

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**COMPARAÇÃO NA UTILIZAÇÃO DE PAINÉIS ALVEOLARES E
PAINÉIS DO TIPO PI PROTENDIDOS NO PROJETO DE EDIFÍCIOS
GARAGEM EM CONCRETO PRÉ-FABRICADO**

Tiago Araujo Teixeira

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de São Carlos como parte dos
requisitos para a conclusão da
graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fernando
Menezes de Almeida Filho

São Carlos

2020

A todos os que participaram desta trajetória tanto quanto eu.

Agradeço aqueles que tornaram possível esta jornada, fornecendo a infraestrutura necessária para minha formação educacional e pessoal, além de todo o apoio emocional, ensinamentos e virtudes valiosas. Direciono estes agradecimentos aos meus pais, Pedro e Ana, aos meus irmãos, Gabriel e Daniele, aos meus avós maternos, Antônio Luiz e Maria Amélia, e paternos, João Luiz e Julieta, além de toda a grande família formada por estes.

Agradeço aqueles que tornaram a graduação uma experiência tão gratificante, podendo compartilhar os momentos de celebração e promovendo todo o suporte nos momentos mais difíceis. Desta forma, me refiro aos meus familiares novamente, dos quais mesmo distantes, pude sentir o mesmo apoio e confiança ao sempre me receberem de forma calorosa nos recessos dos períodos letivos, ao meu irmão Gabriel, que foi a razão inicial para escolher morar e estudar em São Carlos, e que sempre esteve presente nesta mudança e nos anos seguintes, aos meus colegas de turma, com os quais investi horas de trabalho e estudo e que renderam amizades que perdurarão para o resto de minha vida, da mesma forma que os outros amigos que me acolheram tão bem, em especial, àqueles com quem morei durante os anos de graduação, os companheiros da república “Faixa de Gaza”.

Agradeço também ao meu orientador, professor Fernando, que me guiou desde o princípio, encontrando-se sempre disponível para sanar dúvidas e orientar não só quanto ao trabalho, quanto a vida pessoal e profissional de um engenheiro, exercendo primorosamente seu ofício de tutor, assim como tantos outros professores da UFSCar com os quais tive a feliz oportunidade de ter conhecido e ter sido lecionado ao longo destes anos.

RESUMO

A contribuição dos edifícios garagem de múltiplos pavimentos para a oferta de estacionamentos nas cidades modernas, derivada da maximização do aproveitamento do espaço urbano associada à sua verticalização, pode ser otimizada a partir da adoção do sistema construtivo associado a implantação mais apropriada da edificação. As características deste tipo de construção indicam que os sistemas estruturais mais industrializados se apresentem com alta sinergia de aplicação, destacando-se assim os pré-moldados de concreto. Sabendo-se que a análise do sistema estrutural que compõe a laje de um pavimento pode gerar um conhecimento significativo acerca do consumo de material e das características gerais associadas a execução de um empreendimento, já que este componente apresenta uma alta proporção na volumetria da edificação, este trabalho surge com o intuito de análise comparativa entre sistemas de composição das lajes compostas por painéis pré-moldados protendidos alveolares e do tipo PI, de forma a gerar uma base quantitativa dos índices associados a estas opções e a constatação do sistema estrutural mais apropriado para aplicação, a partir da realização do projeto estrutural de um mesmo pavimento tipo de edifício garagem, consideradas as demais hipóteses de estudo.

Palavras-chave: edifício garagem, concreto pré-moldado, laje alveolar, laje duplo T.

ABSTRACT

The contribution of multi-storey garage buildings to the provision of parking in modern cities, derived from maximizing the use of urban space associated with its verticalization, can be optimized by adopting the construction system associated with the most appropriate building implementation. The characteristics of this type of construction indicate that the most industrialized structural systems present themselves with high synergy of application, highlighting the precast concrete. Knowing that the analysis of the structural system that makes up the floor slab can generate significant knowledge about material consumption and the general characteristics associated with the execution of a project, since this component has a high proportion in the building's volume, this work arises with the intention of a comparative analysis between slab composition systems composed of pre-molded prestressed honeycomb and section TT panels, in order to generate a quantitative base of the indexes associated with these options and the verification of the most appropriate structural system for application, from the realization of the structural design of the same type of garage building, considering the other study hypotheses.

Keywords: garage building, precast concrete, hollow core slab, Double T slabs.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EDIFÍCIO GARAGEM EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO (SÃO PAULO EXPO).....	9
FIGURA 2. PLANTA ARQUITETÔNICA SIMPLIFICADA DO PAVIMENTO TIPO.	11
FIGURA 3. PLANTA BASE SIMPLIFICADA PARA LOCAÇÃO DOS PLANOS DE LAJE.	12
FIGURA 4. ESQUEMATIZAÇÃO DE UNIDADE DE PAINEL ALVEOLAR.	21
FIGURA 5. UNIDADE DE PAINEL DUPLO T.	23
FIGURA 6. LAJE DUPLO T EM UM EDIFÍCIO GARAGEM.	23
FIGURA 7. PLANTA DE LOCAÇÃO DOS PAINÉIS ALVEOLARES.....	26
FIGURA 8. PLANTA DE LOCAÇÃO DOS PAINÉIS DUPLO T.	28
FIGURA 9. VARIAÇÃO DAS RELAÇÕES ENTRE OS FATORES COMPARATIVOS.....	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. APRESENTAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO.....	13
TABELA 2. SEÇÕES DE PAINÉIS ALVEOLARES (PRÉ-DIMENSIONAMENTO).....	27
TABELA 3. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS SEÇÕES DE PAINÉIS ALVEOLARES.	27
TABELA 4. SEÇÕES DE PAINÉIS DUPLO T (PRÉ-DIMENSIONAMENTO).	29
TABELA 5. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS SEÇÕES DE PAINÉIS DUPLO T.	29
TABELA 6. ESFORÇOS MÁXIMOS SOLICITANTES DE CÁLCULO.	32
TABELA 7. CÁLCULO DE KMD, KX E KZ.....	34
TABELA 8. CÁLCULO DA ARMADURA DE PROTENSÃO.	35
TABELA 9. VERIFICAÇÃO DA PROTENSÃO NAS BORDAS SUPERIOR E INFERIOR.....	36
TABELA 10. PESO PRÓPRIO E ALTURA DAS SEÇÕES DOS PAINÉIS ADOTADOS.	38
TABELA 11. CONSUMO DE AÇO E CONCRETO PARA CASOS DE ESTUDO.	39
TABELA 12. SOLUÇÕES ADOTADAS PARA OS PAINÉIS PARA CADA TAMANHO DE VÃO. ...	40
TABELA 13. RELAÇÕES ENTRE SOLUÇÕES ADOTADAS PARA VÃO DE 10,0 METROS.	40
TABELA 14. RELAÇÕES ENTRE SOLUÇÕES ADOTADAS PARA VÃO DE 12,5 METROS.	41
TABELA 15. RELAÇÕES ENTRE SOLUÇÕES ADOTADAS PARA VÃO DE 15,0 METROS.	42
TABELA 16. RELAÇÕES ENTRE SOLUÇÕES ADOTADAS PARA VÃO DE 17,5 METROS.	43
TABELA 17. RELAÇÕES ENTRE SOLUÇÕES ADOTADAS PARA VÃO DE 20,0 METROS.	44
TABELA 18. ANÁLISE QUANTITATIVA DAS RELAÇÕES ENTRE OS FATORES COMPARATIVOS..	46

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	8
1.1JUSTIFICATIVA.....	9
1.2OBJETIVOS	10
1.3METODOLOGIA.....	10
1.4ESTRUTURA DO TEXTO	15
2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1HISTÓRICO	16
2.2EDIFÍCIO GARAGEM.....	16
2.3INDUSTRIALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO.....	17
2.4CONCRETO PRÉ-MOLDADO	17
2.5CONCRETO PROTENDIDO.....	19
2.6LAJES PRÉ-MOLDADAS	19
2.6.1Lajes alveolares	20
2.6.2Lajes do tipo pi.....	22
3.APRESENTAÇÃO DOS CASOS	25
3.1PAINÉIS ALVEOLARES	25
3.2PAINÉIS DUPLO T	27
4.DIMENSIONAMENTO	30
4.1LEVANTAMENTO DOS MÁXIMOS ESFORÇOS SOLICITANTES.....	30
4.2PROTENSÃO.....	32
4.2.1Área de armadura ativa	33
4.2.2Verificação da protensão	35
5.ANÁLISE DE RESULTADOS	37
5.1SOLUÇÕES ADOTADAS PARA TAMANHOS DE VÃO FIXOS.....	39
5.1.1Vão de 10 metros	40

5.1.2Vão de 12,5 metros	41
5.1.3Vão de 15 metros	41
5.1.4Vão de 17,5 metros	43
5.1.5Vão de 20 metros	43
5.2ANÁLISE GERAL.....	44
6.CONCLUSÃO	47
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
8.ANEXOS.....	51

1. INTRODUÇÃO

Os problemas urbanos apresentados pelas cidades modernas podem ser solucionados a partir de estratégias relativas a diversas áreas de atuação. Neste contexto, a mobilidade urbana se apresenta como um fator de estudo de ampla abrangência, apresentando como uma de suas patologias o aumento na intensidade dos fluxos de tráfego nos maiores polos urbanos, provocando uma conseqüente escassez de vagas de estacionamento (REZENDE, 2004).

Relacionada a esta situação problema, explicita-se uma solução associada a empreendimentos de construção civil: a construção de edifícios garagem de múltiplos pavimentos, que visam aumentar a oferta de vagas de estacionamento, utilizando-se de menor área de ocupação, devido a sua verticalização, o que gera melhor aproveitamento do espaço urbano.

Para a análise da viabilidade de implantação de uma edificação é importante que, logo na etapa de projeto, um dos objetos de estudo seja a adoção do sistema estrutural mais adequado, podendo garantir a sua construtibilidade associada a bons índices de qualidade, produtividade e economia. Para tal, deve-se analisar diversos aspectos relacionados ao sistema construtivo em comparação às características do edifício analisado, como o seu sistema de produção, os indicativos de consumo de material e o prazo de construção estimado.

Os edifícios garagem apresentam características gerais de alta modulação e padronização de seus espaços internos, relacionando-se assim, ao processo de industrialização da construção civil, devido a maior sistematização da construção e incorporação de processos fabris à execução (RIBEIRO, 2002). Dentre os sistemas construtivos com maiores índices de industrialização, encontram-se os pré-moldados de concreto, que possuem características estruturais semelhantes ao concreto moldado *in loco*, diferenciando-se pelo processo executivo, que ocorre fora do canteiro de obras.

Dentre as opções de pré-moldados de concreto para a composição dos elementos estruturais bidimensionais, que formam os pavimentos de uma edificação, apresentam-se

bem conceituados e consolidados no mercado os painéis alveolares e painéis do tipo pi (ou duplo T), que quando associados ao processo de protensão, possibilitam o vencimento de grandes vãos, assim como redução da altura útil. A figura 1 exemplifica um edifício garagem que contém como sistema construtivo elementos de concreto pré-moldado, o São Paulo Expo, que oferece 6500 vagas de estacionamento e se localiza na cidade de São Paulo-SP.

Figura 1. Edifício garagem em concreto pré-moldado (São Paulo Expo).



Fonte: Santos (2017).

1.1 JUSTIFICATIVA

O melhor aproveitamento do espaço urbano destinado ao estacionamento de automóveis associada a construção de edifícios garagem de múltiplos pavimentos, que propiciam maior oferta de vagas por metro quadrado, podem-se associar a melhores aspectos relacionados à economia, prazo, qualidade e produtividade, dependendo do sistema construtivo adotado.

Dentre os elementos estruturais bidimensionais pré-moldados de concreto para a composição do pavimento, considerados como sistemas construtivos apropriados para a construção de diversos tipos de edificação, dentre elas o edifício garagem, o trabalho surge

com o intuito de comparação entre os painéis protendidos alveolares e duplo T, em relação aos seus indicadores de quantitativos, possibilitando estabelecer a opção que apresenta maior economia de material e, conseqüentemente, reduzindo o custo do empreendimento.

1.2 OBJETIVOS

Comparar, a partir da elaboração de projeto estrutural, a utilização de lajes protendidas do tipo pi e alveolares como soluções estruturais para composição do piso de um pavimento de edifício garagem, estabelecendo a solução mais apropriada frente as hipóteses de estudo. Pretende-se alcançar os objetivos específicos de:

1. Avaliar os tipos de laje quanto ao consumo de material.
2. Analisar quantitativamente os índices associados a aspectos executivos dos sistemas de painéis.

1.3 METODOLOGIA

O trabalho se constitui como um estudo técnico comparativo das soluções estruturais de lajes pré-moldadas protendidas alveolares e do tipo PI (ou duplo T), para composição do pavimento de um edifício garagem, a partir da elaboração de um projeto estrutural do piso do pavimento tipo. Inicialmente, é realizada a pesquisa bibliográfica sobre o tema, formando uma fundamentação teórica para ambos os sistemas, sendo seguida pelos projetos estruturais dos demais exemplos de aplicação.

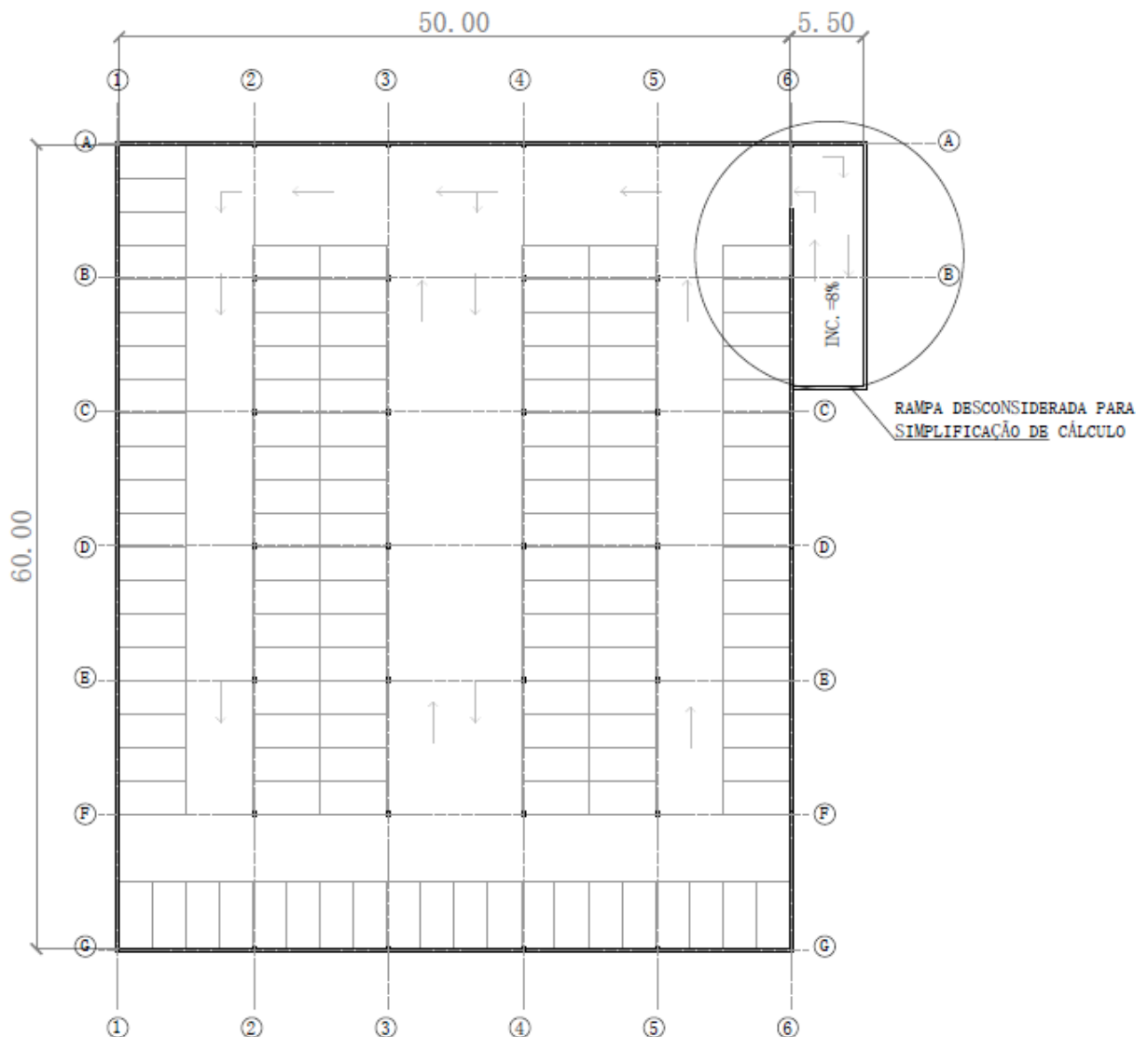
A partir da concepção arquitetônica simplificada de um pavimento tipo de edifício garagem formulada pelo próprio autor, e que é demonstrada pela figura 2, pôde-se obter a planta base de locação dos planos de laje, por sua vez apresentados na figura 3, com desconsideração da rampa de acesso para simplificação de cálculo e sobre o qual se compuseram os casos de estudo a partir da aplicação de alterações sobre as seguintes variáveis de estudo:

- Tamanho do vão a ser vencido (l): o estudo fora feito utilizando-se de diferentes tamanhos de vão, equivalentes ao comprimento dos painéis, indicados na figura

2 pelo símbolo ℓ . Os valores variam de 10,0 a 20,0 metros, com intervalos de adição de 2,5 metros para cada exemplo.

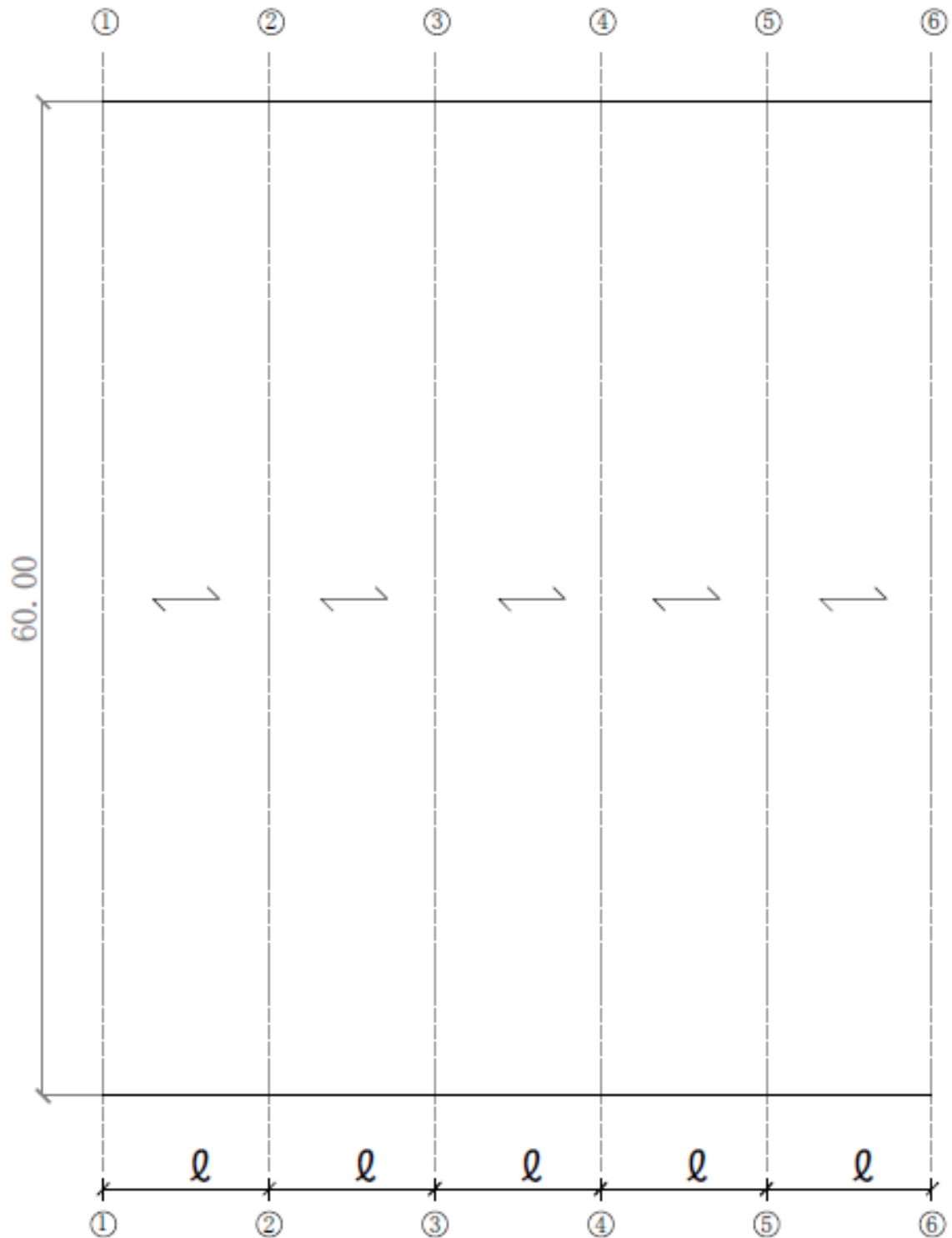
- Resistência do concreto a compressão (f_{ck}): o tipo de concreto a ser utilizado também fora considerado como variável para o trabalho de pesquisa, utilizando-se concretos de resistência a compressão de 40, 60 e 80 MPa (a unidade a ser considerada é kN/cm^2 , portanto os valores respectivos a 4, 6 e 8 kN/cm^2).

Figura 2. Planta arquitetônica simplificada do pavimento tipo.



Fonte: Do Autor.

Figura 3. Planta base simplificada para locação dos planos de laje.



Fonte: Do Autor.

Dessa forma, o estudo fora realizado para os dois tipos de laje (alveolar e tipo pi), utilizando-se 5 tamanhos diferentes de vão e 3 tipos de concreto em relação a resistência a compressão, totalizando 30 casos de estudo, como apresentado pela tabela 1.

Tabela 1. Apresentação dos casos de estudo.

Tipo de Laje	Caso	Tamanho do Vão - ℓ (m)	fck - concreto (kN/cm ²)
Alveolar	A1	10,0	4,0
	A2	10,0	6,0
	A3	10,0	8,0
	A4	12,5	4,0
	A5	12,5	6,0
	A6	12,5	8,0
	A7	15,0	4,0
	A8	15,0	6,0
	A9	15,0	8,0
	A10	17,5	4,0
	A11	17,5	6,0
	A12	17,5	8,0
	A13	20,0	4,0
	A14	20,0	6,0
	A15	20,0	8,0
Tipo Pi	P1	10,0	4,0
	P2	10,0	6,0
	P3	10,0	8,0
	P4	12,5	4,0
	P5	12,5	6,0
	P6	12,5	8,0
	P7	15,0	4,0
	P8	15,0	6,0
	P9	15,0	8,0
	P10	17,5	4,0
	P11	17,5	6,0
	P12	17,5	8,0
	P13	20,0	4,0
	P14	20,0	6,0
	P15	20,0	8,0

Fonte: Do Autor.

Para o pré-dimensionamento dos casos de estudo, utilizaram-se as tabelas do manual estadunidense PCI Design Handbook (PCI,2010) para estimar as seções de painéis em relação ao tamanho do vão a ser vencido, devido a maior riqueza de detalhes apresentada, o qual não fora constatado em bibliografia nacional. A partir daí, o projeto estrutural foi realizado para todos os exemplos, considerando-se a combinação de ações no Estado Limite Último

(ELU) apresentada pela equação 1 de acordo com o que é estabelecido pelas normas ABNT NBR 8681:2003 e ABNT NBR 6118:2014, para as particularidades da estrutura, sendo as cargas fornecidas pela norma técnica ABNT NBR 6120:2019.

$$\text{Combinação no ELU: } p = 1,5 \times q + 1,35 \times g_1 + 1,40 \times g_2 \quad (\text{Equação 1})$$

- Peso próprio da estrutura (g_1): Variável para cada caso de estudo, em relação ao vão e seção do painel adotado.
- Peso do revestimento (g_2): consultou-se a Tabela 4 da ABNT NBR 6120:2019, “Revestimentos de pisos e Impermeabilizações”, adotando-se “impermeabilização com manta asfáltica simples, com 5cm de espessura”, equivalente a 0,11kN/m².
- Sobrecarga (q): consultou-se a Tabela 13 da ABNT NBR 6120:2019, “Ações em garagens e demais áreas de circulação de veículos”, considerando o peso bruto total (PBT) máximo de 90kN por veículo, obtendo-se a sobrecarga típica no pavimento de 5,0 kN/m².

A partir de planilhas de cálculo formuladas para o dimensionamento dos elementos estruturais, pôde-se definir as seções utilizadas e a armadura ativa necessária para cada caso, priorizando a seção mais econômica, desde que fosse constatado que: a tensão máxima de compressão na borda superior da laje resultantes do carregamento não supera a resistência a compressão de cálculo, o KMD determinado não supera o valor de 0,259 e a tensão resultante da combinação da protensão com as cargas para o “tempo 0” também não ultrapassam as resistências dos elementos.

O prosseguimento do trabalho é realizado a partir da avaliação e comparação entre os seguintes fatores levantados durante o projeto:

- Consumo de concreto: as lajes contabilizam a maior parte da volumetria em uma estrutura de concreto, possuindo assim influência significativa no custo e peso próprio da estrutura. Definiu-se, portanto, como um fator apropriado para comparação entre os painéis.
- Consumo de armadura ativa: o aço possui alto custo de mercado por tonelada, em comparação ao concreto. Desta forma, também possui alta influência no preço do painel pré-moldado e constituiu-se assim como outro fator comparativo.
- Altura da seção (cm): a altura do painel utilizado deveria ser a mínima possível, de modo a não reduzir o pé-direito do pavimento, permitindo maior liberdade

arquitetônica, gerando edificações de menor altura total e facilitando o transporte e montagem no canteiro de obras do elemento estrutural.

- Peso próprio do painel (kN/m^2): o peso do painel influencia no processo executivo da estrutura, visto que este fator influencia na comparação dos processos executivos, determinado pelos equipamentos utilizados para o içamento e transporte dos painéis.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

O trabalho foi dividido em etapa inicial de fundamentação teórica presente no Capítulo 2, em que é apresentado o estado atual da arte, com conhecimentos adquiridos a partir de pesquisa bibliográfica sobre: edifícios garagem, sua correlação com sistemas construtivos associados a maiores índices de industrialização, e por fim, as lajes pré-moldadas protendidas alveolares e do tipo PI, destacando peculiaridades do sistema construtivo, que formulam uma base para o dimensionamento dos sistemas estruturais.

Posteriormente, são apresentados os casos de estudo no Capítulo 3, ao qual se incide o pré-dimensionamento do painel a ser adotado, definindo desta forma, as seções usualmente previstas por bibliografia para cada vão. O capítulo 4 mostra todas as etapas de dimensionamento dos elementos estruturais, explicitando as etapas de cálculo e divulgando os resultados por tabelas, permitindo ainda que sejam comparadas no capítulo 5, formando as considerações determinadas pelo trabalho de pesquisa.

O capítulo 6 apresenta a conclusão do estudo comparativo, dissertando sobre os resultados encontrados e completando assim o intuito de definição do sistema de painéis que se demonstra como mais apropriado dentre as hipóteses de estudo analisadas, além de sugerir sobre a possibilidade da realização de trabalhos de pesquisa futuros que possam complementar e se correlacionar com as informações divulgadas neste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO

No tocante a mobilidade urbana, dentre os seus temas mais contundentes, apresenta-se os estacionamentos nas cidades modernas, que vem associado à grande expansão de frotas de veículos e o aumento de viagens realizadas neles, gerando uma situação de oferta limitada de vagas para estacionar nas ruas e garagens. Nesse contexto, as políticas de mobilidade urbana costumam integrar estratégias e ações que englobam os setores mais diversos (BRINCO,2016).

2.2 EDIFÍCIO GARAGEM

Associado ao contexto de falta de espaço para estacionamentos individuais, ainda no século XX, surgiu a necessidade de construção de edifícios garagem. Inicialmente, estes constituíam-se de abrigos domiciliares para os veículos, porém, como o espaço para acomodação dos veículos apresentava-se em escassez nas regiões mais ocupadas, iniciou-se a construção de edifícios especializados para esta função, primeiramente de um pavimento e posteriormente, com múltiplos pavimentos e integrados a centros comerciais e empresariais (REZENDE, 2004).

Segundo Rezende (2004), os edifícios garagem são estruturas relativamente simples com poucos componentes estruturais e volumetria básica, na qual a principal preocupação em sua concepção é a de obtenção de uma plástica agradável e que as características do edifício sejam compostas pelos elementos estruturais afastados, de tal forma que se transformem em elementos arquitetônicos. Deste modo, este tipo de edifício relaciona-se ao conceito de coordenação modular, descrito por Ribeiro (2002), como “uma sistemática de base matemática que permite relacionar as medidas de projeto com as medidas modulares, sendo uma ferramenta essencial à sistematização da industrialização da construção civil”.

2.3 INDUSTRIALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

A industrialização da construção civil consiste na incorporação de procedimentos fabris e produção em série, tornando o processo construtivo mais rápido e reduzindo ao máximo as operações no canteiro de obras (RIBEIRO, 2002). Segundo El Debs (2017), a construção civil tem sido uma indústria atrasada comparada a outros ramos industriais, apresentando geralmente, baixa produtividade, grande desperdício de materiais, morosidade e baixo controle de qualidade.

Ainda assim, a evolução da indústria da construção civil aconteceu em diversas fases, na qual cada uma se caracterizou por uma diversidade de métodos, tecnologias e arquiteturas próprias. Atualmente, é possível observar uma significativa organização em alguns subsetores, caracterizados por modernos sistemas construtivos e processos de gestão industrial (SERRA *et.al.*, 2005).

2.4 CONCRETO PRÉ-MOLDADO

Dentre os diversos sistemas construtivos disponíveis associados a maiores índices de industrialização, destacam-se os pré-moldados de concreto, que estão entre os produtos mais viáveis, por se apresentarem como uma opção econômica, tanto no sentido de redução de uso de concreto e armadura, quanto na parcela relativa às formas e ao cimbramento, em que é mais significativa, além de trazer qualidade, durabilidade e redução de prazos nas construções (EL DEBS, 2017; RAFAELE *et.al.*, 2019; SERRA *et.al.*, 2005). Segundo IGLESIA (2006), os sistemas pré-moldados de concreto transformam a construção civil em uma cadeia produtiva semelhante a uma indústria automotiva, em que os processos de montagens de diversos componentes irão resultar num produto final, também trazendo, segundo Polat (2010), alta padronização e modularização devido a sua produção tecnológica e mecanizada.

O uso do concreto pré-moldado também traz benefícios ambientais, resultando não apenas na diminuição da exploração dos recursos naturais dos quais se derivam os materiais, mas também na redução do uso de recursos energéticos para a produção, mineração, transporte e instalação de tais, assim como a liberação de CO₂ na atmosfera. O uso da madeira também diminuiu significativamente, contribuindo para a preservação das florestas e da vida selvagem (YEE, 2001).

O uso do pré-moldado é mais predominante atualmente em países do Norte e Oeste da Europa, e de maneira geral, costumam ser mais consolidados em países industrializados e desenvolvidos, possuindo maior oferta de equipamentos, mão-de-obra mais valorizada e exigências de qualidade dos produtos mais rigorosa (POLAT, 2010; EL DEBS, 2017). Segundo El Debs (2017), para países em desenvolvimento como o Brasil, é esperado aumento em sua utilização.

Devido a ampla utilização deste sistema estrutural nos EUA, o instituto americano “Precast Prestressed Concrete Institute”, ou PCI, produz quantidade massiva de bibliografia e informações acerca destes sistemas, ao qual é reiteradamente referido neste trabalho, principalmente quando não encontradas informações tão detalhadas em bibliografias nacionais. Segundo PCI (2015), o concreto pré-moldado pretendido apresenta características relacionadas diretamente a melhor implantação dos edifícios garagem, por fatores relacionados a estética, funcionalidade, durabilidade, sustentabilidade, modularização e, principalmente, quanto ao potencial de redução do cronograma executivo, visto que a fabricação dos sistemas pode se dar simultaneamente as operações em canteiro de obras, desde a etapa de execução das fundações, o que condiz com a necessidade de prazos construtivos menores estimados para este tipo de edificação.

Os procedimentos de cálculo relativos às estruturas pré-moldadas de concreto no Brasil, de modo geral, são os mesmos aplicados para estruturas moldadas in loco, disposto na ABNT NBR 6118:2014, e possuindo peculiaridades descritas pela ABNT NBR 9062:2017, como exemplificadas a seguir:

- A análise estrutural dos componentes da estrutura deve partir da definição do comportamento efetivo das ligações, a partir dos graus de liberdade existentes, sendo essas zonas consideradas como trechos singulares, devendo ser dimensionadas para além da estabilidade da estrutura, como também para a fase de montagem.
- Deve-se levar em conta todas as fases por que possam passar os elementos, levando em conta os efeitos dinâmicos devido ao manuseio, transporte e montagem dos elementos, sendo possível realizar uma análise estática equivalente.

- A construção é encerrada quando houver a ligação definitiva do elemento com os outros elementos da estrutura e suas dimensões devem ser fixadas levando em conta tolerâncias globais compatíveis para cada tipo de elemento, determinadas pela própria norma técnica. Os desenhos de execução devem apresentar precisamente as dimensões e posições dos elementos pré-moldados.
- Os coeficientes de minoração considerados para o concreto e o aço em elementos pré-moldados, são de respectivamente, $\gamma_c=1,3$ e $\gamma_s=1,1$.

2.5 CONCRETO PROTENDIDO

A associação do concreto pré-moldado ao uso de protensão é extremamente eficaz, permitindo melhor desempenho estrutural. Para o concreto protendido, é considerado que se funciona da mesma forma em relação ao concreto armado, tendo, portanto, seus procedimentos de cálculo também definidos pela ABNT NBR 6118:2014. A sua peculiaridade é que sua armadura, em parte ou quase na totalidade, é ativa, na qual o aço é submetido a tensão inicial, sendo distendido por elementos externos à estrutura, processo denominado por protensão (CARVALHO, 2017).

2.6 LAJES PRÉ-MOLDADAS

Segundo PCI (2015), a utilização de lajes pré-moldadas se associam ao vencimento eficiente de vãos mais longos, com maiores espaços livres entre os pilares, o que se constitui como um aspecto favorável para a aplicação em edifícios garagem, gerando melhor circulação e visualização dos veículos e de pedestres e incorporação de espaço necessário para grandes módulos de estacionamento padrão ou filas duplas de vagas. Ressalta-se também que para estes elementos estruturais, demonstra-se importante a verificação da resistência estrutural durante tempo mínimo estipulado por legislação local para situação de incêndio.

Dentre os sistemas mais utilizados para piso e cobertura pré-moldados, existem dois tipos a se destacar, sendo estes os sistemas de painéis alveolares protendidos e os sistemas de painéis com nervuras protendidas em seções de duplo T ou TT, também conhecidas como

painéis do tipo PI. Estes sistemas apresentam vantagens quanto a rapidez de construção, ausência de escoramento, alta capacidade de vencer vãos e economia (IGLESIA, 2006).

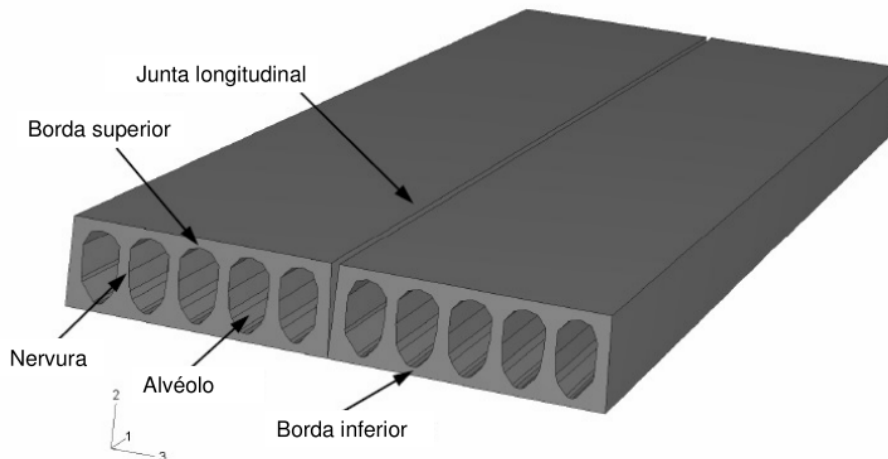
Segundo PCI (2015), após a seleção do tipo, tamanho e forma do elemento estrutural, deve ser considerado em etapa de projeto o transporte e içamento das peças, constituindo-se, portanto, de fatores importantes para a comparação entre diferentes tipos de painéis para composição de um pavimento.

2.6.1 LAJES ALVEOLARES

Os painéis alveolares constituem-se como um dos mais populares elementos pré-moldados utilizados no mundo, especialmente na América do Norte e na Europa (EL DEBS, 2017), e provavelmente, o elemento de protensão com aderência inicial mais usado no mercado brasileiro (CARVALHO, 2017). Podem ser empregados tanto para execução de lajes, podendo receber uma capa de concreto para formar seção composta, sendo este o mais comum, quanto para paredes, e costumam ser moldados por extrusão ou por fôrmas deslizantes, produzidos em pistas longas de concretagem ao longo de seu comprimento, em concreto protendido, e posteriormente, serrados nos comprimentos desejados, com auxílio de equipamentos, sendo evitado a colocação de dispositivos de içamento, para não prejudicar a racionalização do processo (EL DEBS, 2017).

Os painéis alveolares se caracterizam essencialmente pela presença de alvéolos em sua seção transversal (núcleos vazios longitudinais), mesmo que apresentem variações em relação à forma do vazamento, e por apresentarem cordoalhas de protensão como única armadura presente, o que possibilita o aumento da capacidade portante, redução de deslocamentos verticais e diminuição da fissuração no concreto. As cordoalhas podem se apresentar dispostas nas fibras inferiores ou superiores, dependendo da solicitação da peça (PETRUCELLI, 2009). A figura 4 representa a esquematização de uma seção transversal de um painel alveolar, apresentando seus elementos constituintes.

Figura 4. Esquemática de unidade de painel alveolar.



Fonte: Edekling e Rettne (2009).

O sistema de lajes alveolares se caracteriza principalmente por rapidez de execução e montagem, redução da espessura pela protensão, alvéolos que minimizam o peso do pavimento e que permitem abrigar dutos para redes elétricas ou hidráulicas, melhorando o aproveitamento dos espaços; além de apresentarem excelentes propriedades térmicas e acústicas e boa qualidade do acabamento da superfície inferior, ao qual pode não necessitar de nenhum tratamento. (PETRUCELLI, 2009)

A laje alveolar é considerada inteira para orçamento do empreendimento, e deve-se analisar a sua modulação em fase de projeto, para evitar desperdícios com recortes longitudinais. No Brasil, são usualmente utilizados para vãos entre 6m e 12m, com seções de largura em torno de 1,20m e altura variando entre 0,15m e 0,40m. A capa estrutural de concreto moldado em loco, pode ter espessura média de 5,0cm, e possui funções de acabamento, garantindo o nivelamento da superfície da laje; correção da contraflecha causada pela protensão e melhoria do comportamento estrutural da seção, com aumento da inércia e efeito de diafragma horizontal, permitindo a mobilização de todos os elementos para absorver as ações laterais de vento. (COSTA, 2009)

Segundo Petrucelli (2009), para os painéis alveolares, a protensão aplicada é de pré-tração, no qual a armadura é tracionada antes do lançamento do concreto, e ocorre com a sua aderência ao concreto, após seu endurecimento. Deve-se analisar a intensidade de protensão, mantendo a durabilidade das peças, evitando a corrosão das armaduras e

realizando as verificações de fissuração nos estados limites de serviço, além de definir o tipo de protensão (completa, limitada ou parcial), em função do tipo da construção ou da agressividade ambiental.

Após o dimensionamento das peças, é necessário avaliar as situações críticas, em função da carga aplicada e do vão, sendo estas: capacidade de suporte, resistência à cortante, resistência à flexão, limites de deformação e transporte. De maneira geral, quanto menor o tamanho da laje, mais crítica a capacidade de suporte e quanto maior o vão, mais a laje tende a romper por flexão, existindo o limitante do transporte das peças para vãos muito grandes. (PETRUCELLI, 2009)

Para a análise estrutural destas lajes, admite-se que o elemento tenha um comportamento correspondente ao de uma laje armada em uma direção. Normalmente, são elementos simplesmente apoiados, que podem apresentar pequenos balanços. Procura-se não transmitir momentos fletores negativos nos apoios, podendo existir em intensidade reduzida devido ao uso de armadura na meia altura da seção para transferir esforços no plano da laje, podendo ser avaliados a partir de indicações da FIP. (EL DEBS, 2017)

2.6.2 LAJES DO TIPO PI

Os painéis do tipo PI também se apresentam como elementos de destaque na indústria moderna de lajes pré-moldadas de concreto protendido. Segundo PCI (2015), constituem-se como o elemento estrutural mais utilizado para composição de pavimentos de edifícios garagem nos EUA, sobretudo devido a evolução na largura das seções empregadas no país, usualmente utilizando-se de elementos com 3,60 metros, além de registros de utilização bem-sucedida de elementos com larguras de 4,50 metros e discussões acerca da utilização de até 4,80 metros. Tal característica permite a execução de pavimentos com menor número de peças, portanto menos repetições de içamento. No Brasil, os elementos possuem usualmente 2,50 metros de largura.

Constituem-se de elementos de grande inércia, podendo ser considerados como vigas em lajes acopladas, e suas características geométricas podem ser associadas a diferentes níveis de protensão (CARVALHO, 2017; SOUSA, 2014). A figura 5 apresenta o içamento de uma unidade de painel duplo T.

Figura 5. Unidade de painel duplo T.



Fonte: PORTAL AECWEB. Extraído de: https://www.aecweb.com.br/prod/e/laje-duplo-t-laje-pi-34793_35435 - acessado dia 25/11/2020 às 9h.

Costuma-se empregar este tipo de sistema construtivo para vencer grandes vãos e sobrecargas, em especial em edificações em que o valor do pé-direito não é crítico. Possuem também excelente acabamento inferior, dispensando forro ou reboco em sua aplicação. (SOUSA, 2014). A figura 6 demonstra sua aplicação em um edifício garagem, sem acabamento adicional.

Figura 6. Laje duplo T em um edifício garagem.



Fonte: Sousa (2014).

Segundo Sousa (2014), as vantagens desse sistema podem ser oferecidas para clientes que buscam um empreendimento bem-sucedido, projetistas e construtores. Para os clientes, exalta-se que pode-se criar grandes áreas de pavimentos sem pilares, com rapidez na montagem, o que permite um rápido retorno de investimento para empreendimentos, grande flexibilidade na modulação de edifícios, elevada qualidade de concreto, que requer uma manutenção mínima, além de que, por não possuir necessidade de acabamentos inferiores, representa redução de custos; para o projetista, as lajes duplo T são uma boa solução por poderem proporcionar vencimento de vãos de até cerca de 21 metros, apresentando baixo peso próprio, o que sugere economia nos elementos de suporte e fundações, assim como flexibilidade na montagem de instalações especiais; para o construtor, oferece facilidade e rapidez na montagem, sendo possível a preparação de 2500m² de pavimento em uma semana de trabalho, possibilitando também acesso mais rápido às áreas de pavimentos para execução de acabamentos.

A análise estrutural do sistema de lajes protendidas TT segue um roteiro de dimensionamento semelhante ao de lajes alveolares, com a avaliação da protensão e verificações no Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), destacando-se a singularidade de que para o levantamento das características geométricas, tratando-se de uma seção com inércia variável ao longo da alma, é necessária a adequação para uma seção T com largura b_f equivalente (SILVA, 2018). Como particularidade deste sistema, apresenta-se a necessidade da análise de reforço da espessura de mesa da seção para que seja garantida a resistência mínima a situação de incêndio requisitada pela legislação (PCI, 2015).

A partir da fundamentação teórica estabelecida neste tópico, pode-se prosseguir com o trabalho, constituindo-se de uma comparação técnica entre os dois sistemas de lajes pré-moldadas abordadas (alveolares e duplo T) para utilização de um edifício garagem, prosseguindo com a apresentação do pré-dimensionamento estrutural, apresentado no capítulo 3.

3. APRESENTAÇÃO DOS CASOS

Os casos adotados para realização do projeto estrutural encontram-se apresentados neste capítulo, em etapa de pré-dimensionamento. Para a adoção inicial das seções a serem definidas para cada caso, foi realizada pesquisa por tabelas de pré-dimensionamento que apresentassem simultaneamente as seguintes informações:

- Seção do painel usualmente adotado em relação ao tamanho do vão a ser vencido.
- Características da seção do painel individual, como altura, área, peso e momentos de inércia.
- Características da seção composta por painel e capa de concreto de 5 centímetros, como momento de inércia, peso e módulos de resistência das bordas inferior e superior.

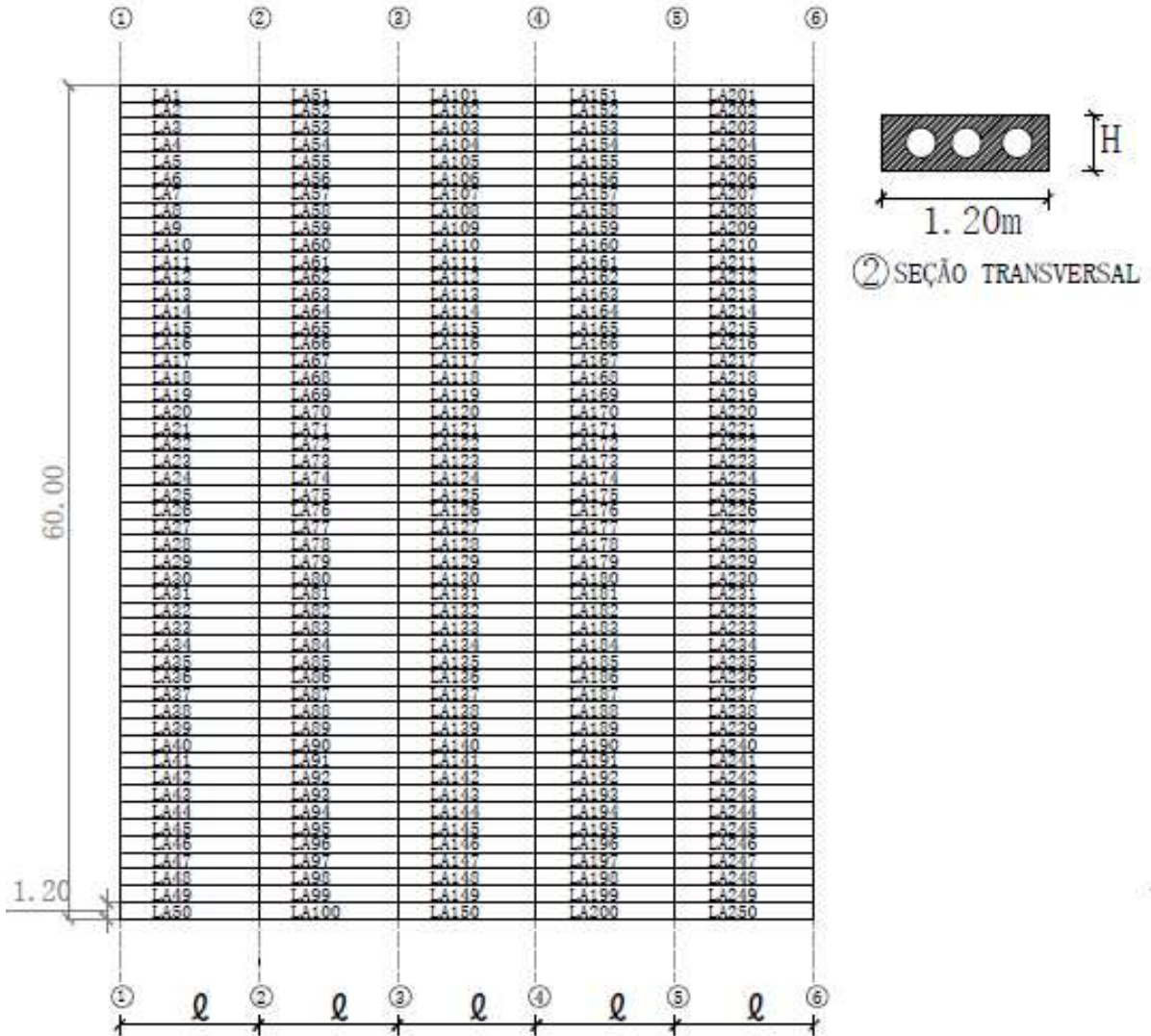
Não foi encontrado nenhum material de consulta de origem nacional que possuísse todos os dados mencionados anteriormente. Portanto, utilizou-se os dados fornecidos pelo manual de origem estadunidense "PCI Design Handbook". Os dados foram retirados principalmente da 7ª edição, elaborada em 2010, recorrendo à uma edição mais antiga (5ª edição, elaborada em 1999) apenas para a situação particular descrita no tópico 3.2. Referenciam-se, respectivamente, por (PCI,2010) e (PCI,1999).

Todas as tabelas de pré-dimensionamento utilizadas apresentam-se nos anexos A, B e C deste trabalho, apresentadas em unidades usuais estado-unidenses, tendo sido convertidas para o SI para realização deste trabalho. As apresentações dos casos são realizadas a seguir em tópicos distintos para cada um dos sistemas estruturais.

3.1 PAINÉIS ALVEOLARES

Os painéis alveolares que compõem o pavimento tipo possuem seções com largura de 1,20m, enquanto comprimentos e alturas variáveis, variando em relação ao tamanho do vão a ser vencido. A figura 7 apresenta a locação dos 250 painéis alveolares adotados para composição do pavimento tipo do edifício garagem.

Figura 7. Planta de locação dos painéis alveolares (unidades em metros).



① PLANTA DE LOCAÇÃO DOS PAINÉIS ALVEOLARES

Fonte: Do Autor.

O pré-dimensionamento dos painéis fora realizado em função do vão, tomando como referência as tabelas para o pré-dimensionamento de lajes alveolares presentes em (PCI, 2010), e por sua vez, apresentadas no anexo A. Dessa forma, apresenta-se na tabela 2 as seções de painel alveolar adotadas para os demais casos de estudo, ressaltando-se que para todos os casos é prevista a incorporação de capa estrutural de 5 cm.

Tabela 2. Seções de painéis alveolares (pré-dimensionamento).

Caso	Tamanho do Vão - ℓ (m)	f_{ck} - concreto (kN/cm ²)	Seção	h (cm)	Altura total com capa (cm)
A1	10,0	4,0	4HC8	20	20+5
A2	10,0	6,0	4HC8	20	20+5
A3	10,0	8,0	4HC8	20	20+5
A4	12,5	4,0	4HC10	25	25+5
A5	12,5	6,0	4HC10	25	25+5
A6	12,5	8,0	4HC10	25	25+5
A7	15,0	4,0	4HC12	30	25+5
A8	15,0	6,0	4HC12	30	30+5
A9	15,0	8,0	4HC12	30	30+5
A10	17,5	4,0	4HC16	40	40+5
A11	17,5	6,0	4HC16	40	40+5
A12	17,5	8,0	4HC16	40	40+5
A13	20,0	4,0	4HC20	50	50+5
A14	20,0	6,0	4HC20	50	50+5
A15	20,0	8,0	4HC20	50	50+5

Fonte: Do Autor.

Definidas as seções de painéis alveolares que serão analisadas, apresentam-se suas propriedades geométricas na tabela 3, tanto para a unidade isolada do painel, quanto para a seção composta pelo painel e a capa de concreto de 5 centímetros.

Tabela 3. Propriedades geométricas das seções de painéis alveolares.

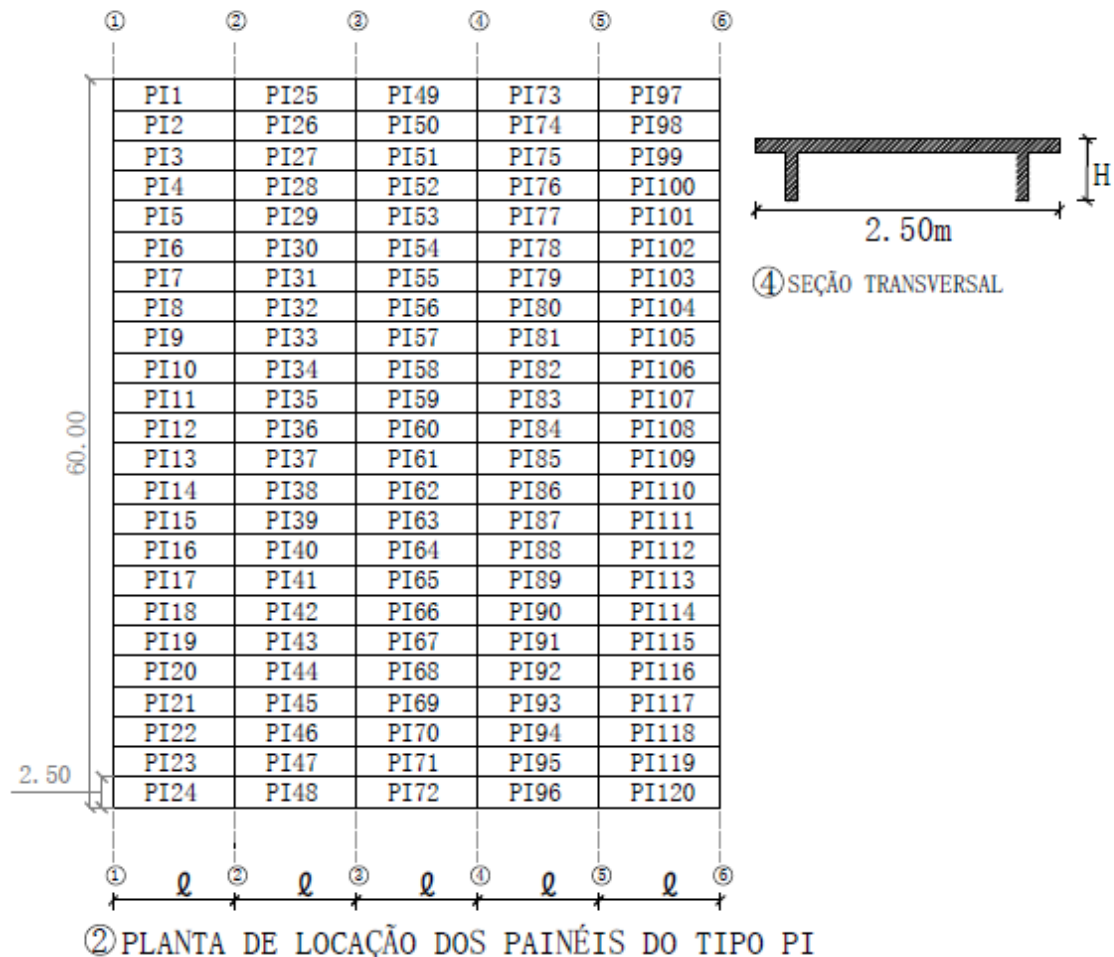
Seção	SEM CAPA			COM CAPA			
	Área (cm ²)	Momento de inércia (cm ⁴)	Peso próprio - g_1 (kN/m ²)	Momento de inércia (cm ⁴)	W_{inf} (cm ³)	W_{sup} (cm ³)	Peso próprio - g_1 (kN/m ²)
8DT12	1851,6	119541,3	1,80	182683,3	6882,6	20254,4	3,00
8DT24	2587,1	873458,7	2,50	1153789,6	23564,6	67498,3	3,70
8DT32	3658,1	2308578,1	3,50	2992111,0	49783,9	113922,9	4,75

Fonte: Do Autor.

3.2 PAINÉIS DUPLO T

Por sua vez, os painéis duplo T que compõem o pavimento tipo nos 15 casos de estudo restantes possuirão seções com largura de 2,50m, enquanto comprimentos e alturas também variáveis, em relação ao tamanho do vão a ser vencido. A disposição dos 120 painéis do tipo PI para a composição do pavimento tipo está representada na figura 8.

Figura 8. Planta de locação dos painéis duplo T (unidades em metros).



Fonte: Do Autor.

Para o pré-dimensionamento das seções utilizaram-se as tabelas apresentadas nos anexos B e C, retiradas respectivamente de (PCI, 1999) e (PCI, 2010), visto que a versão mais recente não incluía em seus registros o painel duplo T com altura de seção igual a 30cm (seção 8DT12). Dessa forma, fornecem-se as seções que serão adotadas inicialmente para cada caso, apresentadas pela tabela 4.

Tabela 4. Seções de painéis duplo T (pré-dimensionamento).

Caso	Tamanho do Vão - ℓ (m)	f_{ck} - concreto (kN/cm ²)	Seção	h (cm)	Altura total com capa (cm)
P1	10,0	4,0	8DT12	30	30+5
P2	10,0	6,0	8DT12	30	30+5
P3	10,0	8,0	8DT12	30	30+5
P4	12,5	4,0	8DT24	60	60+5
P5	12,5	6,0	8DT24	60	60+5
P6	12,5	8,0	8DT24	60	60+5
P7	15,0	4,0	8DT24	60	60+5
P8	15,0	6,0	8DT24	60	60+5
P9	15,0	8,0	8DT24	60	60+5
P10	17,5	4,0	8DT24	60	60+5
P11	17,5	6,0	8DT24	60	60+5
P12	17,5	8,0	8DT24	60	60+5
P13	20,0	4,0	8DT32	80	80+5
P14	20,0	6,0	8DT32	80	80+5
P15	20,0	8,0	8DT32	80	80+5

Fonte: Do Autor.

Assim como para as seções dos painéis alveolares, apresentam-se as propriedades geométricas pela tabela 5, tanto para a unidade isolada de painel duplo T, quanto para a seção composta pelo painel e capa estrutural de concreto de 5 centímetros.

Tabela 5. Propriedades geométricas das seções de painéis duplo T.

Seção	SEM CAPA			COM CAPA			
	Área (cm ²)	Momento de inércia (cm ⁴)	Peso próprio - g_1 (kN/m ²)	Momento de inércia (cm ⁴)	W_{inf} (cm ³)	W_{sup} (cm ³)	Peso próprio - g_1 (kN/m ²)
8DT12	1851,6	119541,3	1,80	182683,3	6882,6	20254,4	3,00
8DT24	2587,1	873458,7	2,50	1153789,6	23564,6	67498,3	3,70
8DT32	3658,1	2308578,1	3,50	2992111,0	49783,9	113922,9	4,75

Fonte: Do Autor.

4. DIMENSIONAMENTO

Este tópico contém a roteirização do projeto estrutural do piso do pavimento tipo para os painéis pré-moldados. Inicialmente, realizou-se o dimensionamento a partir das seções adotadas no pré-dimensionamento (Capítulo 3), sendo alterados postumamente para as mínimas seções possíveis, desde que fosse verificada a resistência dos elementos estruturais, a partir das três situações a seguir:

- Tensão resultante de compressão na borda superior da laje não supera a resistência a compressão de cálculo do concreto.
- O KMD calculado para os demais casos não supera o valor de 0,259.
- As tensões no “tempo 0” resultantes dos carregamentos atuantes em conjunto à protensão são verificadas.

4.1 LEVANTAMENTO DOS MÁXIMOS ESFORÇOS SOLICITANTES

Como mencionado no tópico 1.3., que expõe a metodologia deste trabalho, as cargas atuantes no pavimento e a combinação de ações para o Estado Limite Último (ELU) consideradas para o projeto constituem-se de:

- Peso próprio da estrutura (g_1): variável para cada caso de estudo.
- Peso de revestimento (g_2): considerado por 0,11 kN/m².
- Sobrecarga (q): considerada por 5,00 kN/m².
- *Estado Limite Último*: $p = 1,5 \times q + 1,35 \times g_1 + 1,40 \times g_2$

A análise estrutural será realizada considerando os painéis como elementos isostáticos e isolados, como indicado para lajes alveolares na norma ABNR NBR 14861:2011, e considerando-se o mesmo procedimento para os painéis duplo T.

Ressalta-se também, que para o dimensionamento estrutural realizado neste trabalho não foram verificadas as particularidades usualmente previstas para as situações de incêndio, devendo ser analisada a resistência estrutural por tempo mínimo de incêndio determinado pela legislação referente a localidade em que se situa a edificação quando for executada, como mencionado no capítulo 2.

Para simplificação de cálculo, considerou-se que os painéis formam planos de lajes bi-apoiados, não formando continuidade entre os elementos. Portanto, os esforços resultantes máximos de momento fletor e força cortante foram considerados a partir das equações 2 e 3:

$$M_{sd, \text{vão}}(kN.m) = b \times \frac{pl^2}{8} \quad (\text{Equação 2})$$

$$V_{sd} \left(\frac{kN}{m} \right) = \frac{Fd \times L}{2} - Fd \times 0,5h \quad (\text{Equação 3})$$

A tabela 6 apresenta os valores calculados de esforços solicitantes para os demais casos, além das verificações das tensão resultantes de compressão na borda superior da laje (ressalta-se que para este cálculo, fora considerado os módulos de resistência referentes às seções compostas pela unidade do painel e a capa de concreto, apresentadas pelas tabelas 3 e 5). Ressalta-se também que, como mencionado no Capítulo 2, para concreto pré-moldado, considera-se $\gamma_c=1,3$.

As tabelas demonstradas neste capítulo apresentam adotadas as mínimas seções possíveis às quais fora verificado as três situações descritas anteriormente. Portanto, todas as situações apresentadas constituem-se com seções que foram adotadas ao fim do projeto estrutural.

Tabela 6. Esforços máximos solicitantes de cálculo.

Tipo de Laje	Casos	Seção	g_i (kN/m ²)	p_{ELU} (kN/m ²)	M_{Sd} (kN.m)	V_{Sd} (kN/m)	f_{cd} (kN/cm ²)	σ_{sup} (kN/cm ²)
ALVEOLAR	A1	4HC8	3,90	12,8	193,7	63,3	3,1	1,8
	A2	4HC8	3,90	12,8	193,7	63,3	4,6	1,8
	A3	4HC8	3,90	12,8	193,7	63,3	6,2	1,8
	A4	4HC10	4,50	13,6	321,6	84,1	3,1	2,1
	A5	4HC8	3,90	12,8	302,7	79,4	4,6	2,8
	A6	4HC8	3,90	12,8	302,7	79,4	6,2	2,8
	A7	4HC12	4,50	13,6	463,2	100,9	3,1	2,3
	A8	4HC10	4,50	13,6	463,2	101,2	4,6	3,0
	A9	4HC10	4,50	13,6	463,2	101,2	6,2	3,0
	A10	4HC16	5,50	14,9	692,4	128,9	3,1	2,4
	A11	4HC12	4,50	13,6	630,4	118,0	4,6	3,2
	A12	4HC12	4,50	13,6	630,4	118,0	6,2	3,2
	A13	4HC20	6,30	16,0	969,2	157,5	3,1	2,0
	A14	4HC16	5,50	14,9	904,4	147,7	4,6	3,1
	A15	4HC16	5,50	14,9	904,4	147,7	6,2	3,1
DUPLO T	P1	8DT12	3,00	11,6	365,6	56,7	3,1	1,8
	P2	8DT12	3,00	11,6	365,6	56,7	4,6	1,8
	P3	8DT12	3,00	11,6	365,6	56,7	6,2	1,8
	P4	8DT12	3,00	11,6	571,2	71,4	3,1	2,8
	P5	8DT12	3,00	11,6	571,2	71,4	4,6	2,8
	P6	8DT12	3,00	11,6	571,2	71,4	6,2	2,8
	P7	8DT24	3,70	12,5	889,0	91,0	3,1	1,3
	P8	8DT24	3,70	12,5	889,0	91,0	4,6	1,3
	P9	8DT24	3,70	12,5	889,0	91,0	6,2	1,3
	P10	8DT24	3,70	12,5	1210,0	106,8	3,1	1,8
	P11	8DT24	3,70	12,5	1210,0	106,8	4,6	1,8
	P12	8DT24	3,70	12,5	1210,0	106,8	6,2	1,8
	P13	8DT24	3,70	12,5	1580,4	122,6	3,1	2,3
	P14	8DT24	3,70	12,5	1580,4	122,6	4,6	2,3
	P15	8DT24	3,70	12,5	1580,4	122,6	6,2	2,3

Fonte: Do Autor.

4.2 PROTENSÃO

Considerou-se a perda de protensão equivalente a 20% da protensão inicial adotada, e, sabendo-se que a armadura ativa se constituirá de aço CP190RB, obteve-se que a tensão de pré-alongamento inicial deveria satisfazer as condições:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 \times 1900 = 1463MPa \\ 0,85 \times 0,90 \times 1900 = 1453,5 MPa \end{cases}$$

Logo, considerou-se $\sigma_{pi} = 1453,5 MPa$ e:

$$\sigma_{p\infty} = \left(1 - \frac{p}{100}\right) \times \sigma_{pi} = \left(1 - \frac{p}{100}\right) \times \sigma_{pi} = (1 - 0,20) \times 1453,5 = 1162,8 MPa$$

$$\Delta\varepsilon_{pi} = \frac{\sigma}{E} = \frac{1162,8MPa}{200000MPa} = 0,005814 = 5,81\%$$

4.2.1 ÁREA DE ARMADURA ATIVA

Considerou-se, a partir das especificações descritas pela ABNT NBR 6118:2014, a classe de agressividade ambiental II, que determina cobrimento nominal para lajes de concreto protendido como 3,0cm. Desta forma, calculou-se a altura útil como a altura da seção decrescida de 4 cm (1 cm adicional como estimativa da distância “face ao CG da armadura”).

Para o cálculo da armadura ativa (A_p), utilizou-se o cálculo simplificado por KZ, descrito pelas equações 4 a 9, e que se apresentam na tabela 7, sendo o KMD limitado a 0,259. A tabela 8 demonstra a área de armadura ativa, com sua disposição de acordo com a tabela de cordoalhas apresentada no anexo D e a intensidade da protensão no “tempo zero”.

$$KMD = \frac{M_{sd}}{b \times d^2 \times f_{cd}} = 0,68(KX) - 0,272(KX)^2 \quad (\text{Equação 4})$$

$$KZ = 1 - 0,4 * KX \quad (\text{Equação 5})$$

$$A_p = \frac{M_{sd}}{KZ \times d \times \sigma_{pd}} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\varepsilon_{pd} = \varepsilon_{pi} + \Delta\varepsilon_{pd} = 5,18\%_0 + 10,00\%_0 = 15,18\%_0 \quad (\text{Equação 7})$$

$$\sigma_{pd} = 15,18\%_0 \times \frac{200.000MPa}{1,4} = 2168,6MPa$$

$$N_{p0} = 1,1 \times A_p \times \sigma_{p0} \quad (\text{Equação 8})$$

$$\sigma_{p0} = 0,95 \times \sigma_{pd} \quad (\text{Equação 9})$$

Ressalta-se que para o cálculo da armadura da laje duplo T, considera-se inicialmente apenas uma metade do painel, que apresenta apenas uma nervura de seção T. Portanto, na

tabela 7, o b_w equivalente corresponde à metade da largura do painel (125 cm) e na tabela 8 a área de armadura necessária é dobrada para corresponder ao painel inteiro.

Tabela 7. Cálculo de KMD, KX e KZ.

Tipo de Laje	Caso	Seção	ℓ (m)	b (cm)	d (cm)	M_{sd} (kN.m/m)	KMD	KX	KZ
ALVEOLAR	A1	4HC8	10,0	120	16	193,7	0,205	0,351	0,860
	A2	4HC8	10,0	120	16	193,7	0,137	0,220	0,912
	A3	4HC8	10,0	120	16	193,7	0,102	0,161	0,936
	A4	4HC10	12,5	120	21	321,6	0,198	0,336	0,866
	A5	4HC8	12,5	120	16	302,7	0,213	0,368	0,853
	A6	4HC8	12,5	120	16	302,7	0,160	0,263	0,895
	A7	4HC12	15,0	120	26	463,2	0,186	0,312	0,875
	A8	4HC10	15,0	120	21	463,2	0,190	0,320	0,872
	A9	4HC10	15,0	120	21	463,2	0,142	0,230	0,908
	A10	4HC16	17,5	120	36	692,4	0,145	0,235	0,906
	A11	4HC12	17,5	120	26	630,4	0,168	0,279	0,889
	A12	4HC12	17,5	120	26	630,4	0,126	0,202	0,919
	A13	4HC20	20,0	120	46	969,2	0,124	0,198	0,921
	A14	4HC16	20,0	120	36	904,4	0,126	0,202	0,919
	A15	4HC16	20,0	120	36	904,4	0,095	0,148	0,941
DUPLO T	P1	8DT12	10,0	125	26	182,8	0,070	0,108	0,957
	P2	8DT12	10,0	125	26	182,8	0,047	0,071	0,972
	P3	8DT12	10,0	125	26	182,8	0,035	0,053	0,979
	P4	8DT12	12,5	125	26	285,6	0,110	0,174	0,931
	P5	8DT12	12,5	125	26	285,6	0,073	0,113	0,955
	P6	8DT12	12,5	125	26	285,6	0,055	0,084	0,967
	P7	8DT24	15,0	125	56	444,5	0,037	0,055	0,978
	P8	8DT24	15,0	125	56	444,5	0,025	0,037	0,985
	P9	8DT24	15,0	125	56	444,5	0,018	0,027	0,989
	P10	8DT24	17,5	125	56	605,0	0,050	0,076	0,970
	P11	8DT24	17,5	125	56	605,0	0,033	0,050	0,980
	P12	8DT24	17,5	125	56	605,0	0,025	0,037	0,985
	P13	8DT24	20,0	125	56	790,2	0,066	0,100	0,960
	P14	8DT24	20,0	125	56	790,2	0,044	0,066	0,974
	P15	8DT24	20,0	125	56	790,2	0,033	0,049	0,980

Fonte: Do Autor.

Tabela 8. Cálculo da armadura de protensão.

Tipo de Laje	Caso	A _{p-calc} (cm ²)	Cordoalha		A _{p-cordoalha} (cm ²)	N (unid.)	A _{p-ef} (cm ²)	N _{p0} (kN)
			Nº fios	Diâmetro nominal (mm)				
ALVEOLAR	A1	6,49	3 fios	11,1	0,67	10	6,70	1518,3
	A2	6,12	3 fios	11,1	0,67	10	6,70	1518,3
	A3	5,97	3 fios	11,1	0,67	9	6,03	1366,5
	A4	8,16	7 fios	12,7	1,01	9	9,09	2060,0
	A5	10,23	7 fios	12,7	1,01	11	11,11	2517,7
	A6	9,75	7 fios	12,7	1,01	10	10,10	2288,8
	A7	9,38	7 fios	12,7	1,01	10	10,10	2288,8
	A8	11,66	7 fios	12,7	1,01	12	12,12	2746,6
	A9	11,20	7 fios	15,2	1,43	8	11,44	2592,5
	A10	9,79	7 fios	15,2	1,43	7	10,01	2268,5
	A11	12,58	7 fios	15,2	1,43	9	12,87	2916,6
	A12	12,16	7 fios	15,7	1,50	9	13,50	3059,4
	A13	10,55	7 fios	15,2	1,43	8	11,44	2592,5
	A14	12,60	7 fios	15,2	1,43	9	12,87	2916,6
	A15	12,31	7 fios	15,7	1,50	9	13,50	3059,4
DUPLO T	P1	6,78	7 fios	15,7	1,50	5	7,50	1699,6
	P2	6,67	7 fios	15,7	1,50	5	7,50	1699,6
	P3	6,62	7 fios	15,7	1,50	5	7,50	1699,6
	P4	10,89	7 fios	15,7	1,50	8	12,00	2719,4
	P5	10,61	7 fios	15,7	1,50	8	12,00	2719,4
	P6	10,48	7 fios	15,7	1,50	7	10,50	2379,5
	P7	7,49	7 fios	15,7	1,50	5	7,50	1699,6
	P8	7,43	7 fios	15,7	1,50	5	7,50	1699,6
	P9	7,40	7 fios	15,7	1,50	5	7,50	1699,6
	P10	10,28	7 fios	15,7	1,50	7	10,50	2379,5
	P11	10,17	7 fios	15,7	1,50	7	10,50	2379,5
	P12	10,12	7 fios	15,7	1,50	7	10,50	2379,5
	P13	13,56	7 fios	15,7	1,50	10	15,00	3399,3
	P14	13,37	7 fios	15,7	1,50	9	13,50	3059,4
	P15	13,27	7 fios	15,7	1,50	9	13,50	3059,4

Fonte: Do Autor.

4.2.2 VERIFICAÇÃO DA PROTENSÃO

A força de protensão também foi verificada para as tensões normais no “tempo zero” para as bordas superior e inferior da laje, a partir das equações 10 e 11, sabendo que os módulos de resistência considerados são os referentes às seções geométricas sem capa e o

momento fletor no “tempo zero” constitui-se apenas pelo peso próprio da laje. Os dados são apresentados na tabela 9, estabelecendo o sinal positivo para tração e negativo para compressão.

$$\sigma_{sup} = -\frac{N_{p0}}{A} + \frac{N_{p0} \times e_p}{W_{sup}} - \frac{M_0}{W_{sup}} \quad (\text{Equação 10})$$

$$\sigma_{inf} = -\frac{N_{p0}}{A} - \frac{N_{p0} \times e_p}{W_{inf}} + \frac{M_0}{W_{inf}} \quad (\text{Equação 11})$$

Tabela 9. Verificação da protensão nas bordas superior e inferior.

Tipo de Laje	Caso	N _{p0} (kN)	M ₀ (kN.m)	e _p (cm)	f _{ck} (kN/cm ²)	Equação 10 (kN/cm ²)	Status	Equação 11 (kN/cm ²)	Status
ALVEOLAR	A1	1518,3	58,5	5,85	4,0	-0,7	OK	-1,5	OK
	A2	1518,3	58,5	5,85	6,0	-0,7	OK	-1,5	OK
	A3	1366,5	58,5	5,85	8,0	-0,7	OK	-1,3	OK
	A4	2060,0	105,5	8,31	4,0	-0,6	OK	-1,9	OK
	A5	2517,7	91,4	8,31	6,0	-0,1	OK	-3,5	OK
	A6	2288,8	91,4	8,31	8,0	-0,2	OK	-3,1	OK
	A7	2288,8	151,9	10,76	4,0	-0,7	OK	-2,1	OK
	A8	2746,6	151,9	10,76	6,0	-0,3	OK	-3,0	OK
	A9	2592,5	151,9	10,76	8,0	-0,3	OK	-2,8	OK
	A10	2268,5	252,7	15,76	4,0	-0,5	OK	-1,5	OK
	A11	2916,6	206,7	15,76	6,0	0,1	OK	-3,6	OK
	A12	3059,4	206,7	15,76	8,0	0,2	OK	-3,8	OK
	A13	2592,5	378,0	20,73	4,0	-0,4	OK	-1,4	OK
	A14	2916,6	330,0	20,73	6,0	-0,1	OK	-2,5	OK
	A15	3059,4	330,0	20,73	8,0	0,0	OK	-2,7	OK
DUPLO T	P1	1699,6	93,8	2,84	4,0	-1,2	OK	0,0	OK
	P2	1699,6	93,8	2,84	6,0	-1,2	OK	0,0	OK
	P3	1699,6	93,8	2,84	8,0	-1,2	OK	0,0	OK
	P4	2719,4	146,5	2,84	4,0	-1,9	OK	-0,1	OK
	P5	2719,4	146,5	2,84	6,0	-1,9	OK	-0,1	OK
	P6	2379,5	146,5	12,45	8,0	-0,4	OK	-4,2	OK
	P7	1699,6	260,2	12,45	4,0	-0,8	OK	-0,4	OK
	P8	1699,6	260,2	12,45	6,0	-0,8	OK	-0,4	OK
	P9	1699,6	260,2	12,45	8,0	-0,8	OK	-0,4	OK
	P10	2379,5	354,1	12,45	4,0	-1,0	OK	-0,6	OK
	P11	2379,5	354,1	12,45	6,0	-1,0	OK	-0,6	OK
	P12	2379,5	354,1	12,45	8,0	-1,0	OK	-0,6	OK
	P13	3399,3	462,5	12,45	4,0	-1,4	OK	-1,1	OK
	P14	3059,4	462,5	12,45	6,0	-1,3	OK	-0,8	OK
	P15	3059,4	462,5	12,45	8,0	-1,3	OK	-0,8	OK

Fonte: Do Autor.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados encontrados a partir do projeto estrutural dos pavimentos, ao qual se incidiram as análises comparativas entre os fatores já mencionados pela explanação da metodologia do trabalho (tópico 1.3.) e retomados a seguir:

- Peso próprio do painel;
- Altura da seção;
- Consumo de concreto;
- Consumo de aço.

A análise dos resultados é composta por uma apresentação inicial dos fatores comparativos para todos os casos de estudo. A partir daí, adotou-se para cada tamanho de vão duas soluções de seção de painel para composição do pavimento (uma para painel alveolar e outra para painel duplo T). Esta escolha fora realizada priorizando o menor consumo de concreto para o vão estudado, visto que, é permitido que se adote o melhor f_{ck} para cada caso de estudo. Desta forma, estudou-se as relações entre os fatores comparativos dos dois sistemas de painéis ao longo de cada tamanho do vão.

Em seguida, efetuou-se uma análise geral da variação entre as relações destes fatores comparativos, de forma a retornar as proporções mínimas, máximas e médias entre os sistemas. Daí, concluiu-se sobre a relação entre as variáveis de estudo de maneira geral. Ressalta-se aqui, que não se considera a capa de concreto para nenhuma das comparações, visto que sua consideração tenderia a reduzir a proporção entre os dois sistemas estruturais, cabendo, portanto, a comparação apenas entre as seções dos painéis individuais e o pavimento total composto por estas.

Portanto, a tabela 10 contém as alturas das seções dos painéis adotados e os pesos próprios para cada caso de estudo (tanto por unidade, quanto uma correlação do peso da estrutura para a composição de 2,5 metros de largura de laje, visto que o painel duplo T isolado possui 2,5 metros de largura, enquanto o painel alveolar apenas 1,2 metros de largura).

Tabela 10. Peso próprio e altura das seções dos painéis adotados.

Tipo de Laje	Caso	ℓ (m)	f_{ck} (kN/cm ²)	Seção	h (cm)	Peso próprio (ton.)	
						Por unidade	Composição de 2,5 m de largura
ALVEOLAR	A1	10,0	4	4HC8	20	4,7	9,8
	A2	10,0	6	4HC8	20	4,7	2,2
	A3	10,0	8	4HC8	20	4,7	9,8
	A4	12,5	4	4HC10	25	6,8	3,2
	A5	12,5	6	4HC8	20	5,9	12,2
	A6	12,5	8	4HC8	20	5,9	2,8
	A7	15,0	4	4HC12	30	8,1	16,9
	A8	15,0	6	4HC10	25	8,1	3,9
	A9	15,0	8	4HC10	25	8,1	16,9
	A10	17,5	4	4HC16	40	11,6	5,5
	A11	17,5	6	4HC12	30	9,5	19,7
	A12	17,5	8	4HC12	30	9,5	4,5
	A13	20,0	4	4HC20	50	15,1	31,5
	A14	20,0	6	4HC16	40	13,2	6,3
	A15	20,0	8	4HC16	40	13,2	27,5
DUPLO T	P1	10,0	4	8DT12	30	7,5	7,5
	P2	10,0	6	8DT12	30	7,5	7,5
	P3	10,0	8	8DT12	30	7,5	7,5
	P4	12,5	4	8DT12	30	9,4	9,4
	P5	12,5	6	8DT12	30	9,4	9,4
	P6	12,5	8	8DT12	30	9,4	9,4
	P7	15,0	4	8DT24	60	14,0	14,0
	P8	15,0	6	8DT24	60	14,0	14,0
	P9	15,0	8	8DT24	60	14,0	14,0
	P10	17,5	4	8DT24	60	16,3	16,3
	P11	17,5	6	8DT24	60	16,3	16,3
	P12	17,5	8	8DT24	60	16,3	16,3
	P13	20,0	4	8DT24	60	18,7	18,7
	P14	20,0	6	8DT24	60	18,7	18,7
	P15	20,0	8	8DT24	60	18,7	18,7

Fonte: Do Autor.

A tabela 11 apresenta os consumos de aço (em toneladas) e de concreto (em m³) para os mesmos casos, apresentados tanto para o painel adotado individualmente, quanto para o pavimento completo composto por todos estes painéis em conjunto.

Tabela 11. Consumo de aço e concreto para casos de estudo.

Tipo de Laje	Caso	ℓ (m)	f_{ck} (kN/cm ²)	Seção	Volume de Concreto (m ³)		Peso de aço (ton.)	
					Unidade	Total do pavimento	Unidade	Total do pavimento
ALVEOLAR	A1	10,0	4	4HC8	1,39	346,78	0,05	13,07
	A2	10,0	6	4HC8	1,39	346,78	0,05	13,07
	A3	10,0	8	4HC8	1,39	346,78	0,05	11,76
	A4	12,5	4	4HC10	1,73	433,47	0,09	22,16
	A5	12,5	6	4HC8	1,73	433,47	0,11	27,08
	A6	12,5	8	4HC8	1,73	433,47	0,10	24,62
	A7	15,0	4	4HC12	2,08	520,16	0,12	29,54
	A8	15,0	6	4HC10	2,08	520,16	0,14	35,45
	A9	15,0	8	4HC10	2,08	520,16	0,13	33,46
	A10	17,5	4	4HC16	2,43	606,86	0,14	34,16
	A11	17,5	6	4HC12	2,43	606,86	0,18	43,92
	A12	17,5	8	4HC12	2,43	606,86	0,18	46,07
	A13	20,0	4	4HC20	2,77	693,55	0,18	44,62
	A14	20,0	6	4HC16	2,77	693,55	0,20	50,19
	A15	20,0	8	4HC16	2,77	693,55	0,21	52,65
DUPLO T	P1	10,0	4	8DT12	1,39	166,45	0,06	7,02
	P2	10,0	6	8DT12	1,39	166,45	0,06	7,02
	P3	10,0	8	8DT12	1,39	166,45	0,06	7,02
	P4	12,5	4	8DT12	1,73	208,07	0,12	14,04
	P5	12,5	6	8DT12	1,73	208,07	0,12	14,04
	P6	12,5	8	8DT12	1,73	208,07	0,10	12,29
	P7	15,0	4	8DT24	2,08	249,68	0,09	10,53
	P8	15,0	6	8DT24	2,08	249,68	0,09	10,53
	P9	15,0	8	8DT24	2,08	249,68	0,09	10,53
	P10	17,5	4	8DT24	2,43	291,29	0,14	17,20
	P11	17,5	6	8DT24	2,43	291,29	0,14	17,20
	P12	17,5	8	8DT24	2,43	291,29	0,14	17,20
	P13	20,0	4	8DT24	2,77	332,90	0,23	28,08
	P14	20,0	6	8DT24	2,77	332,90	0,21	25,27
	P15	20,0	8	8DT24	2,77	332,90	0,21	25,27

Fonte: Do Autor.

5.1 SOLUÇÕES ADOTADAS PARA TAMANHOS DE VÃO FIXOS

A partir dos resultados apresentados pelas tabelas 10 e 11, pôde-se definir as soluções apresentadas pela tabela 12 para os demais tamanhos de vão, de forma a que se priorize a redução no consumo de concreto.

Tabela 12. Soluções adotadas para os painéis para cada tamanho de vão.

Tamanho do vão	Painel alveolar		Painel duplo T	
	Seção adotada	f_{ck} (kN/cm ²)	Seção adotada	f_{ck} (kN/cm ²)
10,0 metros	4HC8	4	8DT12	4
12,5 metros	4HC8	6	8DT12	4
15,0 metros	4HC10	6	8DT24	4
17,5 metros	4HC12	6	8DT24	4
20,0 metros	4HC16	6	8DT24	4

Fonte: Do Autor.

5.1.1 VÃO DE 10 METROS

Para o vão de 10 metros de comprimento, compara-se pela tabela 13 as soluções adotadas e expostas inicialmente pela tabela 12, de forma a que tenha se estabelecido a relação entre todos os demais fatores comparativos (razões estabelecidas entre painel duplo T por painel alveolar).

Tabela 13. Relações entre soluções adotadas para vão de 10,0 metros.

Tipo de painel	Seção	f_{ck} (kN/cm ²)	A_p (ton)	V (m ³)	h (cm)	Peso da unidade (ton.)	Peso próprio (ton.) para 2,5 metros de largura
Painel alveolar	4HC8	4	13,1	346,8	20,0	4,68	9,75
Painel duplo T	8DT12	4	7,0	222,2	30,0	7,50	7,50
Relação: Duplo T / Painel Alveolar			0,54	0,64	1,50	1,60	0,77

Fonte: Do Autor.

A partir da tabela 13, pôde-se notar que para as soluções adotadas para o vão fixo de 10,0 metros de comprimento, o consumo de material é significativamente menor para a laje duplo T, correspondendo a 0,54 para razão verificada para o consumo de aço e 0,64 para o de concreto. Por outro lado, a proporção entre as alturas das seções e os pesos das unidades demonstram que ambas são maiores para o painel duplo T, possuindo valores respectivos de 1,50 e 1,60. Será demonstrado a seguir para os demais tamanhos de vão como estas relações irão variar.

De antemão, pôde verificar-se que para a composição de 2,5 metros de largura de laje, o peso próprio dos painéis somados se constituiria menor para a laje duplo T, o que deve ser evidenciado como peculiaridade deste estudo, visto que mesmo que a unidade do painel

possua maior peso próprio para o duplo T, estimando que mesmo que o equipamento utilizado para o içamento, além do transporte, sejam de maior complexidade, o peso relativo para o içamento dos painéis apresenta-se menor para este tipo de laje, evidenciando que o desgaste relativo e o tempo de utilização para o equipamento também seja menor. Estima-se que para os tamanhos de vão que se seguem, a mesma hipótese seja mantida, podendo variar apenas em sua proporção.

5.1.2 VÃO DE 12,5 METROS

Para o vão fixado com 12,5 metros de comprimento, as soluções adotadas possuem as relações entre os fatores comparativos apresentadas pela tabela 14.

Tabela 14. Relações entre soluções adotadas para vão de 12,5 metros.

Tipo de painel	Seção	f_{ck} (kN/cm ²)	A_p (ton)	V (m ³)	h (cm)	Peso da unidade (ton.)	Peso próprio (ton.) para 2,5 metros de largura
Painel alveolar	4HC8	6	27,1	433,5	20,0	5,85	12,19
Painel duplo T	8DT12	4	14,0	277,7	30,0	9,38	9,38
Relação: Duplo T / Painel Alveolar			0,52	0,64	1,50	1,60	0,77

Fonte: Do Autor.

A solução adotada para a laje duplo T pôde-se manter como a mesma para vão de 10 metros, enquanto para a laje alveolar, houve a necessidade de aumentar o f_{ck} estipulado para o concreto para 6 kN/cm², ou 60 MPa, de modo a manter a mesma seção utilizada anteriormente, priorizando assim o menor consumo de concreto. Visto que as mesmas seções foram mantidas, as relações se mantiveram as mesmas para todos os fatores comparativos.

5.1.3 VÃO DE 15 METROS

Para o vão fixado com 15,0 metros de comprimento, as soluções adotadas possuem as relações entre os fatores comparativos apresentadas pela tabela 15.

Tabela 15. Relações entre soluções adotadas para vão de 15,0 metros.

Tipo de painel	Seção	f_{ck} (kN/cm ²)	A_p (ton)	V (m ³)	h (cm)	Peso da unidade (ton.)	Peso próprio (ton.) para 2,5 metros de largura
Painel alveolar	4HC10	6	35,5	626,6	25,0	8,10	16,88
Painel duplo T	8DT24	4	10,5	465,7	60,0	13,99	13,99
Relação: Duplo T / Painel Alveolar			0,30	0,74	2,40	1,73	0,83

Fonte: Do Autor.

Para o tamanho de vão fixado em 15 metros de comprimento, houve a necessidade de aumento de seção para ambos os sistemas de painéis para as opções imediatamente superiores em relação as opções determinadas para o vão de 12,5 metros, fazendo com que os fatores comparativos tenham se comportado como:

- Altura do painel: a altura da seção dobrou de tamanho para a laje duplo T (de 30,0cm para 60,0cm), enquanto para o painel alveolar aumentou em apenas 25% (de 20,0cm para 25,0cm). Portanto, a relação entre duplo T e alveolar aumentou significativamente (de 1,50 para 2,40).
- Peso próprio da unidade: devido ao mesmo motivo mencionado acima, esta relação também apresentou significativo aumento (de 1,28 para 1,73). Porém, ainda se ressalta que para a composição de 2,50 metros de largura, o peso proporcional de painel a ser içado continua menor para o duplo T (relação de 0,83).
- Consumo de concreto: o consumo de concreto manteve-se menor para a laje duplo T, porém com relação maior para os fatores (aumentou de 0,64 para 0,74), o que se deve pelo brusco aumento na seção do painel de duplo T.
- Consumo de aço: verificou-se que o consumo de aço teve redução em sua proporção (de 0,52 para 0,30). Este fato pode ser explicado devido a laje duplo T ter se apresentado com menor solicitação, por ser uma seção muito maior que a anterior, necessitando de menor armadura ativa para suportar aos esforços solicitantes.

5.1.4 VÃO DE 17,5 METROS

Para o vão fixado com 17,5 metros de comprimento, as soluções adotadas possuem as relações entre os fatores comparativos apresentadas pela tabela 16.

Tabela 16. Relações entre soluções adotadas para vão de 17,5 metros.

Tipo de painel	Seção	f_{ck} (kN/cm ²)	A_p (ton)	V (m ³)	h (cm)	Peso da unidade (ton.)	Peso próprio (ton.) para 2,5 metros de largura
Painel alveolar	4HC12	6	43,9	739,5	30,0	9,45	19,69
Painel duplo T	8DT24	4	17,2	543,3	60,0	16,32	16,32
Relação: Duplo T / Painel Alveolar			0,39	0,73	2,00	1,73	0,83

Fonte: Do Autor.

Aumentado o vão para 17,5 metros de comprimento, pode-se manter a mesma solução adotada para a laje duplo T, enquanto para painel alveolar aumentou-se a seção mais uma vez para a imediatamente acima informada pela bibliografia. Desta forma, o comportamento visualizado para os fatores comparativos fora de:

- Altura da seção: relação continuou indicando maior altura para o painel duplo T, porém com menor relação (de 2,40 para 2,00).
- Peso da unidade: manteve-se a relação vista anteriormente, o que pode ser explicado pelo fato de que o peso próprio do painel indicado pela bibliografia é o mesmo para as seções 4HC10 e 4HC12 (4,5kN/m²).
- Consumo de aço: obteve-se alta na relação, porém em proporções pequenas (alterou-se de 0,30 para 0,39).
- Consumo de concreto: manteve-se estável (reduzindo de 0,74 para 0,73), o que também pode ser explicado pelo fato de que a área das seções 4HC10 e 4HC12 consideradas pela bibliografia são bem próximas (1671,0cm² e 1690,3cm², respectivamente).

5.1.5 VÃO DE 20 METROS

Para o último caso de estudo, com o vão fixado em 20,0 metros de comprimento, as soluções adotadas possuem as relações entre os fatores comparativos apresentadas pela tabela 17.

Tabela 17. Relações entre soluções adotadas para vão de 20,0 metros.

Tipo de painel	Seção	f_{ck} (kN/cm ²)	A_p (ton)	V (m ³)	h (cm)	Peso da unidade (ton.)	Peso próprio (ton.) para 2,5 metros de largura
Painel alveolar	4HC16	6	50,2	1135,5	40,0	13,20	27,50
Painel duplo T	8DT24	4	28,1	620,9	60,0	18,65	18,65
Relação: Duplo T / Painel Alveolar			0,56	0,55	1,50	1,41	0,68

Fonte: Do Autor.

Para o tamanho do vão fixado em 20,0 metros de comprimento, fora possível manter o painel duplo T com a mesma solução anterior, enquanto houve necessidade de aumento da seção do painel alveolar para 4HC16, obtendo o seguinte comportamento das relações entre os fatores comparativos:

- Altura da seção: novamente apresentando uma redução significativa (de 2,0 para 1,5), mesmo que ainda se mantenha a maior altura para o painel duplo T.
- Peso próprio da unidade: também apresentou redução de 1,73 para 1,41.
- Consumo de concreto: redução significativa de 0,73 para 0,55.
- Consumo de aço: aumento na relação de 0,39 para 0,56.

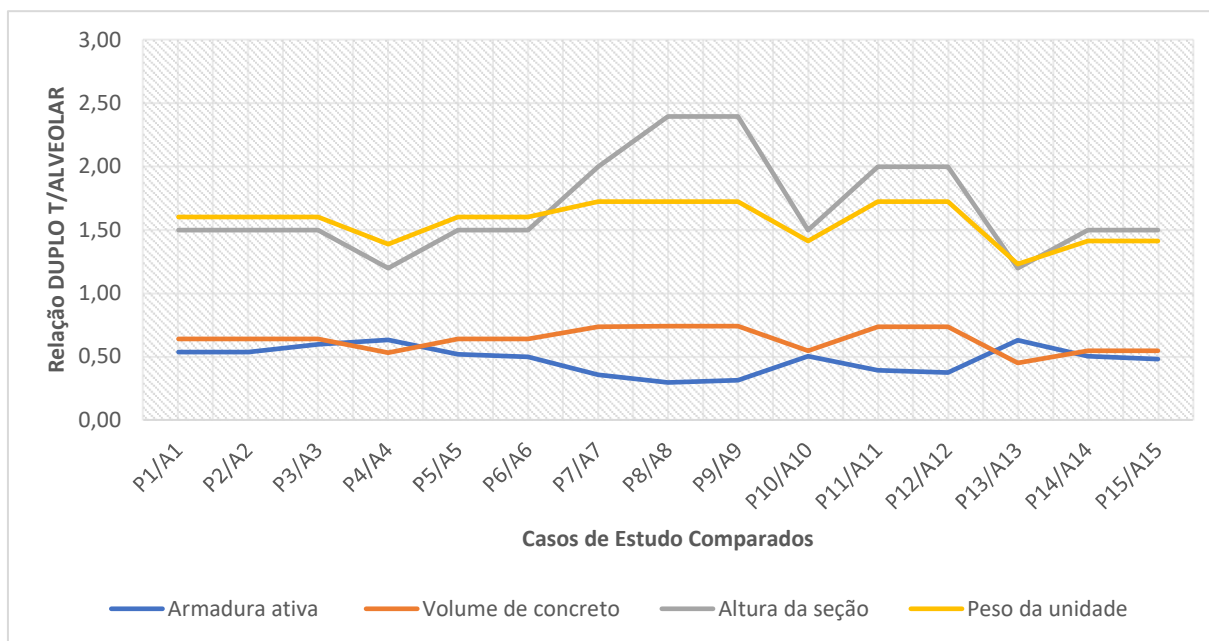
5.2 ANÁLISE GERAL

Fora visualizado a partir da análise comparativa entre as soluções adotadas para os cinco tamanhos de vão, que as relações entre os fatores comparativos foram mantidas nas relações de superioridade ou inferioridade aos quais se encontram resumidas:

- Altura da seção: painel duplo T sempre apresentará maior altura de seção, independentemente do caso analisado, devido a própria geometria da seção.
- Peso próprio do painel: o painel duplo T também sempre apresentará maior peso próprio por unidade, o que pode evidenciar maior complexidade e custos para as operações de içamento ou transporte de peças quando tratadas isoladamente, porém percebe-se também que sempre apresentará menor peso relativo para a composição de uma laje de mesma largura, o que pode gerar menor desgaste do equipamento de içamento, despendendo-se menos horas de aplicação em canteiro de obras, além de menor quantidade de peças para transporte ao local de implantação.

- Consumo de concreto: sempre o painel duplo T irá apresentar menor consumo de concreto do que o painel alveolar. Esta relação poderia apresentar ainda maior disparidade caso fossem consideradas seções intermediárias entre 8DT12 e 8DT24. Por não haver a mesma variedade de seções, a relação mantém-se um pouco menor, visto que os painéis alveolares apresentam maior gama de opção de seções.
- Consumo de aço: o consumo de aço sempre será menor para a laje duplo T, sugerindo uma significativa redução no custo da composição da laje. Pôde-se inclusive verificar que a área de armadura ativa se apresentou próxima quando comparadas para o painel individual alveolar e duplo T, porém esta diferença acentuou-se quando visualizado para o pavimento completo (sabendo que 250 painéis alveolares compõem o pavimento estudado, ao passo que 120 painéis duplo T compõem o mesmo).
- Resistência a compressão do concreto (f_{ck}): fora visualizado que para o painel duplo T, as alterações do f_{ck} não surtiram o mínimo efeito para o dimensionamento final, visto que todas as soluções adotadas encontraram-se para o f_{ck} mínimo de 40 MPa (ou 4kN/cm²); enquanto para o painel alveolar, constituiu-se de uma estratégia interessante para que fosse possível utilizar uma seção de menor consumo de concreto, o que também foi importante para que as relações entre os fatores comparativos não apresentasse ainda maior disparidade entre os dois painéis.

Conhecido o comportamento das relações entre todos os fatores comparativos, visualiza-se também de maneira geral, a comparação entre todos os 15 casos de aplicação do painel alveolar em relação aos 15 casos de aplicação do painel duplo T, sendo organizados em relação ao mesmo tamanho de vão e f_{ck} atribuído. Tal distribuição permitiu a composição do gráfico da figura 9, além de atribuir valores mínimos, máximos e médios para as relações verificadas, apresentados na tabela 18, promovendo assim uma análise quantitativa da diferença entre os dois sistemas de painéis pré-moldados protendidos.

Figura 9. Variação das relações entre os fatores comparativos.

Fonte: Do Autor.

Tabela 18. Análise quantitativa das relações entre os fatores comparativos.

Relação DUPLO T / ALVEOLAR	Armadura ativa	Volume de concreto	Altura da seção	Peso da unidade
Mínimo	0,30	0,45	1,20	1,23
Máximo	0,63	0,74	2,40	1,73
Média	0,48	0,63	1,68	1,57

Fonte: Do Autor.

Visto que todos os fatores comparativos deveriam ser os mínimos dentre as opções para que fosse estabelecido o sistema estrutural mais apropriado dentre todas as hipóteses de estudo, verifica-se que a relação duplo T por alveolar deveria se encontrar abaixo de 1 entre todos os fatores comparativos, não correspondendo ao verificado em totalidade.

Porém, os fatores relacionados a maior altura e peso próprio do painel duplo T podem não apresentar influência negativa, desde que seja prevista em concepção arquitetônica ou estrutural a possibilidade de adoção do pé direito mínimo de modo a que seja garantido o uso adequado da edificação, assim como a gerência eficiente dos procedimentos de execução e equipamentos de construção, permitindo que a análise considere os aspectos positivos associados a execução do pavimento completo, não tratando por casos isolados apenas. Portanto, considera-se o painel duplo T como o sistema mais apropriado para todos os casos de estudo para vãos entre 10,0m a 20,0m.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho constituiu-se de uma análise comparativa entre a utilização de painéis alveolares e de painéis duplo T para a composição da laje de um pavimento tipo de um edifício garagem, utilizando-se dos projetos estruturais para que fossem constatados os fatores comparativos referentes a cada caso de estudo, ao qual fora estabelecida uma análise quantitativa para as relações verificadas entre eles.

Concluiu-se que o painel duplo T se sobressai como o sistema estrutural mais adequado para todas as hipóteses de estudo, para os vãos com comprimento de 10,0m a 20,0m, mesmo que suas propriedades geométricas apresentem maiores índices de peso próprio por unidade e altura da seção, fatores que não influenciarão na implantação da edificação desde que a concepção arquitetônica preveja a possibilidade de execução do pé direito adequado e seja realizada a gerência adequada do processo executivo.

Ressalta-se que a conclusão constatada não condiz com a maior intensidade na aplicação de painéis alveolares verificado no território nacional, o que fora evidenciado na realização da pesquisa bibliográfica, em detrimento ao observado em território estadunidense. Esta situação pode ser explicada a partir de diversos fatores aos quais não foram considerados neste trabalho, como o custo unitário dos painéis determinados pelos fabricantes, a localização de fabricantes mais próximos ou preferências construtivas e arquitetônicas.

A partir daí, surgem como sugestões para trabalhos futuros um estudo orçamentário para os dois tipos de sistemas construtivos, baseando-se nos custos dos painéis determinados pelas empresas fabricantes, de modo a complementar o estudo técnico-comparativo realizado neste trabalho, além da comparação entre outros sistemas para composição estrutural da laje do pavimento de um edifício garagem, como por exemplo, entre as lajes duplo T e “*steel deck*”.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 238. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120:Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, p.6. 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, p. 86. 2017.

BRINCO, R. Políticas de estacionamento e efeitos na mobilidade urbana. **Indic. Econ. FEE**, Porto Alegre, v. 44, n. 2, p. 109–124, 2016.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em Concreto Protendido**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2017.

COSTA, O. O.. **Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas**. 2009. 155p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos de Edificações) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

EDEKLING, Kristian; RETTNE, Lars. **Improved Design Method for Web Shear Tension Failure in Hollow Core Units**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2006.

EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

IGLESIA, T. B. **Sistemas construtivos em concreto pré-moldado**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2006.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **Precast Prestressed Concrete Parking Structures: Recommended Practice for Design and Construction**. 3ªed. Chicago: PCI Comitee On Parking Structures. 2015.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete**. 5ªed. Chicago: PCI Industry Handbook Comitee. 1999.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete**. 7ªed. Chicago: PCI Industry Handbook Comitee. 2010.

PETRUCELLI, N. S. **Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas**. 2009. 126p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos de Edificações) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

POLAT, G. Precast concrete systems in developing vs. industrialized countries. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 16, n. 1, p. 85–94, Outubro de 2010.

RAFAELE, A. R.; HERNANDEZ, B. L. N.; SCHIAVI, L. F. D.; SANTOS, V. P.; AMARANTE, M. DOS S. Métodos Construtivos em Concreto Pré-Moldado. **Revista Pesquisa e Ação**, São Paulo, v.5, n.4, p.88-91, 2019.

REZENDE, E. M. **Sistemas de estacionamento vertical**. 2004. 212p. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

RIBEIRO, M. S. **A industrialização como requisito para a racionalização da construção**. 2002. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SERRA, S.M.B; FERREIRA, M. de A.; PIGOZZO, B. N. Evolução dos pré-fabricados de Concreto. In: I ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1., 2005. **Anais...** São Carlos: Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados (NET-PRÉ), Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, 2005.v.1,p.1-10.

SILVA, D. P. **Projeto estrutural do edifício anexo do Instituto do Câncer do Ceará: dimensionamento de lajes pré-moldadas e protendidas TT**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SANTOS, A. Edifícios garagem: o estado da arte em pré-fabricados. **Massa Cinzenta**, 10 de outubro de 2017. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/edificios-garagem-pre-fabricados/>. Acesso em: 28 maio. 2020.

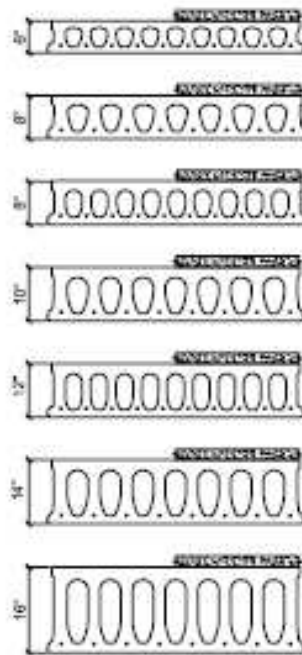
SOUSA, B. G. DE. **Abordagem comparativa – lajes pré- esforçadas tipo TT**. 2014. Dissertação (Mestrado em Construções). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.

YEE, A. A. Social and environmental benefits of precast concrete technology. **PCI Journal**, v. 46, n. 3, p. 14–19, Maio-Junho de 2001.

3.7 Hollow-Core Section Properties (cont.)

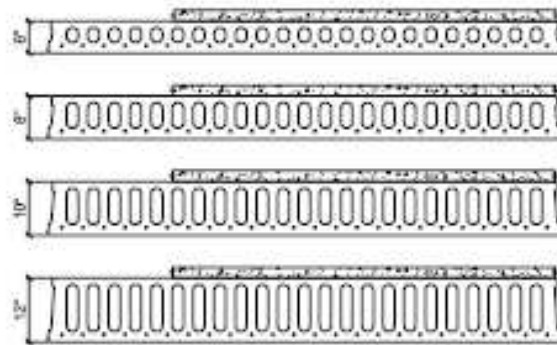
3

Trade name Echo
 Represented in North & Latin America: CTI Inc., Green Bay, Wisconsin



Section depth x width	Untopped				with 2" topping		
	A, in ²	y _c , in.	I, in ⁴	w _t , lb/ft ²	y _c , in.	I, in ⁴	w _t , lb/ft ²
6" x 4'-0"	187	3.09	797	47	4.19	2132	72
8" x 4'-0"	235	4.00	1761	59	5.19	3954	84
10" x 4'-0"	262	4.99	3195	66	6.31	6328	91
12" x 4'-0"	296	5.99	5192	75	7.38	9400	100
14" x 4'-0"	324	6.98	7764	82	8.46	13224	107
16" x 4'-0"	352	7.97	10985	89	9.18	18187	114
18" x 4'-0"	396	8.97	16138	100	10.94	23527	125
20" x 4'-0"	427	9.95	19661	107	11.57	30076	132

6" x 8'-0"	454	3.89	1629	57	3.90	4617	82
8" x 8'-0"	542	3.83	3657	68	4.83	8290	83
10" x 8'-0"	632	4.79	6799	80	5.96	13349	105
12" x 8'-0"	721	5.75	11149	91	6.90	20003	118



Note: All sections are not available from all producers. Check availability with regional manufacturers.

ANEXO B. Tabela para pré-dimensionamento de painel duplo T (h=30cm).

PCI Design Handbook 5^aed.: Chapter 2 – Product Information and Capability, p.2-12)

Strand Pattern Designation

No. of strand (6)
S = straight D = depressed

68-D1

No. of depression points
Diameter of strand in 16ths

Safe loads shown include dead load of 10 psf for untopped members and 15 psf for topped members. Remainder is live load. Long-time cambers include superimposed dead load but do not include live load.

Key
178 — Safe superimposed service load, psf
0.2 — Estimated camber at erection, in.
0.2 — Estimated long-time camber, in.

DOUBLE TEE
8'-0" x 12"
Normal Weight Concrete

$f'_c = 5,000$ psi
 $f_{pu} = 270,000$ psi

Section Properties

	Untopped	Topped
A	287 in ²	—
I	2,872 in ⁴	4,389 in ⁴
y _u	9.13 in.	10.45 in.
y _t	2.87 in.	3.55 in.
S _u	315 in ³	420 in ³
S _t	1,001 in ³	1,236 in ³
wt	299 plf	499 plf
V/S	37 psf	62 psf
V/S	1.22 in.	

8DT12

Table of safe superimposed service load (psf) and cambers (in.)

No Topping

Strand Pattern	e _s , in. e _r , in.	Span, ft																				
		12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44				
28-S	7.13	178	137	108	82	61	45	34														
	7.13	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3														
48-S	5.13	188	146	113	88	69	55	43	34													
	5.13	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7													
68-S	3.13	162	126	99	78	62	50	40	31													
	3.13	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4													
68-D1	3.13								94	78	65	54	45	38	31							
	6.63								1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.6							
88-D1	1.13															38	32					
	6.38															1.6	1.7					

8DT12 + 2

Table of safe superimposed service load (psf) and cambers (in.)

2" Normal Weight Topping

Strand Pattern	e _s , in. e _r , in.	Span, ft											
		12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
28-S	7.13	200	150	116	84	59	40						
	7.13	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3						
48-S	5.13	168	127	96	73	55	41						
	5.13	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7						
68-S	3.13	154	119	92	72	50							
	3.13	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6							
68-D1	3.13	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1							
	6.63						100	81	65	50			

*Strength based on strain compatibility; bottom tension limited to 12, f_c; see pages 2-2-2.6 for explanation.
Shaded values require release strengths higher than 3500 psi.*

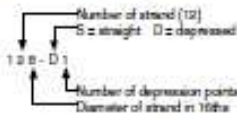
ANEXO C. Tabelas para pré-dimensionamento dos painéis duplo T (h=60cm a h=80cm).

(PCI Design Handbook: Chapter 3: Preliminary Design of Precast/Prestressed Concrete Structures, p.3-12 a p.3-15).

CHAPTER 3 PRELIMINARY DESIGN OF PRECAST / PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES

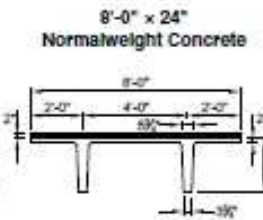
3.4 Double-Teel Load Tables

Strand Pattern Designation



Side loads shown include dead load of 30 lb/ft for untopped members and 15 lb/ft for topped members. Remainder is live load. Long-time cambers include superimposed dead load but do not include live load.

Key
 196 - Safe superimposed service load, lb/ft²
 0.7 - Estimated camber at erection, in.
 0.0 - Estimated long-time camber, in.



$f'_c = 5000$ psi
 $f'_m = 270,000$ psi
 $1/2$ -in.-diameter regular strand

Section Properties	
No Topping	2 in. Topping
$A = 401$ in. ²	—
$I = 20,985$ in. ⁴	27,720 in. ⁴
$y_c = 17.15$ in.	19.27 in.
$y_t = 6.85$ in.	6.73 in.
$S_x = 1224$ in. ³	1430 in. ³
$S_y = 3064$ in. ³	4110 in. ³
$w_f = 418$ lb/ft	618 lb/ft
$DL = 52$ lb/ft ²	77 lb/ft ²
$W/S = 1.41$ in.	—

Check with regional producers for availability.

8DT24

Table of safe superimposed service load, lb/ft², and cambers, in. No Topping

Strand pattern	y_c (end) y_t (center) in.	Span, ft																											
		32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76					
68-S	4.00	196	161	140	122	106	93	81	71	62	55	48	42	36	31	27													
	4.00	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5														
88-S	5.00	185	162	142	126	112	98	88	78	70	62	55	49	43	38	33	29												
	5.00	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.1	1.0	0.8													
108-S	6.00	167	174	152	136	123	110	98	88	79	71	64	57	51	45	39	34	29											
	6.00	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2	0.9	0.8	0.5	0.2												
128-S	7.00	159	142	128	114	101	90	81	73	66	59	52	47	42	37	32	27												
	7.00	1.5	1.6	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.0	1.8	1.7	1.5	1.2												
128-D1	11.67									114	103	92	83	74	66	59	52	45	40	35	30								
	3.25									2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.6	2.5	2.3	2.1	1.8	1.5									
148-D1	12.86																												
	3.50																												

8DT24 + 2

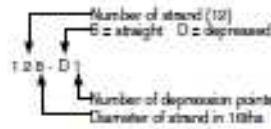
Table of safe superimposed service load, lb/ft², and cambers, in. 2 in. Normalweight Topping

Strand pattern	y_c (end) y_t (center) in.	Span, ft																											
		28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70						
48-S	3.00	166	141	117	97	81	67	55	45	36	29																		
	3.00	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4																		
68-S	4.00	189	161	138	118	101	87	74	64	54	45	38	30																
	4.00	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8																	
88-S	5.00	166	163	140	124	108	94	82	71	62	52	42	33																
	5.00	1.1	1.1	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4															
108-S	6.00	170	152	130	120	104	90	77	66	56	47	39	31																
	6.00	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.2	1.0	0.8	0.6	0.3	-0.1	-0.5															
128-S	7.00	160	140	121	104	90	77	67	57	48	41	33	27																
	7.00	1.6	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1	0.8	0.6	0.3	-0.1	-0.6	-1.1																
128-D1	11.67																												
	3.25																												

Strength is based on strain compatibility; bottom tension is limited to $12\sqrt{f'_c}$; see pages 3-6 through 3-11 for explanation. Shaded values require release strengths higher than 3900 psi.

3.4 Double-Tee Load Tables (cont.)

Strand Pattern Designation



Safe loads shown include dead load of 10 lb/ft for untopped members and 15 lb/ft for topped members. Remainder is live load. Long-time cambers include superimposed dead load but do not include live load.

Key
106 - Safe superimposed service load, lb/ft²
1.2 - Estimated camber at section, in.
1.5 - Estimated long-time camber, in.



$f'_c = 5000$ psi
 $f'_ps = 270,000$ psi
 $\frac{1}{2}$ -in.-diameter regular strand

Section Properties
No Topping 2 in. Topping

A	= 401 in. ²	—
I	= 20,985 in. ⁴	29,857 in. ⁴
y_e	= 17.15 in.	19.94 in.
y_b	= 6.85 in.	6.06 in.
S_x	= 1224 in. ³	1497 in. ³
S_y	= 3064 in. ³	4927 in. ³
wf	= 320 lb/ft	520 lb/ft
DL	= 40 lb/ft ²	65 lb/ft ²
WS	= 1.41 in.	—

3

Check with regional producers for availability.

8LDT24

Table of safe superimposed service load, lb/ft², and cambers, in.

No Topping

Strand pattern	y_e (end) y_b (center) in.	Span, ft																											
		32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80			
68-S	4.00	196	170	143	131	115	102	90	80	72	64	57	51	45	40	36	32	28											
	4.00	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.4											
88-S	5.00	164	173	152	135	121	108	97	87	79	71	64	58	52	47	43	38	35	31	28									
	5.00	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	2.8	2.6	2.5	2.3	2.0									
108-S	6.00					183	164	147	132	119	107	97	87	79	71	64	58	52	48	44	40	36	33	29	26				
	6.00					2.4	2.5	2.7	2.9	3.0	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.6	3.5	3.3	3.1	2.9	2.5	2.1	1.7	1.3		
128-S	7.00									110	99	90	80	72	65	59	53	48	44	40	37	34	31	28					
	7.00									3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.0	3.9	3.7	3.5	3.2					
128-D1	11.67																												
	3.25																												
148-D1	12.86																												
	3.50																												

8LDT24 + 2

Table of safe superimposed service load, lb/ft², and cambers, in.

2 in. Normalweight Topping

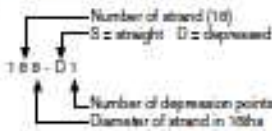
Strand pattern	y_e (end) y_b (center) in.	Span, ft																								
		28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	
48-S	3.00	178	150	126	107	90	76	64	54	45	38	31	25													
	3.00	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9													
68-S	4.00					168	170	147	127	111	96	84	73	65	58	47	40	34	29							
	4.00					1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.8								
88-S	5.00					197	170	151	130	117	103	91	80	71	61	52	45	37	31	25						
	5.00					1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.4	1.1	0.8	0.5	0.0	-0.5	-1.1					
108-S	6.00									186	164	146	129	115	102	90	79	69	48	41	34	29				
	6.00									2.4	2.5	2.7	2.9	3.0	3.2	3.3	3.4	3.5	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7			
128-S	7.00																									
	7.00																									
128-D1	11.67																									
	3.25																									

Strength is based on strain compatibility; bottom tension is limited to $12\sqrt{f'_c}$; see pages 3-8 through 3-11 for explanation. Shaded values require release strengths higher than 3500 psi.

3.4 Double-Tee Load Tables (cont.)

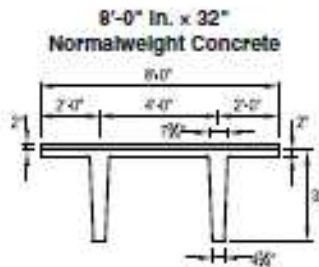
3

Strand Pattern Designation



Self loads shown include dead load of 10 lb/ft for untopped members and 15 lb/ft for topped members. Remainder is live load. Long-time cambers include superimposed dead load but do not include live load.

Key
100 - Safe superimposed service load, lb/ft
1.1 - Estimated camber at section, in.
1.4 - Estimated long-time camber, in.



$f'_c = 5000$ psi
 $f'_m = 270,000$ psi
 $\frac{1}{2}$ "-in.-diameter regular strand

Section Properties

	No Topping	2 in. Topping
A	567 in. ²	-
I	55,464 in. ⁴	71,886 in. ⁴
y_b	21.21 in.	23.65 in.
y_t	10.79 in.	10.34 in.
S_x	2615 in. ³	3038 in. ³
S_y	5140 in. ³	6952 in. ³
wt	501 lb/ft	791 lb/ft
DL	74 lb/ft	99 lb/ft
WS	1.79 in.	-

Check with regional producers for availability.

8DT32

Table of safe superimposed service load, lb/ft, and cambers, in.

No Topping

Strand pattern	k_c (end) k_c (center) in.	Span, ft																													
		40	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	
128-S	7.00	100	175	156	141	127	115	104	94	85	77	69	62	56	50	44	38	33	28												
	7.00	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.2	0.0	-0.3													
		1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.1	-0.3	-0.7	-1.1	-1.5												
148-S	8.00	109	180	163	148	134	122	111	101	92	83	75	68	60	53	47	41	36	30	25											
	8.00	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.8	0.6	0.4	0.1	-0.1	-0.5												
		1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.1	0.8	0.6	0.2	-0.1	-0.5	-1.0	-1.5	-2.1												
168-S	9.00	102	165	151	137	124	113	103	93	85	76	68	61	54	48	42	36	31	26												
	9.00	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	0.9	0.7	0.5	0.2	-0.1	-0.4												
		1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.6	1.4	1.2	0.9	0.6	0.3	-0.1	-0.5	-1.0	-1.6	-2.2												
188-S	10.00	102	175	159	144	131	120	109	99	90	82	74	67	60	53	47	41	36	31	26											
	10.00	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2	1.1	0.9	0.7	0.4	0.1	-0.2	-0.6												
		2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.4	1.2	0.9	0.6	0.2	-0.3	-0.7	-1.3	-1.9	-2.6											
188-D1	14.39																														
	4.00																														
208-D1	15.50																														
	4.25																														

8DT32 + 2

Table of safe superimposed service load, lb/ft, and cambers, in.

2 in. Normalweight Topping

Strand pattern	k_c (end) k_c (center) in.	Span, ft																													
		42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92				
128-S	7.00	270	340	314	290	270	252	236	221	208	197	186	176	167	158	149	140	131	122	113	104	95	87	79	72	65	58	51	44	38	
	7.00	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.2	0.0	-0.3	-0.7	-1.1	-1.5								
		1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0	-0.3	-0.7	-1.1	-1.5													
148-S	7.00	289	350	322	298	277	258	242	228	215	203	191	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	81	72	64	56	48	40	33		
	7.00	1.2	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0													
		1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.0	0.8	0.7	0.5	0.2	-0.2	-0.6	-1.0	-1.5												
168-S	8.00	298	353	323	298	275	256	240	226	212	200	188	176	165	154	143	132	121	110	100	90	80	71	62	54	46	38	30	23		
	8.00	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0												
		1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.1	1.0	0.7	0.5	0.2	-0.2	-0.6	-1.1	-1.6	-2.2											
188-S	9.00	282	334	303	278	255	236	220	206	192	179	166	154	142	130	118	106	94	82	70	60	50	40	30	25						
	9.00	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.4	1.2	1.0													
		1.6	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3	1.1	0.9	0.7	0.4	0.1	-0.3	-0.6	-1.3	-1.9	-2.5											
188-D1	14.39																														
	4.00																														
208-D1	15.50																														
	4.25																														

Strength is based on strain compatibility; bottom tension is limited to $12\sqrt{f'_c}$; see pages 3-8 through 3-11 for explanation. Shaded values require release strengths higher than 3600 psi.

ANEXO D. Especificações de cordoalhas para protensão.
(ARCELLOR MITTAL | Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido | p.6)

ESPECIFICAÇÕES DOS PRODUTOS - CORDOALHAS NUAS PARA PROTENSÃO

Produto	Diâmetro nominal (mm)	Área aprox. (mm ²)	Área mínima (mm ²)	Massa aprox. (kg/ 1.000 m)	Carga mínima de ruptura (kN)	Carga mínima a 1% de deformação (kN)	Alongamento após ruptura (%)
Cordoalha 3 fios CP 190							
Cord CP 190 RB 3 X 3,0	6,5	22	22	171	41	37	3,5
Cord CP 190 RB 3 X 3,5	7,6	30	30	238	57	51	3,5
Cord CP 190 RB 3 X 4,0	8,8	38	38	304	71	64	3,5
Cord CP 190 RB 3 X 4,5	9,6	47	46	366	88	79	3,5
Cord CP 190 RB 3 X 5,0	11,1	67	66	520	125	112	3,5

Cordoalha 7 fios CP 190

Cord CP 190 RB 9,5	9,5	56	55	441	104	94	3,5
Cord CP 190 RB 12,7	12,7	101	99	792	187	169	3,5
Cord CP 190 RB 15,20	15,2	143	140	1126	266	239	3,5
Cord CP 190 RB 15,70	15,7	150	147	1172	279	246	3,5
Cord CP 190 RB 15,20 Entalhada	15,2	143	140	1126	266	239	3,5
Cord CP 190 RB 15,70 Entalhada	15,7	150	147	1172	279	246	3,5

***Cordoalha 7 fios CP 210**

Cord CP 210 RB 9,50	9,5	56	55	441	113	102	3,5
Cord CP 210 RB 12,70	12,7	101	99	792	203	183	3,5
Cord CP 210 RB 15,20	15,2	143	140	1126	288	259	3,5
Cord CP 210 RB 15,70	15,70	150	147	1172	303	273	3,5

*Consulte disponibilidade de produtos



As cordoalhas são fornecidas em rolos sem núcleo, nas dimensões da tabela

ACONDIIONAMENTO DE CORDOALHAS NUAS PARA PROTENSÃO

Tipo de cordoalha	Peso (kg)	Diâmetro interno (cm)	Diâmetro externo (cm)	Largura do rolo (cm)
3 e 7 fios	1.800 / 3.000	76	120	80

1 - O peso do rolo pode variar, dependendo da malragem em que foi produzido.

2 - O diâmetro externo do rolo depende do peso.

3 - Rolos com peso menor ou maior podem ser fabricados, desde que isso seja previamente acordado entre cliente e produtor.