}$$

$$C_d := \frac{0.85 \frac{f_{ck}}{10} \cdot \frac{b}{10} \cdot a}{1.4}$$

$$C_d = 545.94 \quad \text{kN}$$

$$M_{rd1} := T_d \cdot \left(\frac{d}{2 \cdot 10} + \frac{t_c}{10} + \frac{h_f}{10} - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_{rd1} = 9192.06 \quad \text{kNcm}$$

Se LNP na viga

$$C_d := \frac{0.85 \cdot \frac{f_{ck}}{10} \cdot \frac{b}{10} \cdot \frac{t_c}{10}}{1.4} \quad C_d = 393.43 \quad \mathbf{kN}$$

$$C_{d1} := 0.5 \left(\frac{A \cdot f_y}{1.1} - C_d \right) \quad C_{d1} = 76.26 \quad \mathbf{kN}$$

Posição da linha neutra (mesa ou alma da seção de aço)

$$PLNP1 := \begin{cases} \text{"LNP na alma"} & \text{if } C_{d1} > T_d \\ \text{"LNP na mesa"} & \text{if } C_{d1} \leq T_d \end{cases} \quad PLNP1 = \text{"LNP na mesa"}$$

Para linha neutra na mesa da viga de aço

$$A_f := \frac{t_f \cdot b_f}{100} \quad A_f = 7.56 \quad \mathbf{cm}^2$$

$$y := \frac{C_{d1}}{A_f \cdot f_y} \cdot \frac{t_f}{10} \quad y = 0.25 \quad \mathbf{cm} \quad \text{posição da LN a partir do fundo da laje}$$

$$y_t := \frac{\frac{h}{10} - y}{2} \quad y_t = 9.24 \quad \mathbf{cm} \quad \begin{matrix} \mathbf{cm} \\ \text{Ponto de aplicação da resultante de} \\ \text{tração} \end{matrix}$$

$$y_c := \frac{y}{2} \quad y_c = 0.13 \quad \mathbf{cm} \quad \text{Ponto de aplicação da resultante de compressão na viga de aço}$$

$$M_{rd2} := C_{d1} \cdot \left(\frac{d}{10} - y_t - y_c \right) + C_d \cdot \left(\frac{t_c}{2 \cdot 10} + \frac{h_f}{10} + \frac{d}{10} - y_t \right)$$

$$M_{rd2} = 8190.19 \quad \mathbf{kNcm}$$

Para linha neutra na alma da viga de aço

$$A_f := \frac{t_f \cdot b_f}{100} \quad A_f = 7.56 \quad \mathbf{cm}$$

$$A_w := \frac{t_w \cdot h}{100} \quad A_w = 8.9 \quad \mathbf{cm}$$

$$v := \frac{t_f}{10} + \frac{C_{d1} - A_f \cdot f_y}{A_w \cdot f_y} \cdot \frac{h}{10} \quad v = -8.86 \quad \mathbf{cm} \quad \text{posição da LN a partir do fundo da laje}$$

$$y_t := \frac{\frac{h}{10} - v}{2} \quad y_t = 13.8 \quad \mathbf{cm} \quad \text{Ponto de aplicação da resultante de tração}$$

$$y_c := \frac{y}{2} \quad y_c = -4.43 \quad \text{cm}$$

Ponto de aplicação da resultante de compressão na viga de aço

$$Mrd3 := Cd1 \cdot \left(\frac{d}{10} - y_t - y_c \right) + Cd \cdot \left(\frac{t_c}{2 \cdot 10} + \frac{h_f}{10} + \frac{d}{10} - y_t \right)$$

$$Mrd3 = 6396.49 \quad \text{kNcm}$$

8 Momento fletor resistente de cálculo

$$Mrd := \text{if}[(PLNP = \text{"LNP na laje"}), Mrd1, Mrd2]$$

$$Mrd := \text{if}[(PLNP1 = \text{"LNP na alma"}), Mrd3, Mrd] \quad Mrd = 8190.19 \quad \text{kNcm}$$

Verificação momento fletor

$$Msd = 13714 \quad \text{kNcm}$$

$$\text{Verificação} := \text{if}[(Msd \leq Mrd), \text{"OK"}, \text{"Não OK"}]$$

$$\text{Verificação} = \text{"Não OK"}$$

9 Propriedades geométricas da seção transformada

$$E_c := 4760 (f_{ck})^{0.5} \quad E_c = 21287.37 \quad \text{MPa}$$

$$n := \frac{E_s}{E_c} \quad n = 9.4$$

$$b_{tr} := \frac{b}{n} \quad b_{tr} = 5.75 \quad \text{cm}$$

$$A_{ctr} := b_{tr} \cdot \frac{t_c}{10} \quad A_{ctr} = 34.49 \quad \text{cm}^2$$

centro de gravidade da viga de aço

$$y_a := \frac{d}{2 \cdot 10} \quad y_a = 10 \quad \text{cm}$$

centro de gravidade da seção transformada

$$y_{tr} := \frac{A \cdot y_a + A_{ctr} \cdot \left(\frac{d}{10} + \frac{t_c}{2 \cdot 10} + \frac{h_f}{10} \right)}{A + A_{ctr}} \quad y_{tr} = 20.61$$

Posição da linha neutra elástica

$$LN := \text{if} \left[\left(y_{tr} < \frac{d}{10} \right), \text{"LN na viga"}, \text{"LN na laje"} \right] \quad LN = \text{"LN na laje"}$$

$$a1 := \frac{d}{10} + \frac{t_c}{10} - y_{tr} \quad a1 = 5.39 \quad \text{cm} \quad \text{distância do topo da laje até a LN caso esta esteja na laje}$$

$$Itr := \begin{cases} \left[Iax + A \cdot (ytr - ya)^2 + \frac{btr \cdot \left(\frac{tc}{10}\right)^3}{12} + Actr \cdot \left(\frac{d}{10} + \frac{tc}{2 \cdot 10} + \frac{hf}{10} - ytr\right)^2 \right] & \text{if LN = "LN na viga"} \\ \left[Iax + A \cdot (ytr - ya)^2 + \frac{\frac{btr}{10} \cdot al^3}{12} + \frac{btr}{10} \cdot al \cdot \left(\frac{al}{2}\right)^2 \right] & \text{if LN = "LN na laje"} \end{cases}$$

$$Itr = 4413.24 \quad \mathbf{cm^4}$$

$$Wtri := \frac{Itr}{ytr} \qquad Wtri = 214.13 \qquad \mathbf{cm^3}$$

$$Wtrs := \frac{Itr}{\left(\frac{d}{10} + \frac{tc}{10}\right) - ytr} \qquad Wtrs = 818.73 \qquad \mathbf{cm^3}$$

$$Ixef := Iax + \sqrt{\frac{Qrd}{Vhrd}} \cdot (Itr - Iax) \qquad Ixef = 4413.24 \qquad \mathbf{cm^4}$$

$$Wefs := Wa + \sqrt{\frac{Qrd}{Vhrd}} \cdot (Wtrs - Wa) \qquad Wefs = 818.73 \qquad \mathbf{cm^3}$$

$$Wefi := Wa + \sqrt{\frac{Qrd}{Vhrd}} \cdot (Wtri - Wa) \qquad Wefi = 214.13 \qquad \mathbf{cm^3}$$

Dimensionamento de barras compressão NBR-8800(2008)

Perfil I soldado - Pilar do projeto

1 Dados de entrada

1.1 - Propriedades geométricas perfil CS250 x 76

largura da mesa $bf := 250$ mm

altura total $d := 250$ mm

Espessura da mesa $tf := 16$ mm

Espessura da alma $tw := 8$ mm

1.2 - Propriedades mecânicas do aço - kN/cm²

$f_y := 25$ $f_u := 40$ $f_r := 0.3f_y$ $E := 20500$ $G := 8000$ $\frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

1.3 - Comprimentos e coeficientes de flambagem

$K_x := 1$ $K_y := 1$ $K_t := 1$

$L_x := 300$ $L_y := 300$ $L_t := 300$

1.4 - Solicitações de cálculo

Normal : $N_{sd} := 1190$ kN

2 Determinação das propriedades geométricas da seção

$$h := d - 2 \cdot tf \quad h = 218 \quad \text{mm}$$

$$A := (2 \cdot bf \cdot tf + h \cdot tw) \cdot 0.01 \quad A = 97.44 \quad \text{cm}^2$$

$$I_x := 10^{-4} \cdot \left[2 \cdot \frac{bf \cdot tf^3}{12} + 2 \cdot bf \cdot tf \cdot \left(\frac{h}{2} + \frac{tf}{2} \right)^2 + \frac{tw \cdot h^3}{12} \right] \quad I_x = 11658.95 \quad \text{cm}^4$$

$$I_y := 10^{-4} \cdot \left(2 \cdot \frac{bf^3 \cdot tf}{12} + \frac{tw^3 \cdot h}{12} \right) \quad I_y = 4167.6 \quad \text{cm}^4$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad r_x = 10.94 \quad \text{cm}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad r_y = 6.54 \quad \text{cm}$$

$$I_t := \frac{1}{3} \cdot (bf \cdot tf^3 + bf \cdot tf^3 + h \cdot tw^3) \cdot 10^{-4} \quad I_t = 71.99 \quad \text{cm}^4$$

$$C_w := \frac{(I_y) \cdot \left(\frac{d}{10} - \frac{tf}{10} \right)^2}{4} \quad C_w = 570502.33 \quad \text{cm}^6$$

$$y_o := 0 \quad x_o := 0 \quad w_x := \frac{I_x}{\frac{d}{20}} \quad w_x = 932.72 \quad \text{cm}^3$$

Verificação da compressão

3.1 Flambagem Local

3.1.1 Flambagem Local da mesa

seção grupo 4 - Elemento AL

$$\lambda := \frac{bf}{2 \cdot tf}$$

$$\lambda_r := 0.64 \cdot \left(\frac{E}{\frac{f_y}{kc}} \right)^{0.5} \quad kc := \frac{4}{\left(\frac{h}{tw} \right)^{0.5}} \quad kc = 0.766$$

$$kcaux := kc$$

$$kc := \text{if}[(0.35 \leq kcaux), kc, 0.35]$$

$$kc := \text{if}[(kcaux \leq 0.763), kc, 0.763] \quad kc = 0.763$$

$$\lambda_r := 0.64 \cdot \left(\frac{E}{f_y} \right)^{0.5} \quad \lambda_r = 16.01$$

$$Q_s := \text{if}[(\lambda \leq \lambda_r), 1, Q_s]$$

Cálculo de Qs para $\lambda > \lambda_r$ seções esbeltas

$$\lambda_1 := 1.17 \cdot \left(\frac{E}{f_y} \right)^{0.5} \quad \lambda_1 = 29.27$$

$$\lambda_2 := 0.64 \cdot \left(\frac{E}{f_y} \right)^{0.5} \quad \lambda_2 = 16.01$$

$$Q_{s1} := 1.415 - 0.65 \cdot \left(\frac{f_y}{E \cdot kc} \right)^{0.5} \cdot \frac{bf}{2tf} \quad Q_{s1} = 1.21$$

$$Q_{s2} := \frac{0.9E \cdot kc}{f_y \cdot \left(\frac{bf}{2tf} \right)^2} \quad Q_{s2} = 9.23$$

$$Q_s := \text{if}[(\lambda > \lambda_1), Q_{s2}, Q_{s1}]$$

$$Q_s := \text{if}[(\lambda \leq \lambda_r), 1, Q_s] \quad Q_s = 1$$

3.1.2 Flambagem local alma seção grupo 2 - Elemento AA

$$\lambda := \frac{h}{tw} \quad \lambda = 27.25$$

$$\lambda_r := 1.49 \cdot \left(\frac{E}{f_y} \right)^{0.5} \quad \lambda_r = 42.67$$

$$Q_a := \text{if}[(\lambda \leq \lambda_r), 1, Q_a] \quad Q_a \rightarrow 1$$

Cálculo de Qa para $\lambda > \lambda_r$ seções esbeltas

$$bef := 1.91 \cdot tw \cdot \left(\frac{E}{10 \cdot \sigma} \right)^{0.5} \cdot \left[1 - \left(\frac{0.34}{\frac{h}{tw}} \right) \cdot \left(\frac{E}{10 \cdot \sigma} \right)^{0.5} \right] \quad \sigma := f_y \text{ a favor da segurança}$$

$$b_{ef} := 1.91 \cdot tw \cdot \left(\frac{E}{10 \cdot \sigma} \right)^{0.5} \cdot \left[1 - \left(\frac{0.34}{\frac{h}{tw}} \right) \cdot \left(\frac{E}{10 \sigma} \right)^{0.5} \right]$$

$$b_{ef} = 122.73$$

$$A_{ef} := A - \frac{1}{100} (h - b_{ef}) \cdot tw \quad A_{ef} = 89.82$$

$$Q_a := \frac{A_{ef}}{A} \quad Q_a = 0.92$$

$$Q_a := \text{if}[(\lambda \leq \lambda_r), 1, Q_a] \quad Q_a = 1$$

Parâmetro de flambagem local

$$Q := Q_a \cdot Q_s \quad Q = 1$$

3.2 Flambagem global

$$\lambda_o := \left(Q \cdot \frac{N_{pl}}{N_e} \right)^{0.5}$$

$$N_{pl} := A \cdot f_y \quad N_{pl} = 2436$$

Flambagem por flexão em x

$$N_{ex} := (3.14)^2 \cdot \frac{E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad N_{ex} = 26183.64$$

Flambagem por flexão em y

$$N_{ey} := (3.14)^2 \cdot \frac{E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad N_{ey} = 9359.58$$

Flambagem por torção

$$r_o := \left(r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2 \right)^{0.5} \quad r_o = 12.74$$

$$N_{ez} := \left(\frac{1}{r_o^2} \right) \cdot \left[\frac{(3.14)^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} \right] + G \cdot I_t \quad N_{ez} = 11433.88$$

$$N_e := \min(N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}) \quad N_e = 9359.58 \quad \mathbf{kN}$$

$$\lambda_o := \left(Q \cdot \frac{N_{pl}}{N_e} \right)^{0.5} \quad \lambda_o = 0.51$$

$$\chi := \text{if} \left[(\lambda_o \leq 1.5), 0.658 \lambda_o^2, \frac{0.877}{\lambda_o^2} \right] \quad \chi = 0.9$$

3.2.1 Normal resistente de cálculo - compressão

$$N_{rd} := \frac{(\chi \cdot Q \cdot A \cdot f_y)}{1.1} \quad N_{rd} = 1985.98 \quad \text{KN}$$

3.2.2 Verificação ELU - compressão

$$N_{sd} = 1190 \quad \text{KN}$$

$$\text{VerificaçãoC} := \text{if}[(N_{sd} \leq N_{rd}), \text{Ok}, \text{NãoOK}]$$

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} = 0.6 \quad \text{VerificaçãoC} \rightarrow \text{Ok}$$

3.2.3 Estados Limites de utilização - compressão

Eslitez máxima = 200

$$\lambda_x := \frac{K_x \cdot L_x}{r_x} \quad \lambda_x = 27.43$$

$$\lambda_y := \frac{K_y \cdot L_y}{r_y} \quad \lambda_y = 45.87$$

$$\text{VerCELSx} := \text{if}[(\lambda_x < 200), \text{Ok}, \text{naoOK}] \quad \text{VerCELSx} \rightarrow \text{Ok}$$

$$\text{VerCELSy} := \text{if}[(\lambda_y < 200), \text{Ok}, \text{naoOK}] \quad \text{VerCELSy} \rightarrow \text{Ok}$$