

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAIO ANDRÉ KEN DAYO
EMERSON JOSÉ AVELINO MOREIRA
GABRIEL FAZAN FRUTEIRO
GUSTAVO SANTANA LIMA
LUCAS VINÍCIUS KATSUYA YOKOTA

**Análise de sistemas construtivos em relação à
produtividade e custo benefício como alternativas ao
concreto armado**

SÃO PAULO
NOVEMBRO DE 2022

CAIO ANDRÉ KEN DAYO
EMERSON JOSÉ AVELINO MOREIRA
GABRIEL FAZAN FRUTEIRO
GUSTAVO SANTANA LIMA
LUCAS VINÍCIUS KATSUYA YOKOTA

**Análise de sistemas construtivos em relação à
produtividade e custo benefício como alternativas ao
concreto armado**

Monografia apresentada à Universidade São Judas Tadeu como parte dos requisitos para conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Msc. Yuri Teixeira

SÃO PAULO
NOVEMBRO DE 2022

CAIO ANDRÉ KEN DAYO
EMERSON JOSÉ AVELINO MOREIRA
GABRIEL FAZAN FRUTEIRO
GUSTAVO SANTANA LIMA
LUCAS VINÍCIUS KATSUYA YOKOTA

**Análise de sistemas construtivos em relação à
produtividade e custo benefício como alternativas ao
concreto armado**

Monografia apresentada à Universidade São Judas Tadeu como parte dos requisitos para conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Banca examinadora:

Prof. Yuri Teixeira (Orientador)
Universidade São Judas Tadeu

Prof. Ana Carolina Fernandes
Universidade São Judas Tadeu

Prof. Júlio Gonçalves
Universidade São Judas Tadeu

RESUMO

Há diversas alternativas de sistemas ou métodos construtivos que embora amplamente difundidos em estudos acadêmicos acabam por serem menos utilizados devido à sua complexidade, falta de mão de obra especializada e questões logísticas. Este trabalho se propõe a realizar a análise econômica e produtiva dos métodos de execução de estruturas e tem como objeto a viabilidade de diferentes técnicas de uso do concreto armado. Os métodos abordados incluem concreto protendido e laje nervurada, que possuem suas especificidades e particularidades. Para tal estudo, fez-se necessário a análise estrutural de um projeto para comparação, projeto este, o qual foi redimensionado para cada um dos métodos citados neste trabalho (concreto armado, concreto protendido e laje nervurada).

Conclui-se que a escolha de um método de execução de estruturas deve ser analisada com base na arquitetura entre outros fatores, onde em função dos requisitos estruturais, como o Estado Limite de Serviço, será verificada a viabilidade do projeto dentro de cada possibilidade de execução.

ABSTRACT

There are several alternatives of constructive systems or methods that, although widely widespread in academic studies, end up being less used due to their complexity, lack of specialized labor and logistical issues. This work aims to carry out an economic and productive analysis of the methods of implementation of structures and its object of study is the viability of different techniques for the use structural concrete. The other methods discussed such as prestressed concrete and waffle slab have their specificities and particularities. For this study, it was necessary to carry out a structural analysis of a project for comparison. This project was resized for each of the methods mentioned in this work (structural concrete, prestressed and Waffle slab).

In conclusion, the choice of a method of implementation of structures must be followed based on the architecture, where due to the limitations imposed as the Service Limit State, the viability of the project will be verified within each possibility of implementation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma do trabalho.....	19
Figura 2 – Linha do tempo do concreto armado no Brasil.....	21
Figura 3 – Inauguração do canal de Santos.....	22
Figura 4 - Processo executivo de canal em concreto armado.....	23
Figura 5 – Canal de Santos atualmente.....	23
Figura 6 – Ponte de Mauricio de Nassau.....	24
Figura 7.1 – Estiramento da armadura de protensão com cilindro hidráulico.....	27
Figura 7.2 – Peças concretadas e sendo curadas com a armadura de protensão estirada e fixada nas extremidades.....	27
Figura 7.3 – Aplicação das protensões nas peças com o relaxamento da armadura das ancoragens.....	27
Figura 8.1 – Moldagem e cura do concreto.....	29
Figura 8.2 – Estiramento e ancoragem da armadura de protensão.....	29
Figura 8.3 – Preenchimento da bainha com calda de cimento.....	29
Figura 9 – Primeiras aplicações da protensão em grandes escalas no Brasil: A ponte do Galeão.....	31
Figura 10 – Detalhe das ancoragens dos cabos de protensão.....	31
Figura 11 – Ponte Petrolina-Juazeiro.....	32
Figura 12 – Sistema de construção em balanços sucessivos.....	32
Figura 13 – Detalhe de cordoalha engraxada.....	33
Figura 14 – Ponte Phelippe Daou, batizada como Ponte Rio Negro.....	34

Figura 15 – Disposição de protensão em laje nervurada.....	35
Figura 16 – Comparação entre métodos protendidos: Laje maciça x laje nervurada.....	36
Figura 17 – Fotografia de acervo histórico do museu do Ipiranga.....	37
Figura 18 – Museu do Ipiranga antes da interdição para restauração.....	38
Figura 19 – Modelagem de divulgação pós reforma de restauração.....	38
Figura 20 – Corte em 3D demonstrando setores reformados.....	39
Figura 21 – Perspectiva de salão com laje nervurada amostra no teto.....	40
Figura 22 – Perspectiva de salão de exposições com laje nervurada amostra no teto.....	40
Figura 23 - Detalhe da laje nervurada em obra.....	41
Figura 24 – Detalhe da laje nervurada com viga protendida.....	41
Figura 25 – Detalhamento de armação de projeto estrutural.....	42
Figura 26 – Fotografia da fachada do primeiro prédio do IEB.....	43
Figura 27 – Laje nervurada com enchimento em EPS.....	44
Figura 28 – Exemplo de aplicação de laje nervurada para estacionamento.....	45
Figura 29 – Detalhamento da laje nervurada.....	46
Figura 30 – Detalhamento da laje nervurada.....	46
Figura 31 – Detalhamento da laje nervurada.....	46
Figura 32 - Laje unidirecional.....	47
Figura 33 – Laje bidirecional.....	48
Figura 34 – Modelo de fôrmas de plástico reutilizáveis com escoramento num único equipamento.....	49

Figura 35 – Laje nervurada aparente em setor expositor do museu MASP.....	50
Figura 36 – Dimensões consideradas no cálculo do vão efetivo das lajes.....	53
Figura 37 – Lajes adjacentes com espessuras muito diferentes.....	54
Figura 38 – Lajes parcialmente contínuas.....	55
Figura 39 – Numeração das lajes em função dos vínculos nas bordas, de acordo com as tabelas de Barés.....	55
Figura 40 – Laje armada em uma direção sobre apoios simples e com carregamento uniforme.....	60
Figura 41 – Laje armada em uma direção bi engastada com carregamento uniforme.....	61
Figura 42 – Laje armada em uma direção sobre apoio simples e engaste perfeito com carregamento uniforme.....	61
Figura 43 – Direção dos momentos fletores principais em lajes armadas em duas direções sob bordas simples.....	62
Figura 44 – Laje lisa.....	74
Figura 45 – Laje com engrossamento na região dos pilares.....	74
Figura 46 – Laje com vigas faixa.....	75
Figura 47– Laje nervurada com faixas protendidas.....	75
Figura 48 – Laje nervurada com engrossamento na região dos pilares (capitéis)...	75
Figura 49 – Modelo estrutural TQS.....	82
Figura 50 – Armação protendida vertical.....	82
Figura 51 – Armação protendida horizontal	83
Figura 52 – Armadura passiva negativa.....	84
Figura 53 – Armadura passiva positiva.....	85

Figura 54 – Armadura passiva negativa secundaria.....	86
Figura 55 – Armadura passiva positiva secundaria.....	87
Figura 56 – Arredores do futuro edifício no bairro do Jardim Paulistano.....	92
Figura 57 - Perímetro do bairro Jardim Paulistano e seus arredores pelo Google Maps.....	93
Figura 58 – Arredores do futuro edifício, observa-se diversas residências próximas.....	93
Figura 59 – Fachada do futuro edifício, observa-se a marginal Pinheiros e Clube Jockey.....	93
Figura 60 – Arredores do futuro edifício, observa-se a marginal Pinheiros.....	94
Figura 61 – Arredores do futuro edifício, observa-se prédios comerciais e shopping.....	94
Figura 62 – Projeto arquitetônico de pavimento modelo.....	94
Figura 63 – Perspectiva digital do edifício JT finalizado.....	95
Figura 64 – Pavimentos separados com platibanda reservada.....	96
Figura 65 – Disposição de pavimento modelo.....	96
Figura 66 – Detalhe de lajes e pilares antigos sendo demolidos próximos a estruturas novas executadas.....	97
Figura 67 – Disposição de pavimento, reforça-se o vão livre sem pilares.....	98
Figura 68 – Detalhe de malhas e cordoalhas de aço de laje.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores característicos nominais das cargas variáveis.....	57
Tabela 2 – Classes de agressividade ambiental (CAA)	58
Tabela 3 – Valores limites de deslocamentos.....	65
Tabela 4 – Valores mínimos para armaduras passivas aderentes.....	68
Tabela 5 – Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas e lajes.....	68
Tabela 6 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.....	70
Tabela 7 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.....	71
Tabela 8 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o revestimento nominal para $\delta_c = 10$ mm.....	72
Tabela 9 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo)	74
Tabela 10 – Cordoalhas nuas para protensão.....	77
Tabela 11 – Tabela de aço para protensão.....	83
Tabela 12 – Tabela de aço para protensão.....	84
Tabela 13 – Tabela de resumo de aço	85
Tabela 14 – Tabela de resumo de aço	86
Tabela 15 – Tabela de resumo de aço	87
Tabela 16 – Tabela de resumo de aço	88

Tabela 17 – Catálogo de especificações técnica de fôrma bidirecional (Atex 700)	89
Tabela 18 – Descrição de serviços e custo para execução da laje em concreto armado.....	99
Tabela 19 – Cronograma de execução de serviços da laje em concreto armado..	100
Tabela 20 – Descrição de serviços e custo para execução da laje nervurada.....	101
Tabela 21 – Cronograma de execução de serviços da laje nervurada.....	101
Tabela 22 – Descrição de serviços e custo para execução da laje em concreto protendido.....	102
Tabela 23 – Cronograma de execução de serviços da laje em concreto protendido.....	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	JUSTIFICATIVA	17
3	OBJETIVOS.....	18
3.1.	Objetivo Geral.....	18
3.2.	Objetivos Específicos	18
4	ESTRUTURA DE TRABALHO	18
5	MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....	20
5.1.	Concreto Armado	20
5.1.1.	Conceito	20
5.1.2.	Histórico no Brasil	20
5.1.3.	Cenário atual.....	21
5.1.4.	Cases famosos	22
5.1.4.1.	<i>Canal de Santos</i>	<i>22</i>
5.1.4.2.	<i>Ponte de Mauricio de Nassau</i>	<i>24</i>
5.1.5.	Vantagens e Desvantagens	24
5.1.5.1.	<i>Vantagens.....</i>	<i>25</i>
5.1.5.2.	<i>Desvantagens</i>	<i>25</i>
5.2.	Concreto Protendido.....	25
5.2.1.	Conceito	25
5.2.2.	Tipos de protensão.....	26
5.2.2.1.	<i>Pré-tensão</i>	<i>26</i>
5.2.2.2.	<i>Pós-tração.....</i>	<i>28</i>
5.2.3.	Histórico no Brasil	30
5.2.4.	Cenário atual.....	33
5.2.5.	Cases famosos	33
5.2.6.	Vantagens e Desvantagens	34
5.2.6.1.	<i>Vantagens.....</i>	<i>34</i>
5.2.6.2.	<i>Desvantagens</i>	<i>35</i>
5.2.7.	Laje Nervurada Protendida	35
5.2.7.1.	<i>Conceito.....</i>	<i>35</i>

5.2.8.	Cenário atual.....	36
5.2.9.	Cases famosos	37
5.2.9.1.	<i>Reforma do Museu do Ipiranga.....</i>	37
5.2.9.2.	<i>IEB (Instituto de Estudos Brasileiros).....</i>	42
5.3.	Lajes nervuradas.....	44
5.3.1.	Conceito	44
5.3.2.	Tipos	45
5.3.2.1.	<i>Relativo à posição das nervuras na laje.....</i>	45
5.3.2.2.	<i>Relativo à direção da armação</i>	47
5.3.4.	Cenário atual.....	49
5.3.5.	Cases famosos	49
5.3.5.1.	<i>MASP.....</i>	49
5.3.6.	Vantagens e desvantagens.....	50
5.3.6.1.	<i>Vantagens.....</i>	51
5.3.6.2.	<i>Desvantagens</i>	51
6	MÉTODOS DE CÁLCULOS	52
6.1.	Concreto armado.....	52
6.1.1.	Classificação quanto a direção da armadura	52
6.1.2.	Vão efetivo	52
6.1.3.	Vinculação nas bordas	53
6.1.4.	Carregamentos	56
6.1.4.1.	<i>Carregamentos permanentes</i>	56
6.1.5.	Espessura mínima.....	57
6.1.6.	Cobrimento.....	58
6.1.7.	Altura da laje	58
6.1.8.	Momentos fletores solicitantes	60
6.1.8.1.	<i>Laje armada em uma direção</i>	60
6.1.8.2.	<i>Laje armada em duas direções.....</i>	62
6.1.9.	Flechas.....	64
6.1.10.	Flexão / Área de aço	66
6.1.11.	Verificações	67
6.1.11.1.	<i>Armadura máxima</i>	67
6.1.11.2.	<i>Armadura mínima</i>	67
6.1.11.3.	<i>Diâmetro máximo.....</i>	69

6.1.11.4.	<i>Espaçamentos máximos e mínimos</i>	69
6.2.	Concreto protendido	69
6.2.1.	Critérios utilizados: Pré-dimensionamento	69
6.2.1.1.	<i>Classe de agressividade</i>	70
6.2.1.2.	<i>Qualidade do concreto e cobertura da armadura</i>	71
6.2.1.3.	<i>Resistência à tração</i>	72
6.2.1.4.	<i>Módulos de elasticidades</i>	73
6.2.2.	Esquema estrutural	74
6.2.3.	Espessura da laje.....	75
6.2.4.	Critérios iniciais de protensão	76
6.2.4.1.	<i>Aço da armadura ativa</i>	76
6.2.4.2.	<i>Força de protensão</i>	77
6.2.4.3.	<i>Resistência do concreto no ato da protensão</i>	80
6.2.4.4.	<i>Modelagem e verificações</i>	82
6.3.	Laje nervurada	88
6.3.1.	Premissas	88
6.3.2.	Carregamentos	89
6.3.3.	Carregamentos permanentes.....	89
6.3.4.	Carregamentos variáveis	90
6.3.5.	Momentos fletores.....	90
6.3.6.	Altura da laje	90
6.3.7.	Área de aço.....	90
6.3.8.	Momentos fletores nos apoios intermediários	91
6.3.9.	Força cortante	91
7	ESTUDO DE CASO: EDÍFICIO CORPORATIVO JT	92
8	ORÇAMENTO E CRONOGRAMA	99
8.1.	Laje em concreto armado convencional	99
8.2.	Laje nervurada	100
8.3.	Laje protendida	102
9	CONCLUSÃO	103
10	BIBLIOGRAFIA	106
11	ANEXO A – TABELAS CLASSIFICATÓRIAS DE LAJES CONFORME OS MOMENTOS FLETORES	108

12	ANEXO B – TABELA DE COEFICIENTES DE CONCRETO E AÇO PARA CÁLCULO DE FLEXÃO SIMPLES EM SEÇÃO RETANGULAR DE ARMADURA SIMPLES.....	118
13	ANEXO C – TABELA DE ÁREA DE ARMADURA POR METRO DE LARGURA	119

1 INTRODUÇÃO

As estruturas ao longo da história passaram por diversos tipos de adaptações e transformações na construção civil, conforme a necessidade construtiva das sociedades, evolução das tecnologias empregadas nos processos ou até mesmo pela otimização do desempenho destes. (BONILHA; CHOLFE, 2018)

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção e, durante sua evolução, foi entendido que a implementação do aço junto com esse material traria benefícios, considerando as cargas aplicadas aos elementos e o aumento da resistência no conjunto, conhecido como concreto armado. Segundo Leonhardt; Monnig (2008), as primeiras armaduras de aço em peças de concreto foram adotadas em meados do século XIX na França. Essa metodologia vem sendo mantida até os dias atuais por apresentar inúmeras vantagens quanto ao custo das estruturas e da mão de obra globalizada.

Entretanto, o uso do concreto armado apresenta algumas limitações, como o ciclo vicioso deste processo construtivo, restrição de possibilidades arquitetônicas, geração de grande quantidade de resíduos e a falta de profissionalização da mão de obra considerando métodos alternativos.

Durante o decorrer das adaptações construtivas ao longo dos anos, podemos citar várias formas influentes no mercado mundial da construção civil. Uma importante alternativa que vem sendo empregada com mais frequência atualmente é o concreto protendido. Essa técnica cresce cada vez mais pelo fato de oferecer um aumento na resistência à tração do concreto, suportando maiores vãos sem necessidade de utilizar uma armação passiva robusta. Esse método tem utilização extremamente ampla, podendo ser usada em lajes pré-fabricadas, moldadas in loco ou até mesmo em vigas de concreto, propiciando um maior aproveitamento estrutural, melhorias de durabilidade e redução de deformações (BONILHA; CHOLFE, 2018). A protensão em seu conceito, é a ação de implantar um estado prévio de esforços a qualquer elemento estrutural, melhorando seu comportamento em serviço.

Outro método que vem em constante crescimento no mercado, pela praticidade e pelo custo benefício, é o de execução com lajes nervuradas. De acordo com Silva (2005) a principal motivação por essa opção é vencer grandes vãos de

lajes com o mínimo possível de pilares para otimizar o uso funcional do empreendimento. Com isso, este método é frequentemente usado para estacionamentos, shoppings centers, museus, hospitais e escolas/faculdades. Além disso, pode se observar uma redução no consumo de materiais estruturais do projeto, visto que há a aplicação de reutilização de fôrmas e menor quantidade de concreto, conforme citado por SPOHR (2008) e pelo Professor Marcos Terra (Diretor técnico da ATEX BRASIL).

A partir destas metodologias, foi elaborada a junção de suas principais características desenvolvendo-se assim as lajes nervuradas protendidas. Com o melhor desempenho em relação às lajes convencionais somado à aplicação da protensão, obtém-se uma solução de redução de materiais e um melhor aproveitamento de concreto e aço com mais resistência e menor peso próprio da estrutura. Entretanto, este processo por ainda ser recente sofre com a escassez de bibliografias nacionais e amplitude de cobertura pelas normas brasileiras.

2 JUSTIFICATIVA

Normalmente, o vão a ser vencido é um dos fatores mais importantes para a escolha do método estrutural. As vantagens dos métodos disponíveis devem ser levadas em consideração na escolha, para que possam ser levantadas alternativas ao concreto armado convencional, que já está consolidado no mercado da construção civil.

Estas alternativas têm se apresentado com mais frequência em projetos estruturais e sugerido por projetistas, com diversas outras aplicações e diferenciais que beneficiam a evolução construtiva. Segundo Bastos (2019) essas alternativas vêm sendo cada vez mais aplicadas no Brasil e no mundo, merecendo ser estudadas com atenção nos cursos de Engenharia Civil para promover noções básicas de projeto e execução.

Uma análise comparativa entre estes principais métodos construtivos destacados anteriormente, considerando uma situação real, tem como objetivo buscar melhores escolhas em determinadas situações, desfazendo a ideia e o

“preconceito” de serem opções inviáveis quanto à produção, qualidade e os custos de obra.

3 OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa entre o uso de três métodos construtivos, sendo eles: o concreto armado convencional, o concreto protendido e a laje nervurada, apresentando os dados quanto aos custos, prazo de obra e desempenhos executivos.

3.2. Objetivos Específicos

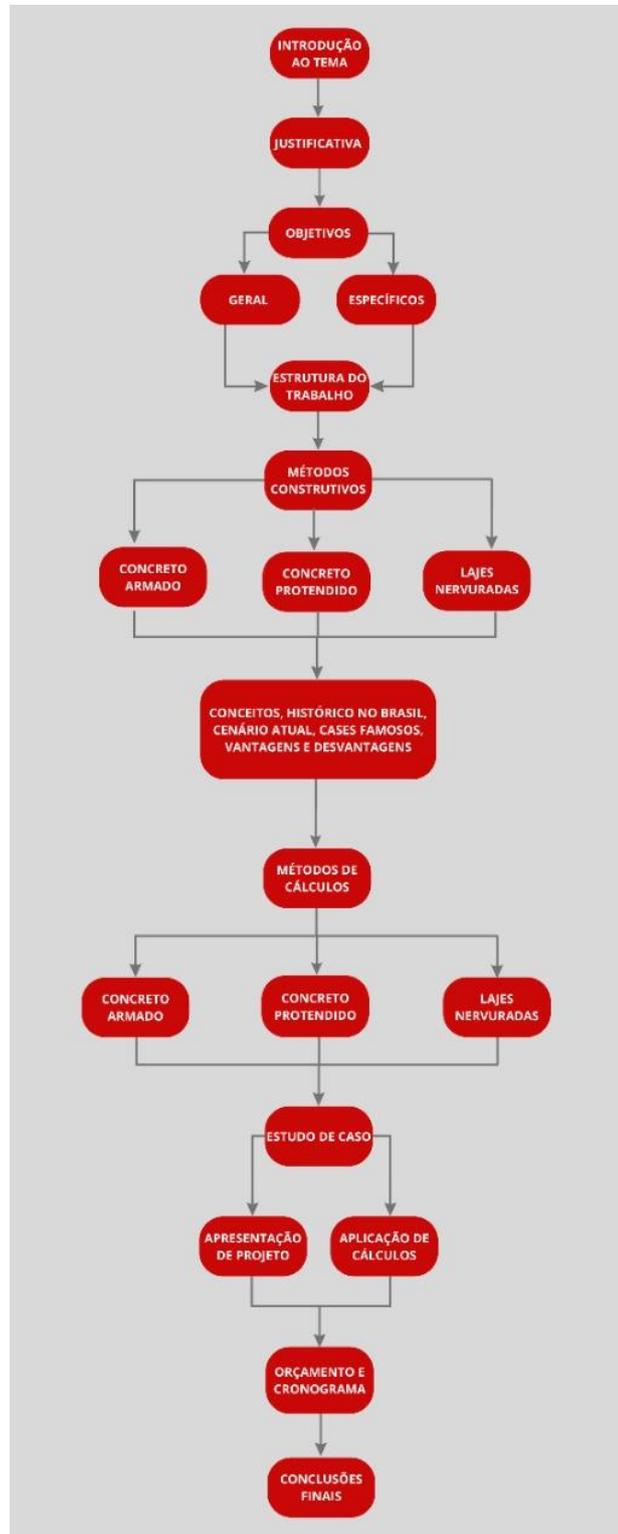
- Utilizar de um estudo de caso para base de pesquisa e apresentação de resultados;
- Desenvolver os cálculos de cada método construtivo citado em relação ao projeto original, com isso este será convertido para cada metodologia respectivamente;
- Apresentar um comparativo de custos entre os métodos;
- Elaborar um cronograma de obra para cada modelo;
- Concluir e apresentar resultados e analisar a viabilidade técnica do projeto.

4 ESTRUTURA DE TRABALHO

Para desenvolvimento do trabalho será utilizado um estudo de caso, que é um método que utiliza dados qualitativos e quantitativos coletados a partir de uma situação real. É caracterizado por ser um estudo detalhado cujo objetivo é de explicar, explorar e descrever um caso específico, fornecendo conhecimentos profundos sobre seu respectivo contexto (YIN, 2001).

Os dados desse trabalho serão coletados em portais acadêmicos, preferencialmente artigos científicos e livros a respeito do tema, além das informações reais extraídas do objeto do estudo de caso.

FIGURA 1 – ORGANOGRAMA DO TRABALHO



Fonte: Figura dos autores (2022)

5 MÉTODOS CONSTRUTIVOS

5.1. Concreto Armado

5.1.1. Conceito

O concreto armado é o concreto que é reforçado por barras e fios de aço formando um arranjo denominado armadura. Seus constituintes possibilitam aquisição de resistência mecânica em diversas aplicações construtivas.

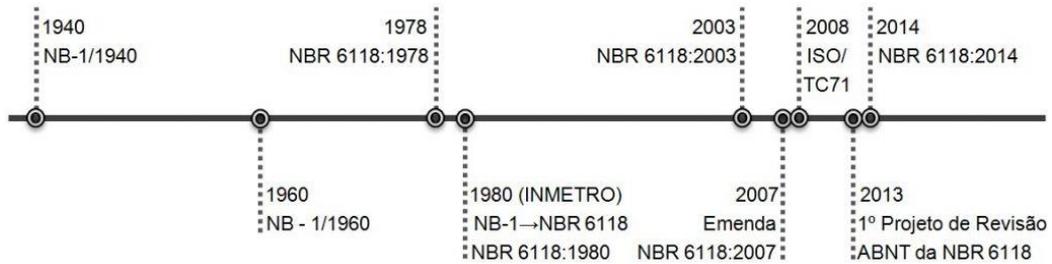
Nos dimensionamentos de vigas, pilares e lajes, sempre adotamos o posicionamento de suas armaduras estrategicamente em suas zonas de tração. O aço do elemento estrutural possibilita a resistência à tração durante aplicação de cargas e o concreto, por sua vez, consegue se manter mais resistente às forças de compressão. Consequentemente o concreto armado torna-se versátil para quase todo tipo de aplicação estrutural na construção civil (BASTOS, 2019).

5.1.2. Histórico no Brasil

No Brasil no século XX o concreto armado ficou conhecido como cimento armado, termo evidenciado pela primeira vez nas construções habitacionais em Copacabana. O “Cimento armado” era uma patente registrada utilizada por uma empresa na época que se utilizou do nome e método de execução evidenciado por Monier na França.

Devido a mudanças políticas, econômicas e sociais o concreto passou a ser largamente utilizado no setor da construção e também pesquisado amplamente. Passou a ser constantemente utilizado por Carlos Poma e em 1940 foi instituída a primeira Norma Brasileira específica deste assunto por Getúlio Vargas (PORTO, 2015).

FIGURA 2 – LINHA DO TEMPO DO CONCRETO ARMADO NO BRASIL



Fonte: Ed. Oficina de Textos (2014/2015)

No Brasil as informações referentes ao início do uso do concreto armado são escassas de documentação havendo, portanto, descrições vagas e imprecisas sobre o início da utilização do concreto armado no país (VASCONCELOS, 1985).

Acredita-se também que os primeiros dimensionamentos foram feitos pelo engenheiro Carlos Euler e seu auxiliar Mario De Andrade, sendo uma ponte de concreto armado em arco no Rio Maracanã (FARIA, 2015).

5.1.3. Cenário atual

A busca pelo modelo físico-matemático “ideal” para a estrutura de um edifício de concreto armado vem evoluindo ao longo do tempo, sempre caminhando lado a lado com a evolução tecnológica. De maneira geral, os escritórios de projetos estruturais estão adotando os modelos de pórtico espacial (vigas e pilares), grelha (lajes) e o modelo de pórtico espacial integrado (vigas, pilares e lajes) para analisar os seus edifícios.

Para o futuro, há a expectativa de que o modelo de pórtico integrado venha a se consolidar cada vez mais no mercado. Com o avanço da tecnologia, a tendência é que o tempo de processamento das informações nos programas utilizados para estruturas, como o “TQS”, seja cada vez menor.

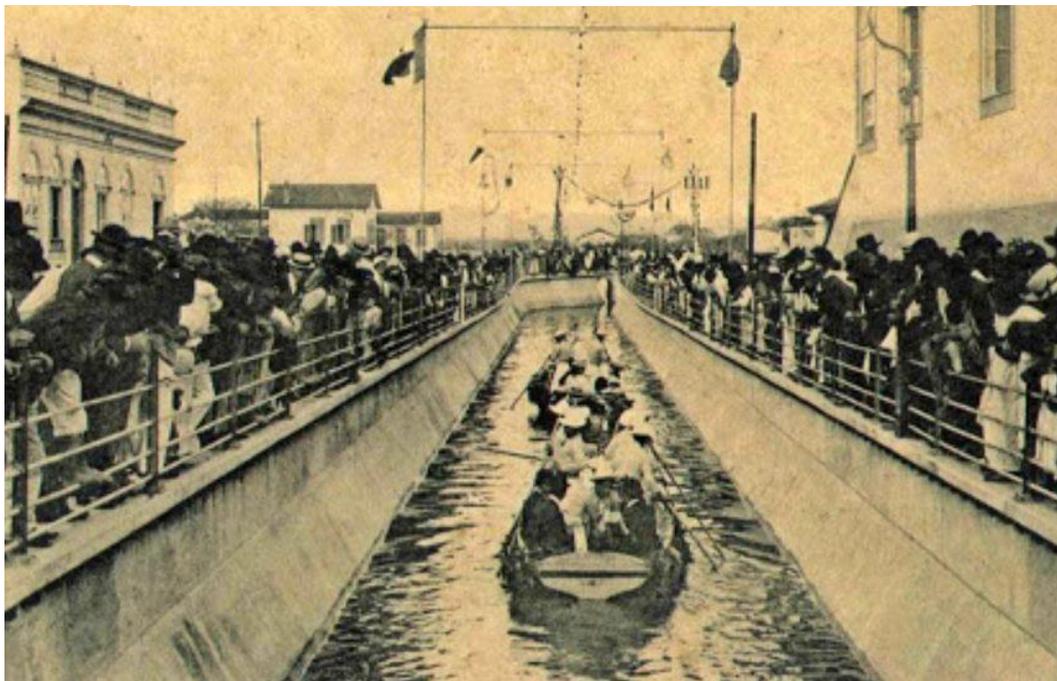
Segundo Kimura (2019), ainda pensando no futuro da modelagem de edifícios de concreto armado, há uma possibilidade de deixar o modelo ainda mais “realístico” utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Dessa forma, podemos modelar as lajes como “placas” e os pilares-paredes como “cascas”.

5.1.4. Cases famosos

5.1.4.1. Canal de Santos

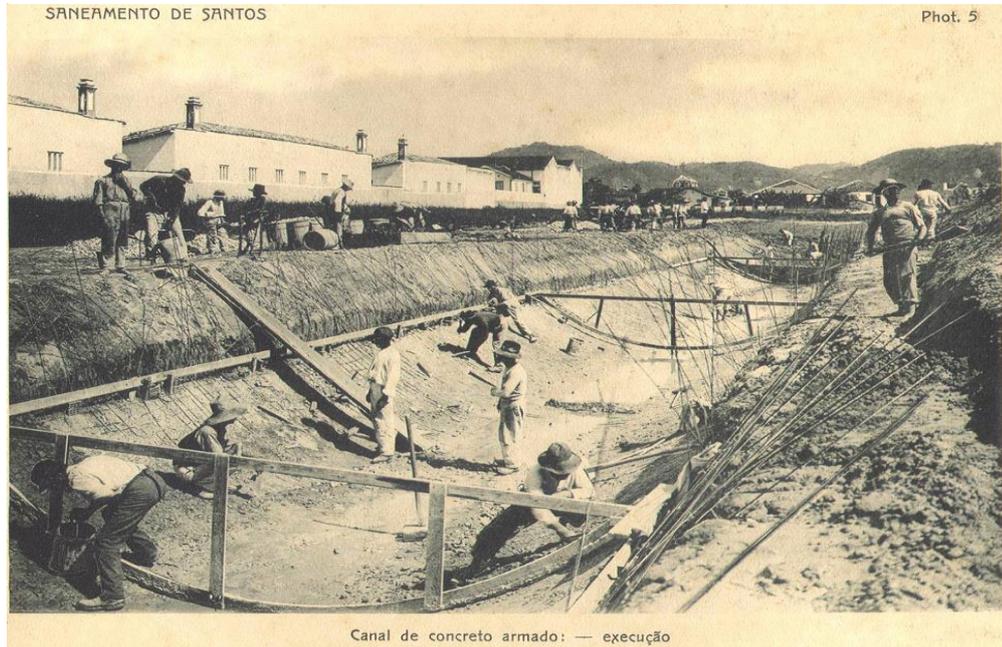
Há relatos onde as primeiras obras de São Paulo a utilizarem concreto armado foram as de infraestrutura urbana que tiveram o intuito de sanear a cidade de Santos. Na época o engenheiro Saturnino Rodrigues ficou incumbido de realizar grandes canais, galerias e pontes para drenagem da água que percola através dos morros da serra, essas primeiras benfeitorias são conhecidas como Canal 1. Foi construído sobre o traçado do rio Ribeirão dos Soldados e tinha a ideia de separar as águas de rios e córregos do esgoto, para dar suporte aos emissários de Santos.

FIGURA 3 – INAUGURAÇÃO DO CANAL DE SANTOS



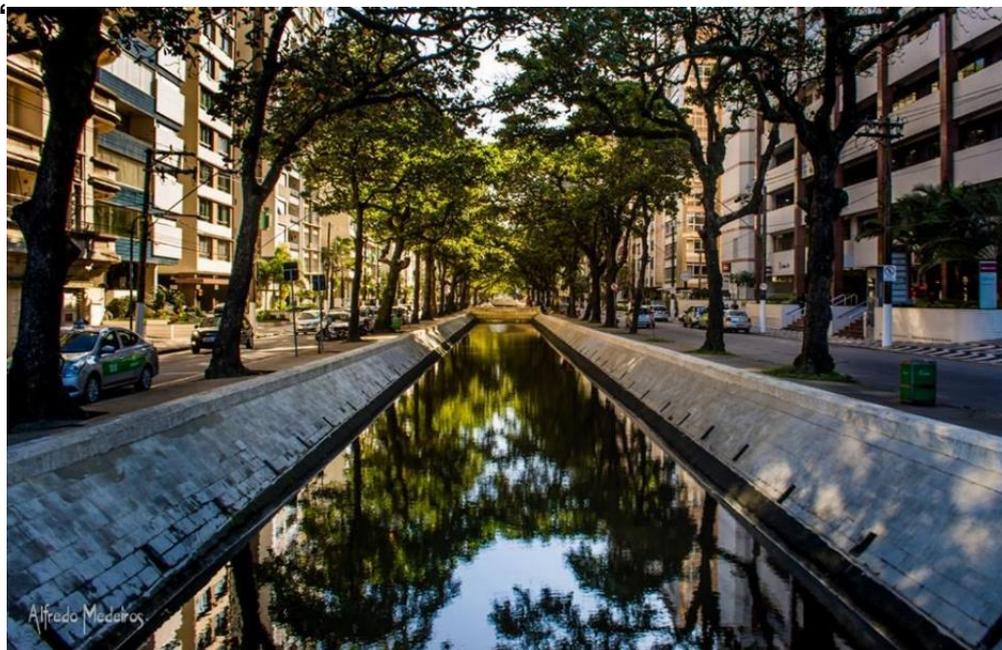
Fonte: Acervo novo milênio [2013?]

FIGURA 4 - PROCESSO EXECUTIVO DE CANAL EM CONCRETO ARMADO



Fonte: Acervo novo milênio [2013?]

FIGURA 5 – CANAL DE SANTOS ATUALMENTE



Fonte: Alfredo Medeiros (2017)

5.1.4.2. Ponte de Maurício de Nassau

Um das amplas utilizações até os dias de hoje para o concreto armado é no setor de infraestrutura urbana. A ponte de Maurício de Nassau, em Recife-PE, foi projetada em 1963 por Emilio Henrique Baumgart que foi um dos pioneiros do concreto armado no Brasil, participando de pesquisas, estudos e projetos ligados ao desenvolvimento da técnica ainda pouco explorada no território. Essa obra lhe concedeu o título de “pai do concreto armado” (VASCONCELOS, 1985). Baumgart não só foi o primeiro brasileiro a participar do processo de importação da tecnologia do concreto, mas também desenvolveu e instaurou obras na Alemanha.

FIGURA 6 – PONTE DE MAURICIO DE NASSAU



Fonte: Wikimapia (2014)

5.1.5. Vantagens e Desvantagens

A seguir estão listadas as principais vantagens e desvantagens do concreto armado na construção civil.

5.1.5.1. *Vantagens*

- Facilmente moldável, pois consegue se adaptar a qualquer tipo de forma e as armaduras podem ser distribuídas de acordo com os o fluxo de esforços (AURICH, 2001);
- Resistente a intempéries como o fogo, influências atmosféricas e desgastes mecânicos;
- Materiais utilizados como matéria são economicamente acessíveis quando comparados a outros (NEVILLE, 2016).

5.1.5.2. *Desvantagens*

- Geração de muitos resíduos (NEVILLE,2016);
- Utilização de formas de madeira ou metálica, encarecendo o projeto;
- Demolições trabalhosas, podendo inviabilizar o custo;
- Tempo para execução maior do que outros sistemas de construção.

5.2. **Concreto Protendido**

5.2.1. **Conceito**

Ao longo do último século, houve uma grande evolução da engenharia das estruturas civis que ocorreram em grandes grupos: dos materiais estruturais, dos processos de cálculo, projetos, métodos e procedimentos construtivos (BONILHA; CHOLFE, 2018). Os materiais que basicamente são formados por concreto e aço, sofreram grande evolução diante da tecnologia que desenvolveu aditivos que garantem melhorias ao concreto como qualidade, durabilidade e aumento de resistência.

Dentre as evoluções está a protensão das armaduras. A palavra protensão ou pretensão expressa a ideia da instalação de um estado prévio de tensões em algo, sendo aplicado a peças estruturais e materiais de construção. Representa um

sistema por meio de um processo mecânico, onde o aço é tensionado dentro de limites com máximo aproveitamento de resistência.

A protensão pode ser definida como o artifício de introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações (WALTER PFEIL, 1984. p.1).

Segundo Bastos (2019) o concreto protendido hoje já está plenamente aprovado e competitivo em todos os setores da construção civil. Existem casos onde o mesmo salienta um melhor custo benefício para a implantação, economia de materiais para a construção, diminuição dos prazos e a abertura de possibilidades na concepção da arquitetura, já que consegue eliminar pontos de apoio que de alguma forma moldam a disposição dos ambientes no projeto.

5.2.2. Tipos de protensão

O estiramento dos cabos de protensão, realizado com um macaco hidráulico, pode ser feito antes ou depois do lançamento do concreto. Quando o tracionamento ocorre antes do lançamento, chama-se pré-tensão, já quando ocorre após a cura da peça, chama-se pós-tração. Segundo Bastos (2019) os conceitos são apresentados dessa maneira:

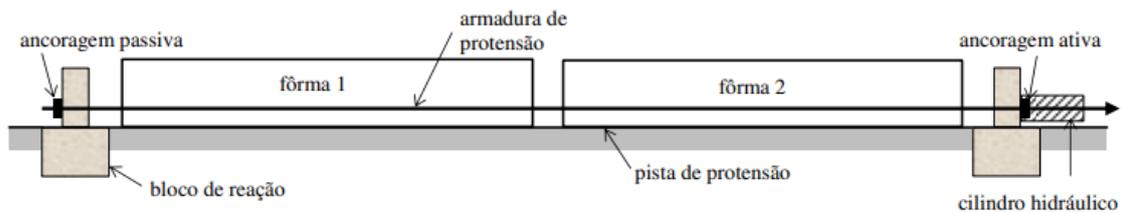
5.2.2.1. Pré-tensão

A pré-tensão usualmente é feita na fabricação de peças pré-moldadas nas chamadas pistas de protensão. Nesse sistema as armaduras são tracionadas entre as cabeceiras da pista e ficam ancoradas aguardando o lançamento do concreto nas formas. Após a concretagem e o atingimento da resistência mínima estipulada em projeto, as ancoragens são soltas e toda a carga é transferida para a peça por aderência.

A definição da NBR 6118 é a seguinte: “concreto protendido em que o pré- alongamento da armadura ativa é feito utilizando-se apoios independentes do

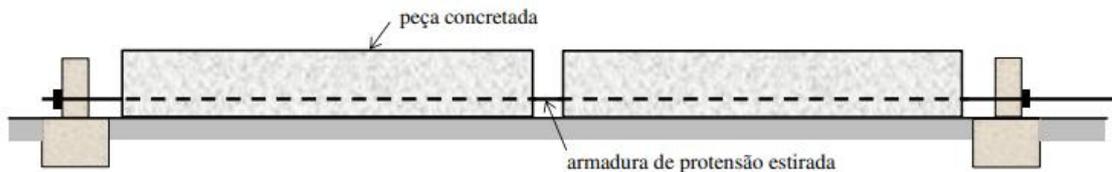
elemento estrutural, antes do lançamento do concreto, sendo a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios desfeita após o endurecimento do concreto; a ancoragem no concreto realiza-se somente por aderência. ”

FIGURA 7.1 – ESTIRAMENTO DA ARMADURA DE PROTENSÃO COM CILINDRO HIDRÁULICO



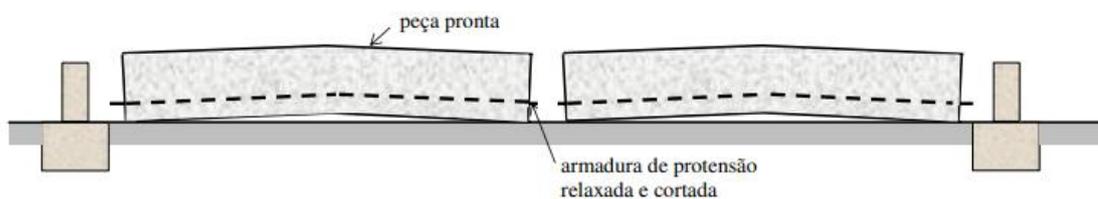
Fonte: Bastos (2019)

FIGURA 7.2 – PEÇAS CONCRETADAS E SENDO CURADAS COM A ARMADURA DE PROTENSÃO ESTIRADA E FIXADA NAS EXTREMIDADES



Fonte: Bastos (2019)

FIGURA 7.3 – APLICAÇÃO DAS PROTENSÕES NAS PEÇAS COM O RELAXAMENTO DA ARMADURA DAS ANCORAGENS



Fonte: Bastos (2019)

Além da cura natural do concreto, a cura térmica com vapor aquecido, em um ambiente de fábrica, pode ser utilizada para acelerar o processo do endurecimento e atingimento da resistência em até 24 horas. Como a transferência das forças ocorre

com um concreto ainda com baixa idade, deformações por encurtamento elástico do concreto podem ocorrer, gerando assim uma perda da força de protensão.

5.2.2.2. Pós-tração

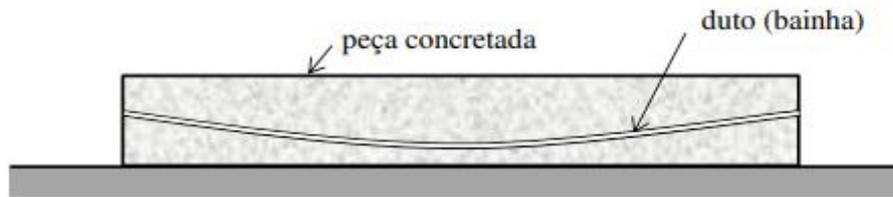
A pós-tração normalmente é aplicada em peças onde a repetitividade não é um fator existente, como em lajes, pisos estruturais, pontes de grandes vãos e outras aplicações com concreto moldado in loco. Consiste no estiramento do aço somente após o concreto ter atingido uma resistência mínima estipulada em projeto, necessária para resistir às tensões de compressão.

Os cabos são posicionados em bainhas e fixados em uma das extremidades através de uma ancoragem passiva. Na outra extremidade (ancoragem ativa) recebem a tensão do macaco hidráulico, posicionado de maneira apoiada na própria peça. Terminada a operação, a força do cilindro hidráulico é relaxada e as cordoalhas se fixam através de cunhas metálicas nas placas de aço do sistema de ancoragem, evitando o relaxamento dos cabos.

Após o processo, normalmente aplica-se uma nata de cimento dentro das bainhas, para evitar a corrosão do aço criando uma aderência com o concreto, fazendo os materiais trabalharem em conjunto, nesse caso chamado de pós-tensão com aderência.

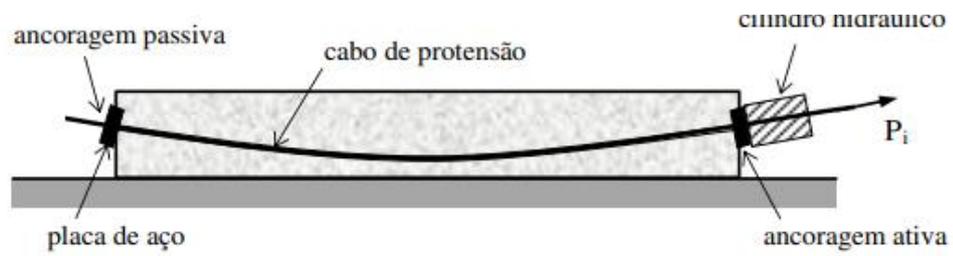
A NBR 6118 define: *“concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do concreto, sendo utilizadas, como apoios, partes do próprio elemento estrutural, criando posteriormente aderência com o concreto, de modo permanente, através da injeção das bainhas. ”*

FIGURA 8.1 – MOLDAGEM E CURA DO CONCRETO



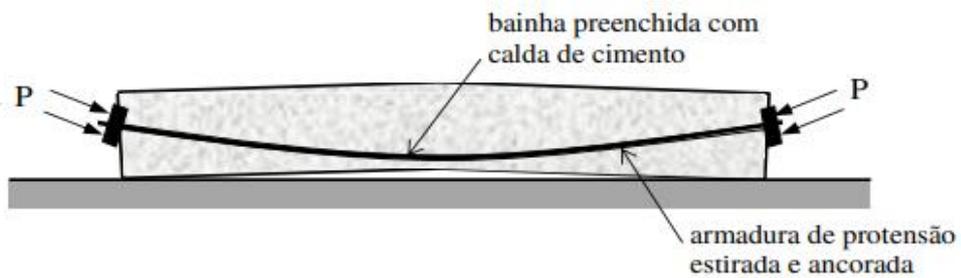
Fonte: Bastos (2019)

FIGURA 8.2 – ESTIRAMENTO E ANCORAGEM DA ARMADURA DE PROTENSÃO



Fonte: Bastos (2019)

FIGURA 8.3 – PREENCHIMENTO DA BAINHA COM CALDA DE CIMENTO



Fonte: Bastos (2019)

Quando não ocorre a injeção da nata de cimento, o processo é chamado de pós-tensão sem aderência, sendo comum a utilização de cordoalhas engraxadas. A cordoalha é envolta com essa graxa com o intuito de diminuir o atrito com a capa que a envolve durante o processo executivo (HANAL, 2005).

O processo de execução é semelhante ao método anterior, a diferença é que como não existe aderência entre as cordoalhas e o concreto, a força que comprime a peça fica concentrada somente nas ancoragens.

A NBR 6118 define: *“concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do concreto, sendo utilizadas, como apoios, partes do próprio elemento estrutural, mas não sendo criada aderência com o concreto, ficando a armadura ligada ao concreto apenas em pontos localizados.”*

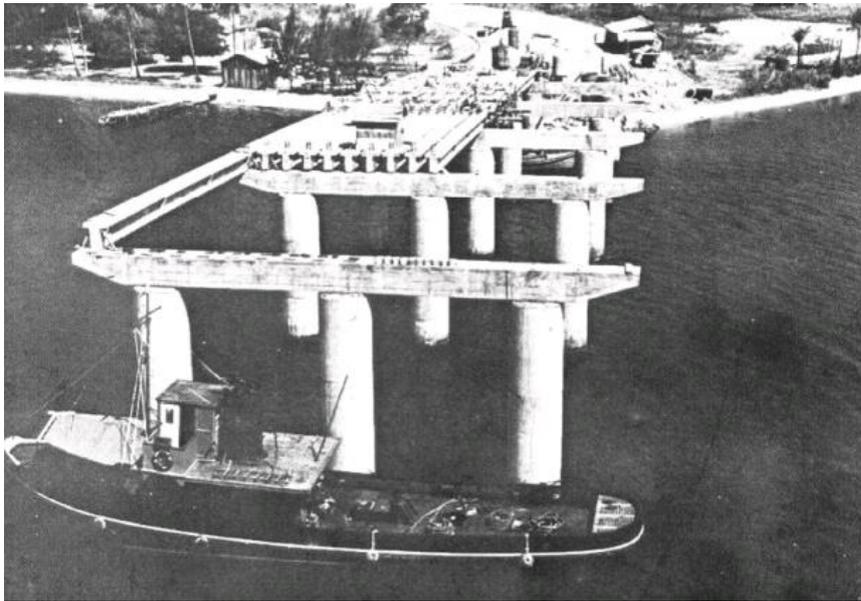
5.2.3. Histórico no Brasil

Apesar da primeira experiência ter ocorrido no final do século XIX, nos EUA, o início da protensão no Brasil ocorreu apenas em 1949, no Rio de Janeiro, durante a execução da Ponte do Galeão, construída com 316 metros de comprimento sendo recorde mundial no quesito concreto protendido.

De acordo com o engenheiro responsável, Carlos Freire Machado (2015), a movimentação pós-guerra da aviação internacional ocasionou no aumento da circulação de passageiros no aeroporto do Galeão e conseqüentemente prejudicou o desembarque destes, gerando reclamações e protestos. Para solucionar esse problema, as autoridades responsáveis determinaram a necessidade de construir uma ponte em dois trechos.

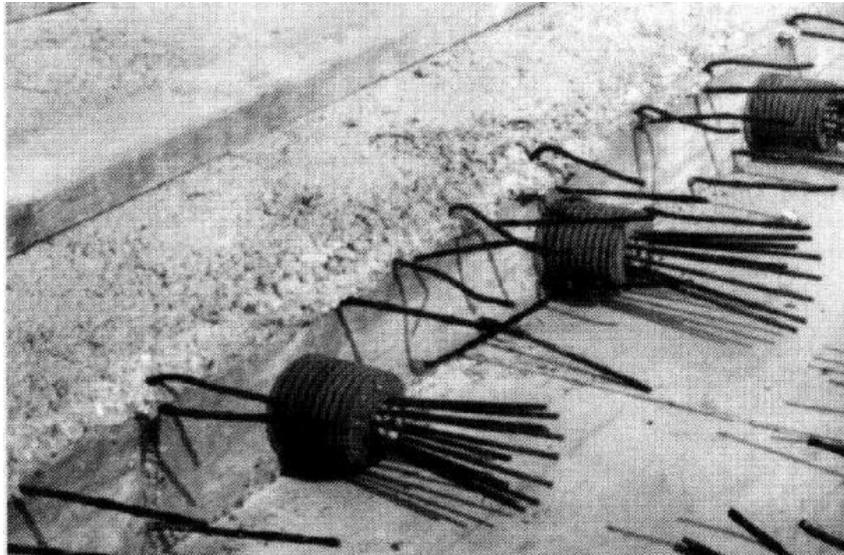
Durante a elaboração dos projetos foi tomado conhecimento de obras construídas na Europa com grandes resultados econômicos e a curto prazo. Estas obras foram executadas pelo engenheiro e arquiteto francês Eugène Freyssinet e o próprio demonstrou bastante interesse quando procurado para o conjunto de obras do aeroporto. Para isso, todo o material de aço, ancoragem e os equipamentos necessários foram importados da França. Somente em 1952 iniciou-se a fabricação de aço para protensão nacional (OLIVEIRA, 2015; VERÍSSIMO, 1998).

FIGURA 9 – PRIMEIRAS APLICAÇÕES DA PROTENSÃO EM GRANDES ESCALAS NO BRASIL: A PONTE DO GALEÃO



Fonte: Livro "O Concreto no Brasil" (1992)

FIGURA 10 – DETALHE DAS ANCORAGENS DOS CABOS DE PROTENSÃO



Fonte: Livro "O Concreto no Brasil" (1992)

Além da Ponte do Galeão, o próprio Carlos Freire Machado, anos depois, foi responsável pela construção da Ponte Petrolina-Juazeiro, localizada no nordeste brasileiro, já executada com aço nacional que teve sua produção iniciada em 1952

através da companhia Belgo-Mineira. Com isso, tornaram-se os primeiros exemplos do concreto protendido no país (OLIVEIRA, 2015).

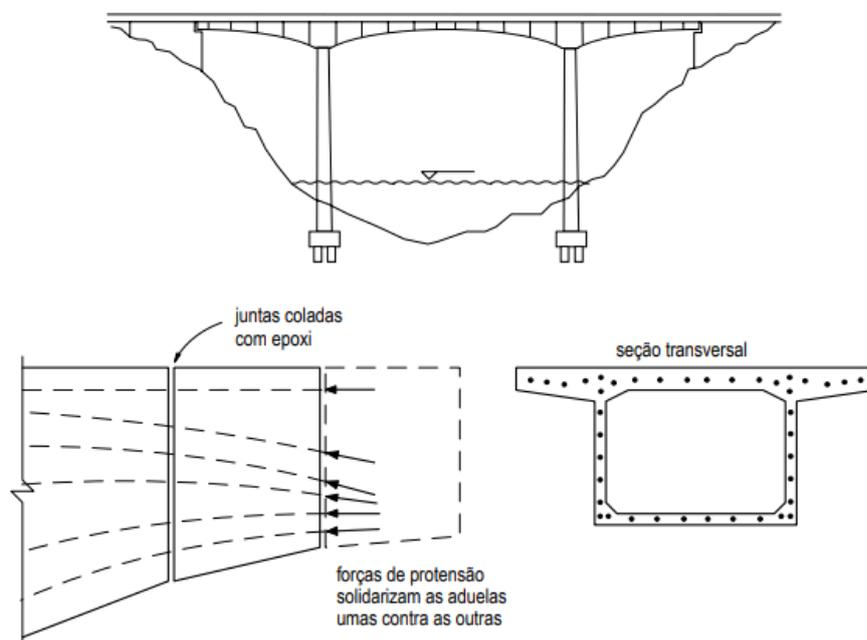
Em 1953, com a criação da norma alemã de concreto protendido (DIN 4227), as obras tiveram um crescimento exponencial no Brasil e a normatização brasileira do método (pela ABNT) foi criada para fiscalização e segurança dos projetos e execuções em território nacional.

FIGURA 11 – PONTE PETROLINA-JUAZEIRO



Fonte: Lucas Carvalho – Geo (2014)

FIGURA 12 – SISTEMA DE CONSTRUÇÃO EM BALANÇOS SUCESSIVOS



Fonte: “Concreto Armado – Fundamentos Básicos” (1998)

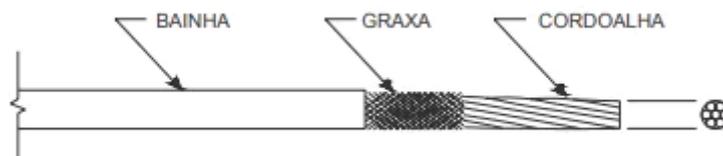
5.2.4. Cenário atual

Apesar de ainda vivermos em um período de desmistificação dos processos executivos da protensão, que possuem benefícios e vantagens sobre o convencional concreto armado, pode-se observar que o concreto protendido adquiriu gradativamente seu espaço no mercado. No cenário atual, temos como exemplos: centros administrativos, residências, museus, estruturas arquitetônicas e pontes estaiadas.

Com o decorrer da evolução da protensão junto às pesquisas e o crescimento exponencial das tecnologias na execução das obras, foram se criando métodos específicos para cada necessidade. De acordo com Veríssimo (1998), pode-se classificar conforme o tipo de tração (pré-tração e pós tração) e a aderência da armação em relação ao concreto, mencionadas anteriormente.

Entre essas alternativas, o uso de cordoalha engraxada é cada vez mais utilizado junto à protensão com pós-tensão, com aplicações no Brasil e pelo mundo nos últimos anos, principalmente em lajes maciças e nervuradas, pisos industriais e reforços estruturais.

FIGURA 13 – DETALHE DE CORDOALHA ENGRAXADA



Fonte: Manual da Belgo (2ª edição, sem data de emissão)

5.2.5. Cases famosos

No Brasil, a maior obra em concreto protendido é a ponte Jornalista Phelippe Daou, que cruza o rio Negro, no Amazonas. É a maior ponte estaiada do país, com 3,6 quilômetros de extensão sobre o maior rio de água negra do mundo.

FIGURA 14 – PONTE PHELIPPE DAOU, BATIZADA COMO PONTE RIO NEGRO



Fonte: Naldo Arruda (2019)

Essa ponte conecta os municípios de Manaus e Iranduba e também faz parte da Rodovia Manoel Urbano. Foi aberta para o tráfego de veículos em 2011 e batizada como Ponte Rio Negro durante a inauguração. Em 2017, recebeu o nome do jornalista e empresário brasileiro Phelippe Daou, um dos fundadores da Rede Amazônica.

5.2.6. Vantagens e Desvantagens

A seguir estão selecionadas as principais vantagens e desvantagens do concreto protendido.

5.2.6.1. Vantagens

- A protensão suporta vãos que seriam inviáveis com concreto armado, acarretando maiores possibilidades arquitetônicas com menores restrições ao aproveitamento dos espaços.

- Reduz as cargas impostas às fundações devido à estrutura se tornar mais leve;
- Redução no tempo de construção devido à facilidade de execução das formas, seu reaproveitamento e a não utilização de vigas nas estruturas.

5.2.6.2. Desvantagens

- Pode ser inviável tecnicamente ou financeiramente dependendo do tipo e a geometria da estrutura;
- Carência de mão de obra especializada;
- Perdas de protensão ao longo do tempo (imediatas e progressivas);
- Necessidade de equipamentos específicos.

5.2.7. Laje Nervurada Protendida

5.2.7.1. Conceito

Conforme apresentado anteriormente, as lajes nervuradas e a protensão são opções de viabilização de estruturas que visam vencer enormes vãos para uma otimização de espaços e projetos arquitetônicos, como também para diminuir seu consumo de materiais e prazo de execução (BASTOS, 2019; SILVA,2005).

FIGURA 15 – DISPOSIÇÃO DE PROTENSÃO EM LAJE NERVURADA



Fonte: Atex Brasil (2012)

Com o desenvolvimento destes métodos aliado às necessidades construtivas atualmente existentes, criou-se a oportunidade de uni-los para aumentar ainda mais este leque.

5.2.8. Cenário atual

Ainda que a aplicação deste método apresente diversas vantagens para a construção civil, dificilmente encontram-se documentos e teses que defendam esse processo incentivando construtoras e projetistas a utilizá-lo. Por este motivo, manifestam baixa frequência de uso.

Nos EUA e Europa, pode-se localizar diversos estudos de autores como John B. Kennedy, um dos responsáveis pelo *Journal of the Structural Division*, na ASCE (1983), que estimulam análises para execução de pontes e produção de pré-fabricados utilizando lajes nervuradas protendidas. No Brasil temos o exemplo da Atex, que traz estudos comparativos com frequência pelo Eng. Marcos Terra, diretor técnico da empresa.

FIGURA 16 – COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PROTENDIDOS: LAJE MACIÇA X LAJE NERVURADA

CARACTERÍSTICAS DAS LAJES	MACIÇA PROTENDIDA		NERVURADA PROTENDIDA	
Espessura	menor	+	maior	-
Execução	fácil	+	média	-
Tempo	menor	+	médio	-
Teto	liso	+	alveolado	-
Materiais	maior	-	menor	+
Pêso	maior	-	menor	+
Custo	maior	-	menor	+

Fonte: Atex Brasil (2017)

5.2.9. Cases famosos

5.2.9.1. Reforma do Museu do Ipiranga

De acordo com o site próprio, o museu localizado no Parque da Independência, zona sul de São Paulo, tem como nome oficial Museu Paulista da Universidade de São Paulo e foi inaugurado em 7 de setembro de 1895. Na época era considerado um museu de exposição da história natural, atualmente é um acervo científico e cultural que exerce influência no campo de toda história brasileira.

FIGURA 17 – FOTOGRAFIA DE ACERVO HISTÓRICO DO MUSEU DO IPIRANGA



Fonte: Museu Paulista (1888)

Na época do seu centenário, em 1922, o museu foi reforçado pelo seu caráter histórico, formando-se novos acervos e ampliando cada vez mais os espaços disponíveis do local. Entretanto, a estrutura com o decorrer do tempo começou a carecer de reformas e reforços complementares até que em 2005, iniciou-se o estudo preliminar para elaboração do projeto de reforma e ampliação.

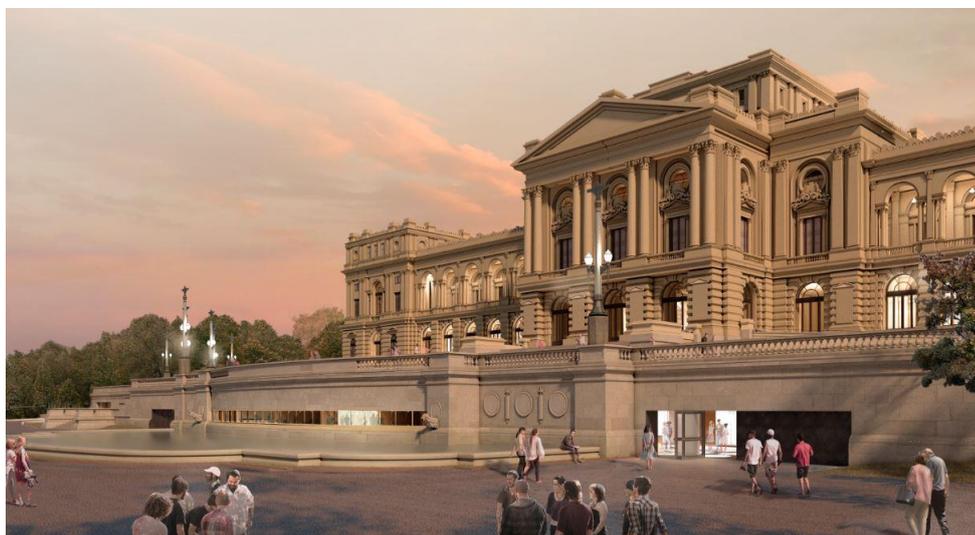
FIGURA 18 – MUSEU DO IPIRANGA ANTES DA INTERDIÇÃO PARA RESTAURAÇÃO



Fonte: Museu Paulista (2016)

Apenas em 2013 este foi concluído, conseqüentemente, a direção do Museu do Ipiranga estabeleceu a interdição do edifício para visitação, visando segurança aos frequentadores do parque. Além de uma reforma, a obra foi considerada de domínio de restauração histórica, de acordo com os envolvidos diretamente com os projetos, diversos elementos tinham a necessidade de serviços específicos para manter o mesmo aspecto visual. Somente agora em 2022, quando celebra-se o bicentenário da independência que ocorreu a reabertura do museu.

FIGURA 19 – MODELAGEM DE DIVULGAÇÃO PÓS REFORMA DE RESTAURAÇÃO

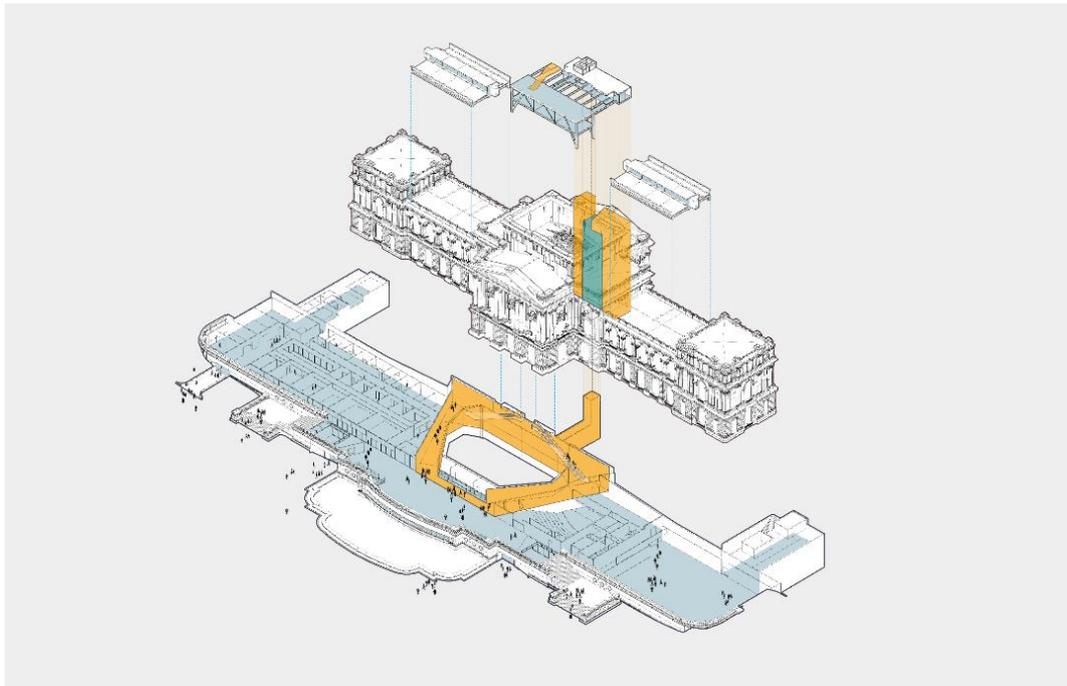


Fonte: Museu do Ipiranga (2022)

Conforme o edital do instituto, o novo projeto tem como principal objetivo a modernização em conjunto da restauração completa do edifício. Prevê que seja dedicado exclusivamente à visitação pública, com exposições e espaços de aproveitamento visual da sua nova arquitetura renovada com acessibilidade universal.

Para se adequar a essas carências de ampliação e às normativas atuais, os projetistas se depararam com necessidades de enormes espaços para as exposições, reforços de estruturas e fundações antigas e obter o menor consumo de materiais. Com isso, se propuseram em utilizar as lajes nervuradas com protensão.

FIGURA 20 – CORTE EM 3D DEMONSTRANDO SETORES REFORMADOS



Fonte: Museu do Ipiranga (2022)

FIGURA 21 – PERSPECTIVA DE SALÃO COM LAJE NERVURADA AMOSTRA NO TETO



Fonte: Museu do Ipiranga (2022)

FIGURA 22 – PERSPECTIVA DE SALÃO DE EXIBIÇÕES COM LAJE NERVURADA AMOSTRA NO TETO



Fonte: Museu do Ipiranga (2022)

FIGURA 23 - DETALHE DA LAJE NERVURADA EM OBRA



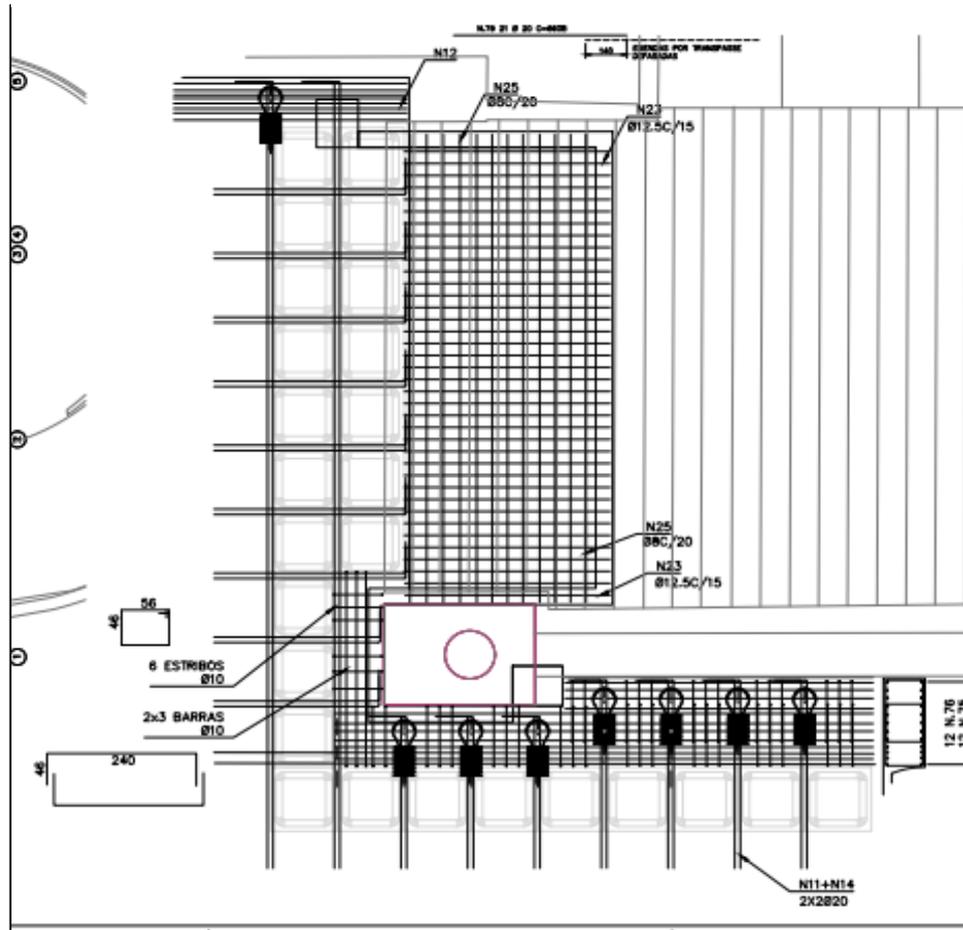
Fonte: Fotos cedidas com autorização da Companhia de Projetos (2021)

FIGURA 24 – DETALHE DA LAJE NERVURADA COM VIGA PROTENDIDA



Fonte: Fotos cedidas com autorização da Companhia de Projetos (2021)

FIGURA 25 – DETALHAMENTO DE ARMAÇÃO DE PROJETO ESTRUTURAL



Fonte: Companhia de Projetos (2020)

5.2.9.2. IEB (Instituto de Estudos Brasileiros)

Em 1962, o historiador Sérgio Buarque de Holanda criou o Instituto de Estudos Brasileiros, sendo este um complexo incorporado pela Universidade de São Paulo. Teve como desafio pioneiro a reflexão referente à sociedade brasileira por meio de diversas áreas de conhecimento da humanidade.

Atualmente, as atividades exercidas possuem caráter de responsabilidade pela preservação e manutenção dos acervos culturais que estão sob sua guarda. Por esse motivo o IEB recebe crescente reconhecimento acadêmico, em resultado disso, em 1995 foi contemplado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico

Nacional (IPHAN) com o prêmio Rodrigo de Melo Franco de Andrade na categoria que rege a Preservação de Acervos Culturais Móveis e Imóveis (LANNA, 2010).

FIGURA 26 – FOTOGRAFIA DA FACHADA DO PRIMEIRO PRÉDIO DO IEB



Fonte: Instituto de Estudos Brasileiros (2002)

Com tamanha valorização dos seus serviços e espaços, o IEB foi exponencialmente recebendo mais acervos importantes e conseqüentemente necessitando de ampliação de seus recintos. Por esses motivos, em 2005, visando abrigar e integrar diversas coleções brasileiras de livros e manuscritos, o bibliófilo José Mindin e sua esposa, criaram a BBM (Biblioteca Brasileira Mindin). Esse projeto de construção foi concebido em 2002 pelo professor István Jancsó, na época diretor da IEB. A biblioteca possui um acervo de 32 mil títulos que correspondem a 60 mil volumes aproximadamente.

O edifício, inaugurado em 2013 ao público, teve diversas inspirações europeias e americanas para o seu desenvolvimento. Ainda foi assessorado pela faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP. O acervo está disposto em três mezaninos com visão do átrio da biblioteca, com capacidade para cerca de 90 mil itens bibliográficos e foi disponibilizado para receber essas expansões. Possui dois laboratórios que são responsáveis pela conservação e preservação dos materiais,

tanto para digitalização virtual deste acervo como para manutenções preventivas. Possui ainda salas de leitura, salas para exposições e eventos com teor acadêmico.

Pela necessidade de amplitude em seus ambientes sem perder o teor arquitetônico moderno do projeto, foram designadas lajes nervuradas com protensão, atendendo assim todas as necessidades solicitadas.

5.3. Lajes nervuradas

5.3.1. Conceito

De acordo com a NBR 6118:2014, lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras dispostas em uma ou duas direções, dispondo assim de vazios regulares entre si nos quais pode ser colocado material inerte para o preenchimento.

FIGURA 27 – LAJE NERVURADA COM ENCHIMENTO EM EPS



Fonte: Escola Engenharia (2019)

São lajes com nervuras de concreto interligadas entre si por meio de fôrmas, sejam elas pré-moldadas ou fabricadas in loco. O principal intuito desse método é vencer grandes vãos estruturais com menor consumo possível de concreto (SILVA, 2005).

Nesse tipo de laje os espaços entre as nervuras podem ser ocupados por diversos materiais para enchimento sem função estrutural, como isopor e blocos cerâmicos. Podem também permanecer vazios, fazendo necessário a utilização de formas de madeira, polipropileno ou qualquer outro material que ficará incorporado junto ao concreto, chamadas normalmente de cubetas.

FIGURA 28 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE LAJE NERVURADA PARA ESTACIONAMENTO



Fonte: Google imagens (2022)

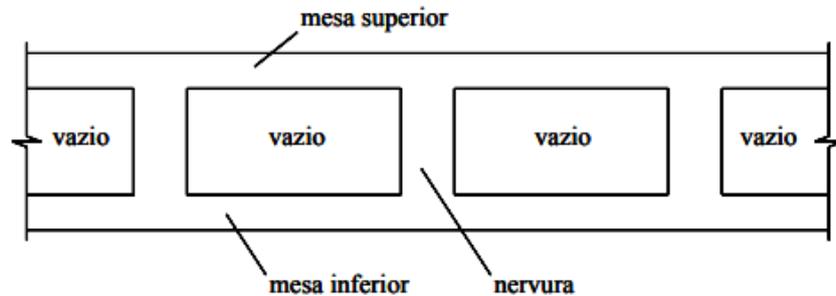
5.3.2. Tipos

5.3.2.1. *Relativo à posição das nervuras na laje*

As lajes nervuradas podem ser classificadas de diferentes maneiras, como por exemplo relativo à posição das nervuras na laje na seção transversal. Segundo da Silva (2005) essa divisão pode ser feita em três tipos: dupla, invertida e direta.

Na laje nervurada dupla, as nervuras ficam posicionadas entre uma mesa de concreto superior e uma inferior, mas por ser de difícil construção, não é muito utilizada nos dias atuais.

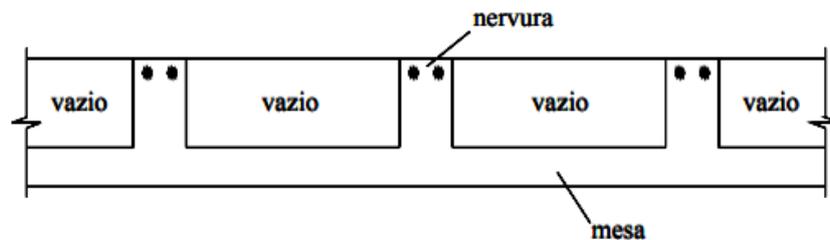
FIGURA 29 – DETALHAMENTO DA LAJE NERVURADA



Fonte: Carlos Bocchi (1995)

Na laje invertida, as nervuras ficam posicionadas na parte superior da laje, considerando uma seção transversal. Esse tipo é restrito para lajes em balanço por resistir a momentos fletores negativos. Da mesma maneira da laje dupla, está praticamente em desuso pela complexidade de montagem.

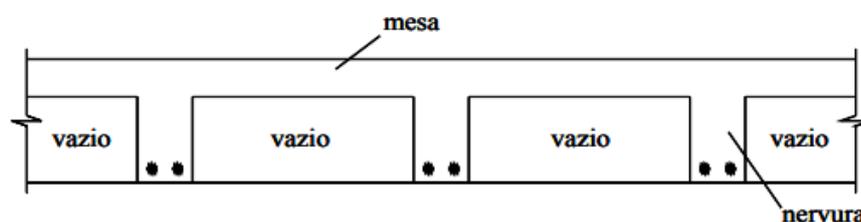
FIGURA 30 – DETALHAMENTO DA LAJE NERVURADA



Fonte: Carlos Bocchi (1995)

A laje direta ou normal já apresenta um modelo mais comum de construção, com as nervuras posicionadas na parte inferior da seção transversal da laje, formando assim uma mesa superior de concreto.

FIGURA 31 – DETALHAMENTO DA LAJE NERVURADA



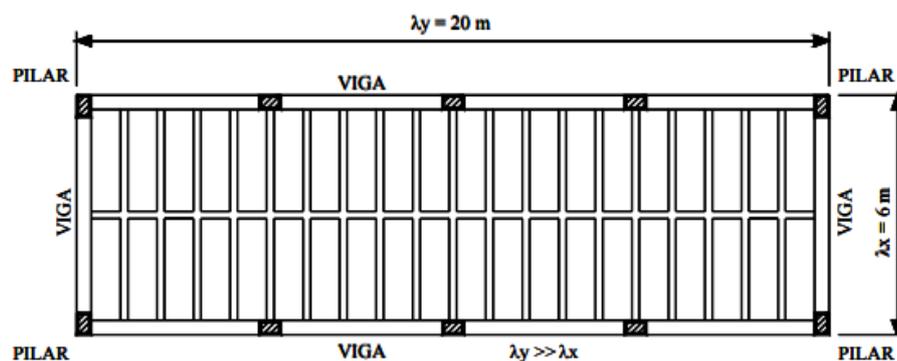
Fonte: Carlos Bocchi (1995)

5.3.2.2. Relativo à direção da armação

Considerando a posição em planta das armações, as lajes nervuradas são divididas em dois tipos: unidirecionais (armadas em uma direção) ou bidirecionais (armadas em duas direções).

As lajes unidirecionais possuem a armação normalmente disposta na direção do menor vão teórico e pode-se admitir que atuam como vigas simplesmente apoiadas de maneira independente, para efeito de cálculo, adotando uma seção transversal em forma de T ou retangular. Segundo Silva (2005), essas devem ser utilizadas quando a relação entre a dimensão do maior e menor vão teórico é superior a dois.

FIGURA 32 - LAJE UNIDIRECIONAL

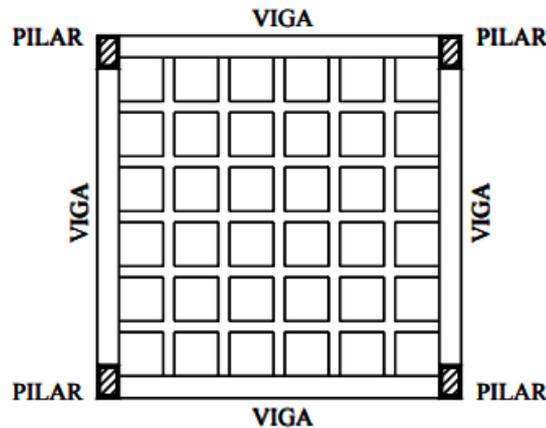


Fonte: Marcos Silva (2005)

As lajes bidirecionais, por sua vez, possuem armação nas duas direções e devem ser usadas quando a relação entre os vãos teóricos não for superior a dois. Essa maneira de construção gera uma diminuição dos esforços solicitantes e deformações transversais.

Segundo Rocha (1975) existe ainda a possibilidade de se utilizar nervuras enviesadas em lajes bidirecionais, porém as vantagens estruturais possíveis não compensam as dificuldades de construção, ficando assim praticamente restrito a casos onde as nervuras ficariam aparentes por necessidades arquitetônicas.

FIGURA 33 – LAJE BIDIRECIONAL



Fonte: Marcos Silva (2005)

5.3.3. Histórico no Brasil

No início do século XX surgiu a ideia de uma laje com menos concreto na zona de tração, distribuindo a tração em sua maioria para o aço. Essa hipótese fora compartilhada por diversos estudos, até que nos anos 80, um inglês chamado Alan Cox, criou a ideia de uma fôrma com formato anatômico que retirasse esse concreto excedente.

Durante suas tentativas de se comercializar esse novo método executivo, em conjunto com portugueses pioneiros neste assunto, trouxeram a ideia da fôrma para o Brasil, com a criação de uma das maiores empresas do ramo atualmente chamada de Atex, em 1991, sendo pioneira deste elemento aperfeiçoado com sistema próprio para trazer produtividade, segurança e economia para a construção civil (TERRA, 2021).

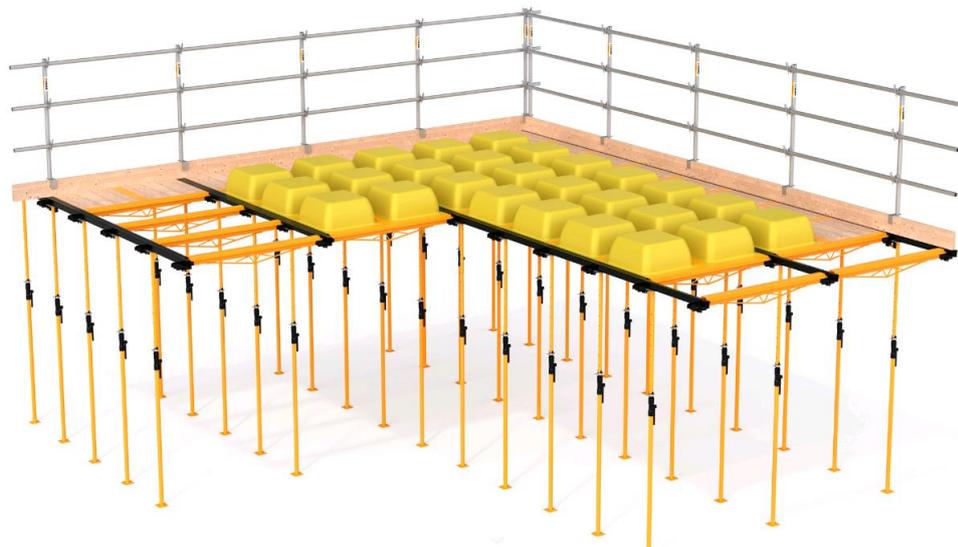
Desde então o processo executivo tem se aprimorado cada vez mais para se adequar às necessidades da sociedade, sem perder sua essência de economia do consumo de concreto. Com isso podemos observar lajes nervuradas em academias, museus, bibliotecas, escritórios e até em residências.

5.3.4. Cenário atual

De acordo com Spohr (2008), nos dias de hoje possuímos concretos e aços com maiores resistências, em decorrência da evolução dos materiais. As empresas têm dado mais prioridade à eficiência e produtividade para equilibrar e manter as lajes nervuradas como um método construtivo competitivo no mercado.

Vinculado com essas vantagens, atualmente, observamos a utilização de programas para o cálculo de grelhas na determinação dos esforços solicitantes e deslocamentos das lajes, algo que já fora de enorme dificuldade para os engenheiros de estrutura calcularem e desenvolverem (BOCCHI JR;1995).

FIGURA 34 – MODELO DE FÔRMAS DE PLÁSTICO REUTILIZÁVEIS COM ESCORAMENTO NUM ÚNICO EQUIPAMENTO



Fonte: Ulma Construction (2018)

5.3.5. Cases famosos

5.3.5.1. MASP

Em 1917, a arquiteta Lina Bo Bardi elaborou o projeto arquitetônico do MASP, com suas obras iniciadas em 1960 e finalizadas em 1968 (com algumas adaptações até 1996). Teve como o maior desafio a modernização da arquitetura na América

Latina, trazendo grandes repertórios para longe dos escalões de “primeiro mundo” da época.

Com o crescimento econômico e populacional no final do século XIX, até a localização onde a obra seria executada fora bem estudada pelos envolvidos, visto que até os dias de hoje a Av. Paulista é tida como referência e ponto turístico.

Dentre um conjunto de diversas formas executivas sobre influências européias na estrutura do MASP, podemos citar a laje nervurada observada no 2º pavimento do edifício, que é engastada às vigas intermediárias e suspensa por tirantes (CÁRDENAS, 2015).

FIGURA 35 – LAJE NERVURADA APARENTE EM SETOR EXPOSITOR DO MUSEU MASP



Fonte: Viva Decora (2017)

5.3.6. Vantagens e desvantagens

Segundo (SILVA, 2005; SPOHR, 2008), as principais vantagens e desvantagens das lajes nervuradas são:

5.3.6.1. *Vantagens*

- Permite vencer grandes vãos com deslocamentos transversais menores. Com isso, libera-se espaços valiosos do empreendimento, o que é vantajoso em locais como garagens, para manobras dos veículos e áreas de vagas de automóveis;
- Pilares podem ser distribuídos de acordo com sua necessidade de projeto arquitetônico, sem necessidade de alinhamento;
- A posição das paredes não fica dependente das vigas estruturais, proporcionando mais liberdade de criação;
- Maior facilidade de execução, visto que as vigas já estão embutidas junto às lajes, agilizando a forma e desforma da estrutura;
- Podem ser utilizados apenas acabamentos superficiais sob a laje para contribuir com conforto acústico ao ambiente.

5.3.6.2. *Desvantagens*

- Aumento da altura útil da laje por conta das nervuras;
- Necessidade de mão de obra especializada para execução, exigindo maiores cuidados específicos nas nervuras e na fixação dos elementos de enchimento;
- Necessita de mais operações de montagem do que uma estrutura convencional;
- A economia de materiais é diretamente proporcional ao manuseio das fôrmas que deverão ser reaproveitadas, possuem grande risco de perda precoce durante a execução dos serviços pela sua baixa resistência à tráfego sobre sua superfície.

6 MÉTODOS DE CÁLCULOS

6.1. Concreto armado

Todo o método de cálculo referente ao concreto armado convencional foi baseado na bibliografia do Prof. Dr. Paulo Sérgio Bastos, que segue as prescrições atuais contidas na NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – procedimento).

Para dimensionamento do método, utilizaremos das seguintes etapas:

6.1.1. Classificação quanto a direção da armadura

Uma classificação importante que deve ser feita para as lajes maciças é quanto a direção da armação, utilizando a seguinte fórmula:

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

Onde:

l_x = vão menor

l_y = vão maior

No caso de $\lambda > 2$, considera-se laje armada somente na direção do menor vão, já que é onde os esforços solicitantes de maior magnitude ocorrem.

No caso de $\lambda \leq 2$ ou $\lambda = 2$, considera-se laje armada em duas direções (em cruz), assim como é o caso do projeto estudado, onde $\lambda = 1,64$.

6.1.2. Vão efetivo

Os vãos efetivos das lajes, em todas as direções, devem ser calculados pela seguinte expressão:

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2$$

Sendo:

$$a_1 \leq \left\{ \frac{t_1}{2}, 0,3h \right.$$

$$a_2 \leq \left\{ \frac{t_2}{2}, 0,3h \right.$$

Onde:

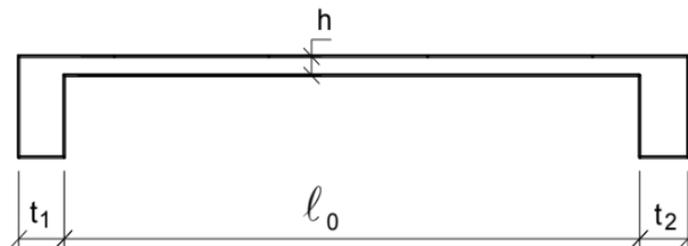
l_0 = largura da laje, desconsiderando os apoios.

t_1 = largura do apoio 1

t_2 = largura do apoio 2

h = espessura da laje

FIGURA 36 – DIMENSÕES CONSIDERADAS NO CÁLCULO DO VÃO EFETIVO DAS LAJES



Fonte: Bastos (2021)

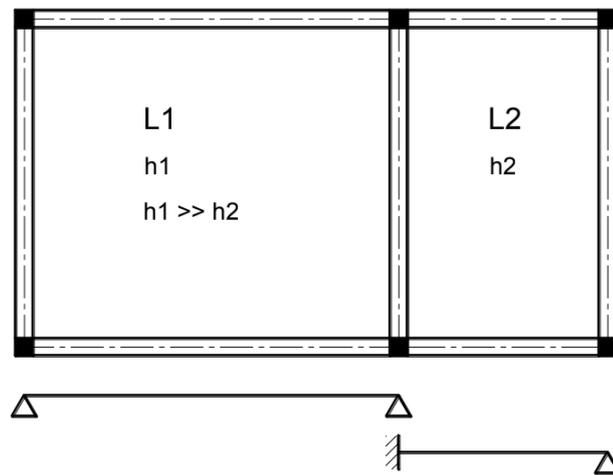
6.1.3. Vinculação nas bordas

Para cálculo dos esforços e deformações na laje, faz-se necessário identificar o tipo de vínculo da laje com os apoios, sendo eles: apoio simples, engaste perfeito e engaste elástico, mas usualmente só são considerados os dois primeiros tipos no dimensionamento.

Na ligação de lajes com vigas de alta rigidez à torção deve-se tomar um cuidado especial, sendo mais adequado o engaste, dispondo de uma armadura negativa entre os elementos.

No caso de duas lajes com espessuras muito diferentes, pode-se considerar a de menor espessura engastada na de maior, mas a laje de maior espessura considerada somente apoiada.

FIGURA 37 – LAJES ADJACENTES COM ESPESSURAS MUITO DIFERENTES



Fonte: Bastos (2021)

No caso de não haver continuidade em toda a extensão da laje, a equação para verificar a vinculação é a seguinte:

$$a \geq \frac{2}{3}L \rightarrow \text{considerar laje L1 engastada em L2}$$

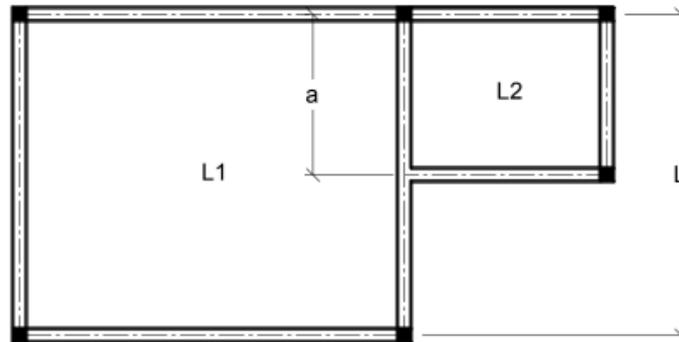
$$a < \frac{2}{3}L \rightarrow \text{considerar laje L1 simplesmente apoiada em L2}$$

Sendo:

a = comprimento da menor laje na borda comum

L = comprimento total da borda comum

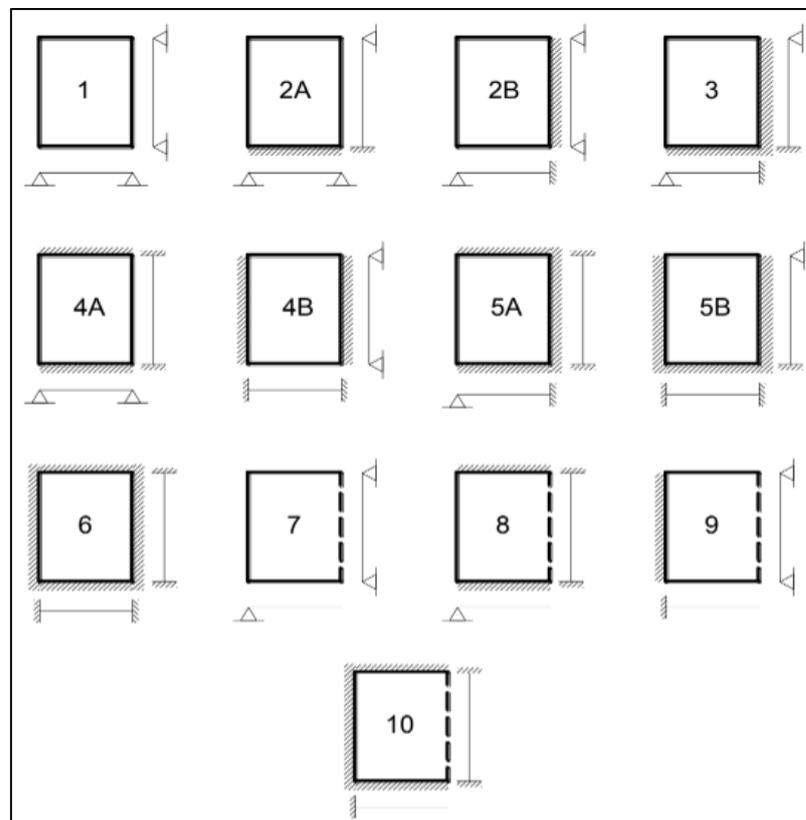
FIGURA 38 – LAJES PARCIALMENTE CONTÍNUAS



Fonte: Bastos (2021)

Em função das várias combinações possíveis de vinculação, as lajes retangulares recebem numeração, de modo a diferenciar os vínculos.

FIGURA 39 – NUMERAÇÃO DAS LAJES EM FUNÇÃO DOS VÍNCULOS NAS BORDAS, DE ACORDO COM AS TABELAS DE BARÉS



Fonte: Bastos (2021)

Nota-se que o tipo da laje “1” se assemelha com a situação real estudada, sendo assim, adota-se a premissa de que se trata de uma laje simplesmente apoiada, sem nenhum tipo de engaste em ambas direções.

6.1.4. Carregamentos

Deve-se considerar diversos tipos de carregamentos para o dimensionamento, desde paredes, peso próprio da laje, revestimentos e até ações e equipamentos móveis. Geralmente as cargas a serem consideradas são as permanentes (g) e variáveis (q).

6.1.4.1. Carregamentos permanentes

São aquelas que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida útil da construção. Pode-se considerar, por exemplo, o peso próprio da laje, contrapiso, revestimento inferior, piso e paredes.

O projeto utiliza os seguintes valores de ações permanentes:

- Peso próprio: $12,75 \text{ kN/m}^2$
- Revestimentos: $1,00 \text{ kN/m}^2$
- Alvenaria: $13,00 \text{ kN/m}^2$

6.1.4.2 Carregamentos variáveis

São aquelas que são constituídas a partir do uso específico da edificação, pela ação do vento ou da água, verificadas caso a caso conforme as particularidades do projeto e sempre respeitando valores característicos nominais mínimos indicados na NBR 6120 (Cargas para cálculo de estruturas de edificações).

A tabela 1 abaixo, retirada da norma NBR 6120, apresenta alguns valores a serem acrescentados no projeto em função do uso da edificação:

TABELA 1 – VALORES CARACTERÍSTICOS NOMINAIS DAS CARGAS VARIÁVEIS

Local		Carga uniformemente distribuída (kN/m ²)
Balcões, sacadas, varandas e terraços ^{i),j)}	Residencial	2,5
	Comercial, corporativos e escritórios	3
	Com acesso público (hotéis, hospitais, escolas, teatros, etc.)	4
Edifícios residenciais	Dormitórios	1,5
	Sala, copa, cozinha	1,5
	Sanitários	1,5
	Despensa, área de serviço e lavanderia	2
	Quadras esportivas	5 ^{a)}
	Salão de festas, salão de jogos	3 ^{a)}
	Áreas de uso comum	3 ^{a)}
	Academia	3 ^{a)}
	Forro acessíveis apenas para manutenção e sem estoque de materiais	0,1 ^{a),r)}
	Sótão	2 ^{a)}
	Corredores dentro de unidades autônomas	1,5
	Corredores de uso comum	3
	Depósitos	3
	Áreas técnicas (ver item nesta Tabela)	
Jardins (ver item nesta Tabela)		
<p>a) "Redução de cargas variáveis não permitida.</p> <p>i) Conforme o caso, deve-se prever cargas adicionais devido a mudanças futuras, por exemplo: fechamento com vidro, nivelamento do piso, mudança de uso etc.</p> <p>j) Nas bordas de balcões, varandas, sacadas e terraços com guarda-corpo, prever carga variável de 2 kN/m, além do peso próprio do guarda-corpo. Considerar também forças horizontais variáveis conforme 6.3.</p> <p>r) Para forros inacessíveis e sem possibilidade de estoque de materiais, não é necessário considerar cargas variáveis devido ao uso."</p>		

Fonte: Bastos (2021) e Tabela 10 - NBR 6120 (2019)

A sobrecarga útil referente a salas comerciais, utilizado no cálculo é de: $2,00 \text{ kN/m}^2$.

Essas cargas devem ser consideradas como quase-estáticas. No caso de ações com efeito de ressonância ou algum dinamismo significativo, devem ser levados em consideração fatores dinâmicos e análise específica.

6.1.5. Espessura mínima

Uma espessura mínima de lajes maciças deve ser respeitada, de acordo com a NBR 6118.

- 7,00 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- 8,00 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10,00 cm para lajes em balanço;
- 10,00 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- 12,00 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- 15,00 cm para lajes com protensão apoiada em vigas, com o mínimo de $l/42$ para lajes de piso biapoiadas e $l/50$ para lajes de piso contínuas;

g) 16,00 cm para lajes lisas e 14,00 cm para lajes cogumelos fora do capitel.

Considera-se uma espessura mínima da laje estudada de 8,00 cm, já que se trata de um piso não em balanço.

6.1.6. Cobrimento

Um cobrimento mínimo de concreto em relação a armação das peças também deve ser respeitado, primeiramente avaliando a Classe de Agressividade Ambiental para qual o elemento está inserido.

Essa classe pode ser verificada na tabela 6.1 da NBR 6118 e está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre a estrutura, sem considerar ações mecânicas e volumétricas.

TABELA 2 – CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL (CAA)

Classe de agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de Projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1,2}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹	Grande
		Industrial ^{1,2}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1,3}	Elevado
		Respingos de maré	

Notas: 1) *Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).*
 2) *Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.*
 3) *Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.*

Fonte: Bastos (2021) e Tabela 6.1 – NBR 6118 (2014)

6.1.7. Altura da laje

Para o projeto de uma laje é necessário estimar sua altura inicial e para isso vários procedimentos são possíveis. Nesse caso, será utilizado um método em

função da altura útil (d), definida como a distância entre o centro de gravidade da armadura e a face da sessão.

A altura d pode ser determinada com a seguinte equação:

$$d = (2,5 - 0,1n)l^*$$

Sendo:

d = Altura útil da laje (cm)

n = Número de bordas engastadas na laje

l^* = Dimensão da laje em metro, sendo:

$$l = \leq \{l_x, 0,7 l_y\}$$

Conhecendo a altura útil (d), pode-se estimar a altura da laje

$$h = d + \frac{\phi_l}{2} + c$$

Sendo:

h = Altura da laje (cm)

d = Altura útil da laje (cm)

c = Cobrimento

ϕ_l = Diâmetro da barra longitudinal, podendo ser estimada como 1 cm para início de cálculo.

Deve-se levar em consideração também que o valor da altura útil deve atender as verificações de flechas mínimas da laje, conforme será mostrado adiante nos próximos passos do dimensionamento. Utilizaremos uma altura útil mínima de 51,00 cm para que as tais verificações sejam devidamente atendidas.

6.1.8. Momentos fletores solicitantes

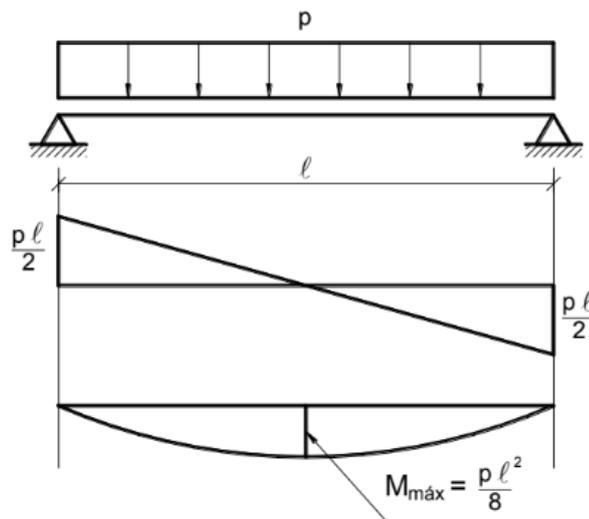
6.1.8.1. Laje armada em uma direção

Para lajes armadas em uma direção, considera-se de maneira simplificada que a laje será suposta como uma viga com largura constante de 1 metro, segundo a principal direção da laje. Na outra direção, os momentos são desprezados.

Sendo assim, existem alguns casos possíveis de vinculação considerando apoios simples e engastes perfeitos, conforme imagens abaixo.

Laje sobre apoios simples e carregamentos uniformes:

FIGURA 40 – LAJE ARMADA EM UMA DIREÇÃO SOBRE APOIOS SIMPLES E COM CARREGAMENTO UNIFORME

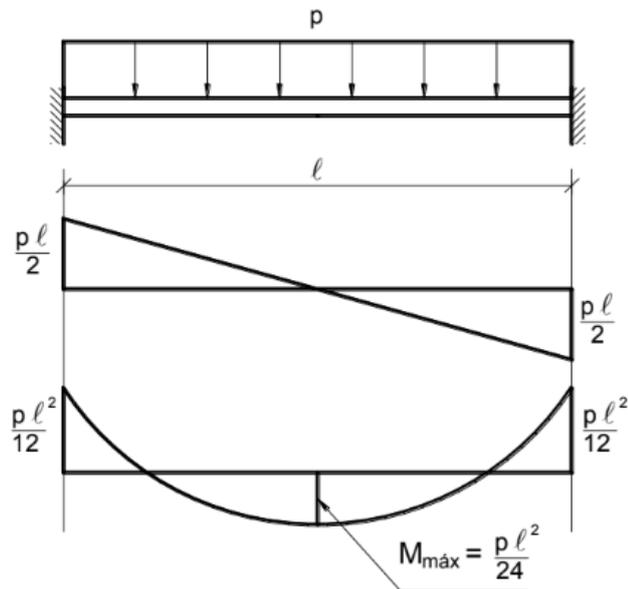


Fonte: Bastos (2021)

$$M_{max} = \frac{pl^2}{8}$$

Laje sobre apoio simples e engaste com carregamentos uniformes:

FIGURA 41 – LAJE ARMADA EM UMA DIREÇÃO BIENGASTADA COM CARREGAMENTO UNIFORME

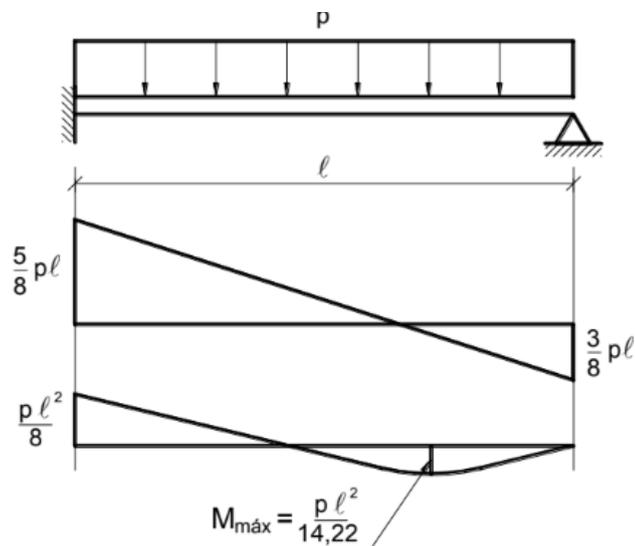


Fontes: Bastos (2021)

$$M_{\text{max}} = \frac{p\ell^2}{24}$$

Laje bi engastada com carregamentos uniformes:

FIGURA 42 – LAJE ARMADA EM UMA DIREÇÃO SOBRE APOIO SIMPLES E ENGASTE PERFEITO COM CARREGAMENTO UNIFORME



Fonte: Bastos (2021)

$$M_{max} = \frac{pl^2}{14,22}$$

Sendo:

M_{max} = Momento fletor máximo (kN.m/m)

p = Carregamento total (kN.m)

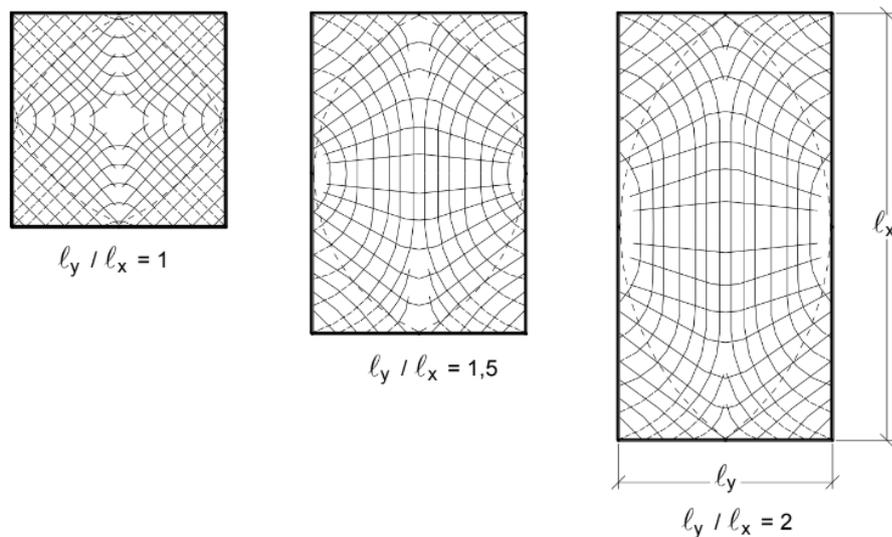
l = Comprimento da laje (m)

6.1.8.2. Laje armada em duas direções

Os momentos em lajes armadas em duas direções possuem um grau de complexidade um pouco maior, já que nesse caso surgem momentos negativos se a mesma estiver ligada a vigas de concreto ou existirem pilares nas extremidades.

Os momentos principais podem ser observados na imagem a seguir:

FIGURA 43 – DIREÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES PRINCIPAIS EM LAJES ARMADAS EM DUAS DIREÇÕES SOB BORDAS SIMPLES



Fonte: Leonhardt, Monnig (1982)

Os esforços solicitantes e momentos fletores podem ser determinados por algumas teorias distintas, como por exemplo:

- Teoria das placas;
- Processos aproximados;
- Método das linhas de ruptura ou das charneiras plásticas;
- Métodos numéricos.

No caso, será utilizado como exemplo a Teoria das Placas, que foi desenvolvida com base na teoria da Elasticidade, onde a equação geral obtida por Lagrange em 1811 relaciona a deformação elástica com a carga unitária atuante, uniformemente distribuída.

A solução da equação geral é extremamente complexa, por esse motivo, simplificações foram feitas e também são utilizadas diversas tabelas de diferentes autores com coeficientes que proporcionam o cálculo dos momentos fletores. Serão utilizadas nesse trabalho as tabelas desenvolvidas por Barés e adaptadas por Pinheiro em 1994. Tabelas essas apresentadas no Anexo A.

Conforme as simplificações e tabelas, os momentos negativos e positivos são calculados pela seguinte expressão:

$$M = \mu \frac{pl_x^2}{100}$$

Onde:

M = Momento fletor (kN.m/m);

μ = Coeficiente tabelado, de acordo com cada tipo de laje e em função de $\lambda = \frac{l_y}{l_x}$;

p = Valor da carga atuante na laje (kN/m²);

l_x = Menor vão da laje (m).

$$M = 324,41 \left(kN \cdot \frac{m}{m} \right)$$

6.1.9. Flechas

A deformação real de uma estrutura depende muito do processo construtivo e das propriedades dos materiais utilizados. Dessa maneira, a verificação das flechas nas vigas e lajes é feita de maneira aproximada.

De início, é calculado o valor da flecha imediata, que ocorre assim que o carregamento é aplicado na peça, sem levar em consideração os efeitos da fluência. Após, tem-se o valor da flecha diferida no tempo, que é aquela que leva em conta o carregamento na estrutura ao longo do tempo, causando uma deformação lenta.

As flechas máximas ou deslocamentos limites, como é definido pela NBR 6118 “são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado-limite de deformações excessivas da estrutura” e esses valores são importantes para as verificações de aceitabilidade na estrutura. Os deslocamentos limites são classificados em 4 grupos distintos conforme definições da NBR 6118, sendo:

- a. “Aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. A limitação da flecha para prevenir essas vibrações, em situações especiais de utilização, deve ser realizada como estabelecido na Seção 23;
- b. Efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;
- c. Efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados;
- d. Efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo estrutural adotado”.

Os valores limites podem ser verificados na tabela a seguir:

TABELA 3 – VALORES LIMITES DE DESLOCAMENTOS

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentadas no piso	Devido a cargas variáveis	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^{1)}$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contraflecha}^{2)}$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500^{3)}$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^{4)}$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^{5)}$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($w_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H_2/850^{6)}$ entre pavimentos ⁶⁾
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400^{7)}$ e 15 mm
	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H_2/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$l/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$l/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

¹⁾ As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.
²⁾ Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $l/350$.
³⁾ O vão l deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.
⁴⁾ Rotação nos elementos que suportam paredes.
⁵⁾ H é a altura total do edifício e H_2 o desnível entre dois pavimentos vizinhos.
⁶⁾ Este limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica para o deslocamento vertical relativo das extremidades de lanteis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_2 representa o comprimento do lintel.
⁷⁾ O valor l refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

NOTAS:
a) Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão l suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço;
b) Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor l é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor;
c) O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11;
d) Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

Fonte: Bastos (2021) e Tabela 13.3 – NBR 6118 (2014)

A flecha imediata pode ser calculada pela seguinte equação, com auxílio dos coeficientes constantes da tabela A1 anexa.

$$a_i = \frac{ab}{1200} \frac{pl_x^2}{EI}$$

Onde:

a_i = flecha imediata;

p = valor do carregamento na laje considerando a combinação quase permanente;

l_x = menor vão;

b = largura unitária da laje;

α = coeficiente tabelado em função de λ ou γ ;

EI = rigidez da laje à flexão:

Flecha imediata calculada para a laje de estudo: $a_i = 0,0123 \text{ m}$

6.1.10. Flexão / Área de aço

O dimensionamento à flexão pode ser feito conhecendo os momentos fletores máximos e supondo faixas com largura de 1 metro (100 cm). Fazendo uso de equações com coeficientes K tabelados, primeiramente encontramos o valor de K_c .

$$K_c = \frac{100 d^2}{M_d}$$

Onde:

M_d = Momento fletor máximo (kN.cm);

d = Espessura da laje (cm).

Para a direção x temos: $K_{cx} = 5,727$

Para a direção y temos: $K_{cy} = 13,300$

Com o Anexo B, determinam-se os coeficientes β_x e K_s e o domínio em que a laje se encontra. Com $\beta_x = \frac{x}{d}$ é determinada a posição x da linha neutra, de modo a verificar os valores limites para a relação x/d . Atendidos os valores limites a área de aço é calculada pela seguinte expressão:

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d}$$

No anexo C, encontram-se os diâmetros e os espaçamentos das barras para uma dada área de armadura em cm^2/m .

Para a direção x temos: $A_s = 21,38 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{m}}\right)$

Considerando: Barras com $\varnothing = 16,00$ mm e espaçamento de 9,00 cm entre as barras.

Para a direção y temos: $A_s = 8,82 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{m}}\right)$

Considerando: Barras com $\varnothing = 12,50$ mm e espaçamento de 13,00 cm entre as barras.

6.1.11. Verificações

Após a determinação da área de aço para armadura, algumas verificações devem ser feitas, afim de seguir as normas impostas pela NBR 6118.

6.1.11.1. Armadura máxima

A NBR 6118 diz que *“A soma das armaduras de tração e de compressão ($A_s + A'_s$) não pode ter valor maior que 4% A_c , calculada na região fora da zona de emendas, devendo ser garantidas as condições de ductilidade requeridas em 14.6.4.3.”*

Portanto:

$$A_s + A'_s = 4\% A_c$$

O projeto atende à verificação, tendo como área de aço $A_s + A'_s = 30,20 \text{ cm}^2$, respeitando o limite de $A_s = 167,87 \text{ cm}^2$.

6.1.11.2. Armadura mínima

“Para melhorar o desempenho e a ductilidade à flexão, assim como controlar a fissuração, são necessários valores mínimos de armadura passiva [...]. Alternativamente, estes valores mínimos podem ser calculados com base no

momento mínimo, conforme 17.3.5.2.1. Essa armadura deve ser constituída preferencialmente por barras com alta aderência ou por telas soldadas. ” (NBR 6118, 19.3.3.2).

TABELA 4 – VALORES MÍNIMOS PARA ARMADURAS PASSIVAS ADERENTES

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$ (ver 19.3.3.2)
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$		–
onde $\rho_s = A_s/b_w h$ e $\rho_p = A_p/b_w h$.			
NOTA Os valores de ρ_{\min} são definidos em 17.3.5.2.1.			

Fonte: Bastos (2021) e Tabela 19.1– NBR 6118 (2014)

TABELA 5 – TAXAS MÍNIMAS DE ARMADURA DE FLEXÃO PARA VIGAS E LAJES

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

Fonte: Bastos (2021) e Tabela 17.3 – NBR 6118 (2014)

6.1.11.3. Diâmetro máximo

“Qualquer barra da armadura de flexão deve ter diâmetro no máximo igual a $h/8$ ”. (NBR 6118, 20.1).

Sendo: $\frac{h}{8} = 52,46 \text{ mm}$, todas as armaduras utilizadas se enquadram no limite.

6.1.11.4. Espaçamentos máximos e mínimos

“As barras da armadura principal de flexão devem apresentar espaçamento no máximo igual a $2h$ ou 20 cm , prevalecendo o menor desses dois valores na região dos maiores momentos fletores.” (NBR 6118.20.1).

A norma não especifica um espaçamento mínimo, mas deve-se considerar também que o espaçamento deve ser aquele que não dificulte a disposição e amarração das barras da armadura, o completo preenchimento da peça pelo concreto e o envolvimento das barras pelo concreto. De modo geral, na prática adotam-se espaçamentos entre barras superiores a $7,00$ ou $8,00 \text{ cm}$.

Os espaçamentos utilizados no projeto são respectivamente $9,00 \text{ cm}$ e $13,00 \text{ cm}$ e atende aos requisitos exigidos.

6.2. Concreto protendido

O dimensionamento da laje protendida que será usada como comparativo de custo seguirá os padrões e critérios definidos na Norma NBR 6118:2014, o passo a passo dos cálculos será seguida conforme o Emerick (2005) e a representação da laje será apresentada no software “TQS”.

6.2.1. Critérios utilizados: Pré-dimensionamento

A realização do dimensionamento da laje lisa protendida aderente acontece quando conseguimos estabelecer critérios relacionados com a utilização da edificação e o ambiente onde ela será implantada, para assim conseguirmos definir elementos importantes para seu dimensionamento.

6.2.1.1. Classe de agressividade

De acordo com as premissas adotadas anteriormente, o projeto será dimensionado para um ambiente urbano, portanto a estrutura deve atender e suportar as agressividades que esse tipo de local pode causar. A tabela 6 da NBR 6118:2014 (indicada na tabela 2 deste documento), define a classe de agressividade para cada ambiente.

A estrutura estudo desse projeto está classificada como classe II (moderada), portanto o risco de deterioração da estrutura é pequeno.

Após a definição da classe de agressividade do projeto, pode-se definir o tipo de protensão que será utilizada, servindo de parâmetro para a verificação do estado-limite de serviço. A tabela 13.4 da NBR 6118:2014 relaciona o tipo de concreto utilizado com a classe de agressividade, para assim conseguir definir exigências relativas à fissuração e combinação de ações em serviço a utilizar.

TABELA 6 – EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE RELACIONADAS À FISSURAÇÃO E À PROTEÇÃO DA ARMADURA, EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	--
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação freqüente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação freqüente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação freqüente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	ELS-D ¹⁾	Combinação quase permanente
		Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ¹⁾	Combinação freqüente
¹⁾ A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 25$ mm (figura 3.1). NOTAS 1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2. 2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.			

Fonte: Tabela 13.4 – NBR 6118 (2014)

Pode-se concluir de acordo com a Tabela 13.4 da NBR 6118:2014 que todos os concretos estruturais protendidos que foram definidos como classe de agressividade II são de protensão do tipo pós-tração com nível 1 (protensão parcial).

6.2.1.2. Qualidade do concreto e cobrimento da armadura

A classe de concreto empregado no projeto é definida pela tabela 7.1 da NBR 6118:2014, onde relaciona a classe de agressividade com o tipo de concreto utilizado. Com isso, consegue-se definir que o concreto protendido que tem a classe de agressividade do tipo II, deverá atingir uma resistência ≥ 30 MPa e ter uma relação de água/cimento em massa $\geq 0,55$.

TABELA 7 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE E QUALIDADE DO CONCRETO

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
NOTAS					
1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.					
2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.					
3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: Tabela 7.1 – NBR 6118 (2014)

Afim de garantir o cobrimento necessário para as armaduras, para evitar e proporcionar sua proteção contra agravantes externos que podem causar corrosão ao aço, usamos a tabela 7.2 da NBR 6118:2014, onde relaciona a classe de agressividade ambiental com o cobrimento nominal das armaduras (c_{nom}) e o cobrimento mínimo (c_{min}) acrescido de uma tolerância de execução (Δc) de 10mm.

Para elementos em concreto protendido, conforme prescrição fornecida na tabela, considera-se que a armadura passiva utilizada no elemento estrutural segue os mesmos cobrimentos respectivos ao concreto armado.

TABELA 8 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE A CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL E O COBRIMENTO NOMINAL PARA $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: Tabela 7.2 – NBR 6118 (2014)

Portanto, como definido acima o projeto será executado em uma área urbana, será realizado a construção de uma laje protendida e com isso define-se que o elemento estrutural a ser dimensionado deve cumprir o cobrimento nominal de 30mm para a armadura ativa de protensão e de 25mm para a armadura passiva.

6.2.1.3. Resistência à tração

A introdução da protensão na laje de concreto a ser dimensionada faz com que seja necessário o cálculo para determinar a resistência à tração do concreto. A NBR 6118:2014 no item 8.2.5 define que para concretos de classes até C50 a resistência média a tração ($f_{ct, m}$) é obtida pela equação:

$$f_{ct,m} = 0,3 * f_{ck} \frac{2}{3} \text{ MPa}$$

Com o valor de ($f_{ct, m}$) pode-se definir a resistência à tração característica inferior ($f_{ctk, inf}$) e superior ($f_{ctk, sup}$), calculadas pelas equações:

$$f_{ctk, inf} = 0,7 * f_{ct, m} \quad e \quad f_{ctk, sup} = 1,3 * f_{ct, m}$$

Para o concreto da classe C30 que será utilizado na execução da laje, com f_{ck} de 30 MPa, temos:

$$f_{ct, m} = 0,30.30^{2/3}$$

$$f_{ct, m} = 2,90 \text{ MPa}$$

Com isso, encontram-se os valores das resistências à tração do concreto, definidos como:

$$f_{ctk, inf} = 0,70. f_{ct, m}$$

$$f_{ctk, inf} = 0,70. 2,90$$

$$f_{ctk, inf} = 2,03 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk, sup} = 1,30. f_{ct, m}$$

$$f_{ctk, sup} = 1,30. 2,90$$

$$f_{ctk, sup} = 3,77 \text{ MPa}$$

6.2.1.4. Módulos de elasticidades

A NBR 6118:2014 na tabela 8.1 define os valores estimados dos módulos de elasticidade em função da resistência característica do concreto, portanto o módulo de elasticidade ou de deformação tangencial do concreto (E_{ci}) e o módulo de deformação secante do concreto (E_{cs}) podem ser definidos com essa relação.

Lembrando que a deformação elástica do concreto depende da composição do traço, especialmente da natureza dos agregados.

TABELA 9 – VALORES ESTIMADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO DO CONCRETO (CONSIDERANDO O USO DE GRANITO COMO AGREGADO GRAÚDO)

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

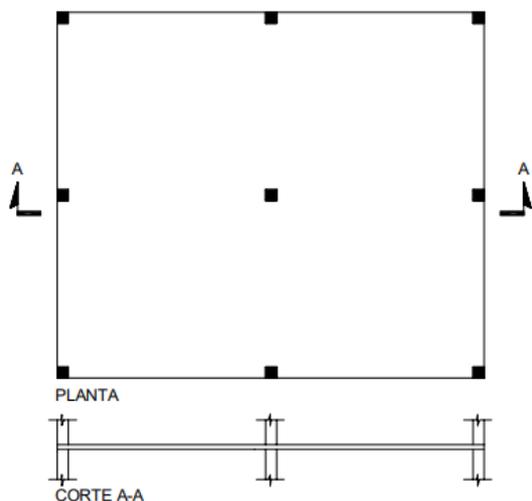
Fonte: Tabela 8.1 – NBR 6118 (2014)

Temos que a laje com o concreto de C30 que será utilizado no projeto terá os valores de $E_{ci} = 31$ GPa e $E_{cs} = 27$ GPa, obtidos na tabela acima.

6.2.2. Esquema estrutural

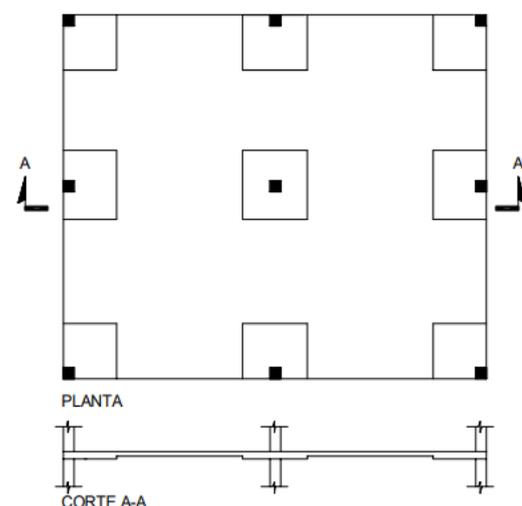
Entre os diversos métodos construtivos citados abaixo, o utilizado no estudo em questão será o de lajes lisas, mostrado na Figura 44, pelo fato de que atualmente é o esquema estrutural mais utilizado no mercado, além das vantagens que esse método apresenta sobre os outros na questão executiva. Deve-se lembrar que cada esquema estrutural terá sua vantagem em relação ao outro dependendo das exigências do projeto.

FIGURA 44 – LAJE LISA



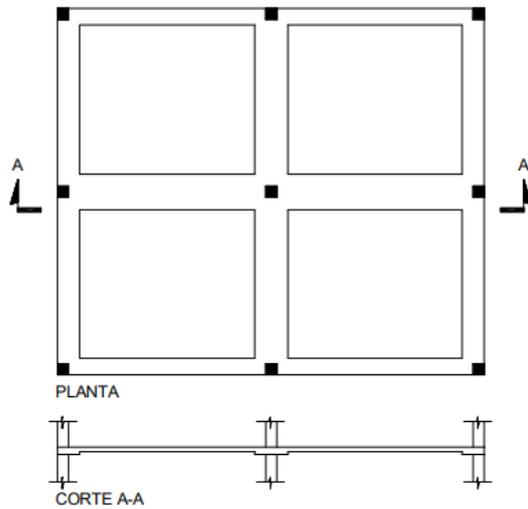
Fonte: Emerick (2005)

FIGURA 45 – LAJE COM ENGROSSAMENTO NA REGIÃO DOS PILARES



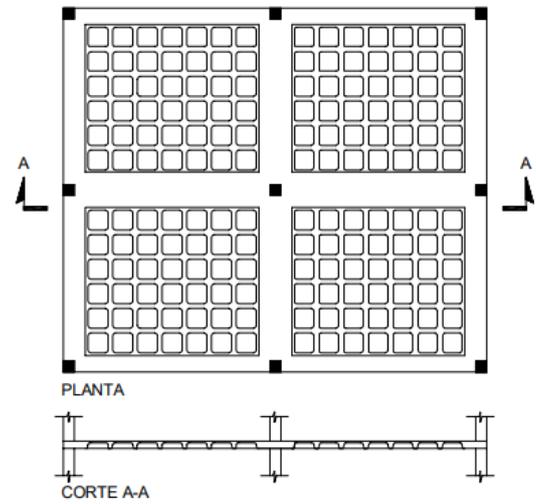
Fonte: Emerick (2005)

FIGURA 46 – LAJE COM VIGAS FAIXA



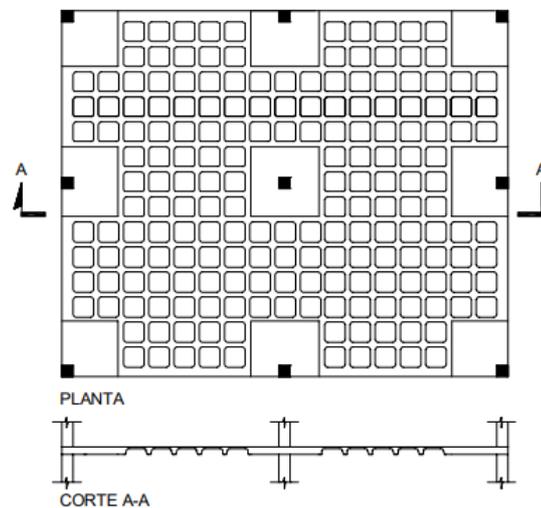
Fonte: Emerick (2005)

FIGURA 47 – LAJE NERVURADA COM FAIXAS PROTENDIDAS



Fonte: Emerick (2005)

FIGURA 48 – LAJE NERVURADA COM ENGROSSAMENTO NA REGIÃO DOS PILARES (CAPITÉIS)



Fonte: Emerick (2005)

6.2.3. Espessura da laje

A espessura de lajes maciças lisas pode ser calculada de acordo com Emerick (2005):

- Lajes com sobrecargas entre 2kN/m² e 3kN/m²: $h \geq \frac{l}{40} \text{ a } \frac{l}{45}$
- Lajes de cobertura: $h \geq \frac{l}{45} \text{ a } \frac{l}{48}$

No caso da laje que será dimensionada nesse projeto, as sobrecargas exigidas pela utilização do edifício em questão é de 2 kN/m² e os cálculos das sobrecargas foram calculados no tópico 6.1.4.2. A laje a ser projetada não é uma laje de cobertura, portanto foi aplicado a fórmula utilizando um espaçamento entre os pilares de 11,94 metros. Com isso;

$$h \geq \begin{cases} \frac{11,94}{40} \\ \frac{11,94}{45} \end{cases}$$

$$h \geq \begin{cases} 0,30 \\ 0,26 \end{cases}$$

Com essa relação pode-se definir uma espessura mínima da laje de 30 centímetros, que está dentro do esperado pela NBR 6118:2014, verificada no tópico 6.1.5.

6.2.4. Critérios iniciais de protensão

6.2.4.1. Aço da armadura ativa

Os valores de resistência característica à tração, diâmetro e área dos fios e das cordoalhas, bem como a classificação quanto à relaxação a serem adotados em projeto, são os nominais indicados na NBR 7482 e na NBR 7483, respectivamente segundo a norma NBR 6118:2014.

Foi realizada uma análise de catálogos técnicos de concreto protendido para a definição de qual cordoalha é a ideal para o dimensionamento. Será seguido o

catálogo da Rudloff Rev. 6 (11/2015), afirmando que as cordoalhas mais utilizadas no sistema de protensão aderente são compostas de sete fios e com diâmetro de 12,7mm ou 15,5mm. São produzidas sempre na condição de relaxação baixa e fabricadas com seis fios de mesmo diâmetro nominal encordoados em torno de um fio central de diâmetro ligeiramente maior que os demais.

Será considerado para o pré-dimensionamento as cordoalhas de 7 fios do tipo CP190 12,7mm fabricadas pela empresa ArcelorMittal.

TABELA 10 – CORDOALHAS NUAS PARA PROTENSÃO

Produto	Diâmetro nominal (mm)	Área aprox. (mm ²)	Massa aprox. (kg/1.000m)	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	171	40	36	3,5
Cord. CP 190 RB 3 X 3,5	7,6	30	238	56	50	3,5
Cord. CP 190 RB 3 X 4,0	8,8	39	304	70	63	3,5
Cord. CP 190 RB 3 X 4,5	9,6	47	366	86	78	3,5
Cord. CP 190 RB 3 X 5,0	11,1	66	520	122	110	3,5
Cordoalha 7 fios CP 190						
Cord. CP 190 RB 9,5	9,5	56	441	102	92	3,5
Cord. CP 190 RB 12,7	12,7	101	792	184	165	3,5
Cord. CP 190 RB 15,20	15,2	143	1126	261	235	3,5
Cord. CP 190 RB 15,70	15,7	150	1180	274	247	3,5
Cord. CP 190 RB 15,20 Entalhada*	15,2	143	1126	261	235	3,5
Cord. CP 190 RB 15,70 Entalhada*	15,7	150	1180	274	247	3,5

Fonte: Catálogo ArcelorMittal (2021)

As características da tabela 10 são fornecidas pela empresa fabricante, por meio de ensaios especificados na norma NBR 7383:2021 – Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação.

6.2.4.2. Força de protensão

Após a determinação da cordoalha ativa a ser usada no projeto, define-se a força de protensão necessária inicial (P_i) que será aplicada. A NBR 6118:2014 recomenda no item 9.6.1.2.1 os valores limites de tensão na operação de protensão em armaduras pós-tracionadas, citados a baixo.

- Por ocasião da aplicação da força P_i , a tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho de tração deve respeitar os limites 0,74 f_{ptk} e 0,87 f_{pyk} para aços da classe de relaxação normal, e 0,74 f_{ptk} e 0,82 f_{pyk} para aços da classe de relaxação baixa;
- Para as cordoalhas engraxadas, com aços da classe de relaxação baixa, os valores-limites da tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho de tração podem ser elevados para 0,80 f_{ptk} e 0,88 f_{pyk} ;
- Nos aços CP-85/105, fornecidos em barras, os limites passam a ser 0,72 f_{ptk} e 0,88 f_{pyk} , respectivamente.

Portanto deve-se respeitar os limites impostos na regra, sendo o menor valor encontrado na relação:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,74 \cdot f_{ptk} \\ 0,82 \cdot f_{pyk} \end{cases}$$

Na qual f_{ptk} é o valor característico da resistência à tração e f_{pyk} é o valor característico da resistência ao escoamento convencional.

A resistência à tração da cordoalha é obtida pela equação:

$$f_{ptk} = \frac{F_{rup}}{A_{cord}}$$

$$f_{ptk} = \frac{184000}{101}$$

$$f_{ptk} = 1821,78 \text{ Mpa}$$

Onde:

- F_{rup} = Carga mínima de ruptura à tração da cordoalha, fornecida pelo catálogo do fabricante;
- A_{cord} = Área da cordoalha.

De forma análoga, a resistência característica ao escoamento convencional é obtida pela equação:

$$f_{pyk} = \frac{F_{1\%def}}{A_{cord}}$$

$$f_{pyk} = \frac{165000}{101}$$

$$f_{pyk} = 1633,66 \text{ MPa}$$

Onde:

- $F_{1\%def}$ = Carga mínima de escoamento da cordoalha à 1% de deformação, fornecida pelo catálogo do fabricante;

Com a obtenção dos valores acima, pode ser feito o cálculo da tensão máxima na saída do aparelho de tração conforme a relação:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,74 \cdot f_{ptk} \\ 0,82 \cdot f_{pyk} \end{cases}$$

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 1348,12 \text{ MPa} \\ 1339,60 \text{ MPa} \end{cases}$$

Dessa forma, a tensão máxima a ser aplicada na cordoalha não pode ultrapassar o valor de 1339,60 MPa. Como tensão é a força aplicada em uma área,

para definir a força de protensão inicial (P_i) que será aplicada em cada uma das cordoalhas, utiliza-se a equação:

$$P_i = \sigma_{pi} \cdot A_{cord}$$

$$P_i = 1339,60 \cdot 101$$

$$P_i = 135,30 \text{ kN}$$

Onde:

- σ_{pi} = Tensão da armadura de protensão na saída do aparelho de tração.

A força a ser aplicada em cada uma das cordoalhas no ato da protensão por meio do equipamento de tracionamento deve ser de 135,30 kN.

6.2.4.3. Resistência do concreto no ato da protensão

Um dos critérios necessários para o dimensionamento é a definição de quando ocorrerá a protensão da estrutura, para assim ser estimada a resistência característica à compressão do concreto aos j dias (f_{ckj}). Tal resistência serve de parâmetro para a verificação do estado-limite último no ato da protensão, bem como nos cálculos das perdas imediatas. Conforme o item 12.3.3 da NBR 6118:2014, quando feita a verificação em data j inferior a 28 dias, utiliza-se a equação abaixo:

$$f_{ck,j} = \beta_1 * f_{ck}$$

Sendo,

- f_{cd} = Resistência de cálculo do concreto;
- γ_c = Coeficiente de ponderação da resistência do concreto;
- β_1 = Relação entre f_{ckj} e f_{ck} dada por $\beta_1 = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$, onde:
 - $s = 0,38$ para concreto de cimento C-III e IV;

- $s = 0,25$ para concreto de cimento CPI e II;
- $s = 0,20$ para concreto de cimento CPV-ARI.
- $t =$ Idade efetiva do concreto, em dias.

Como o projeto busca efetividade em tempo, para assim reduzir custos de mão de obra e não interferir no comparativo de custos final, foi definido um tempo de 3 dias após a concretagem da laje para a realização da protensão. Faz-se necessário estimar o valor da resistência do concreto estrutural para o tempo de 3 dias, que servirá de parâmetro para a verificação do estado-limite último no ato da protensão.

Assim temos:

$$\beta_1 = \exp \left\{ 0,25 \left[1 - \left(\frac{28}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$$

Com isso:

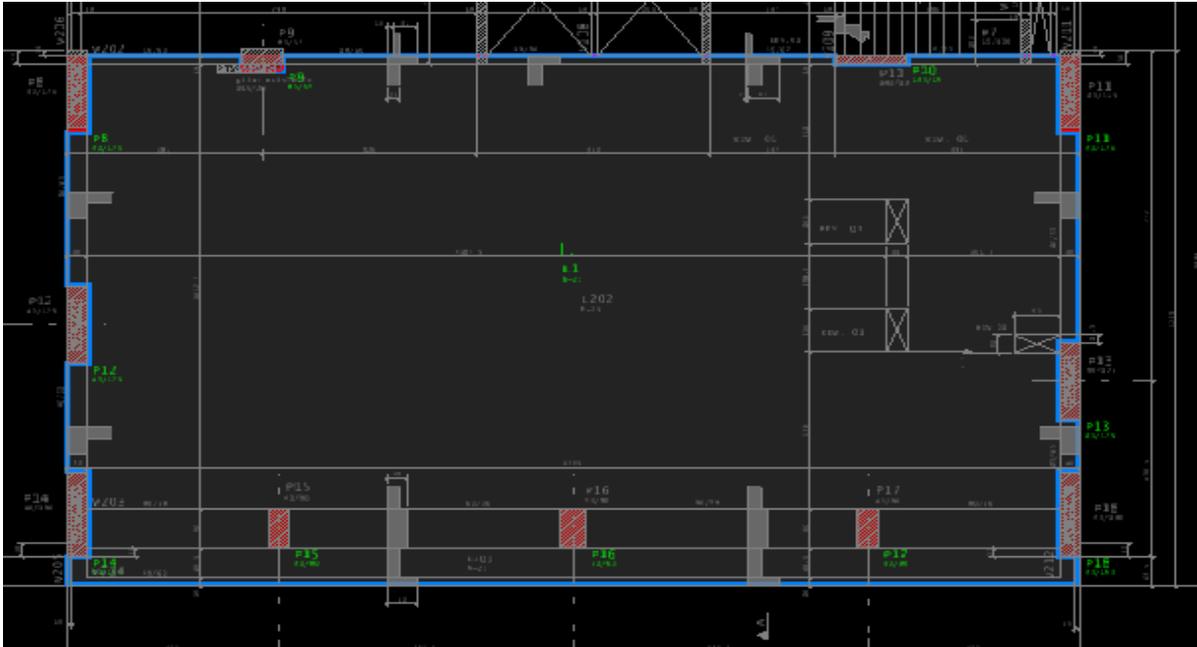
$$f_{ck,j} = 30 * \exp \left\{ 0,25 \left[1 - \left(\frac{28}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$$

$$f_{ck,j} = 17,95 \text{ MPa}$$

6.2.4.4. Modelagem e verificações

Para a modelagem, utilizou-se o programa “TQS”.

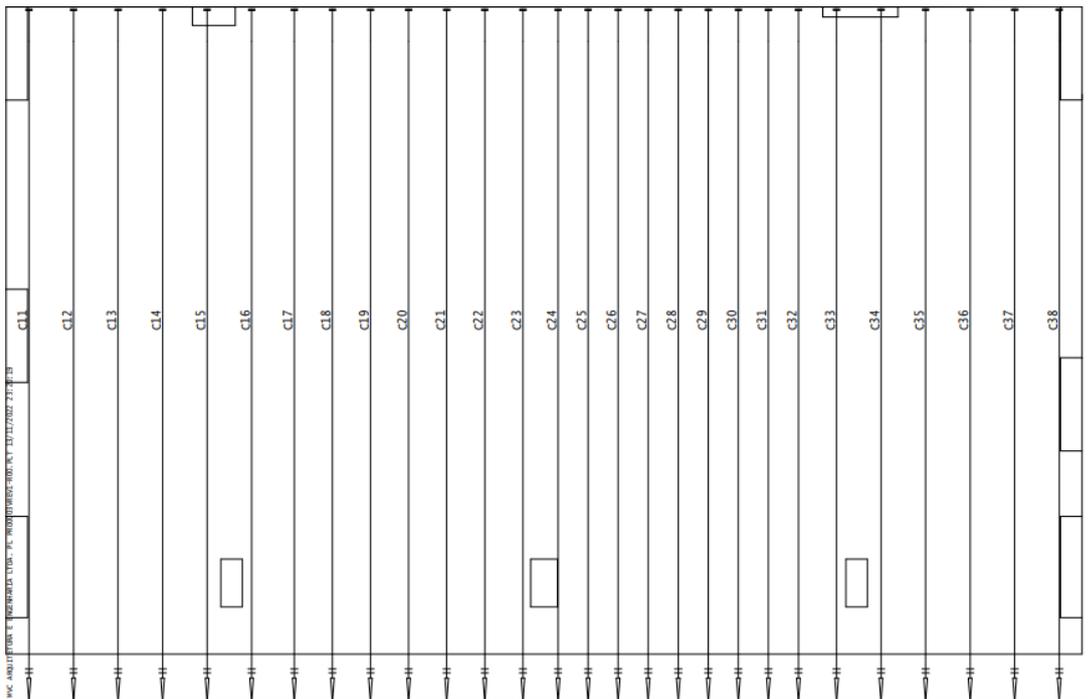
FIGURA 49 – MODELO ESTRUTURAL



Fonte: Figura dos autores (2022)

6.2.4.4.1 . Armadura de protensão:

FIGURA 50 – ARMAÇÃO PROTENDIDA VERTICAL



Fonte: Figura dos autores (2022)

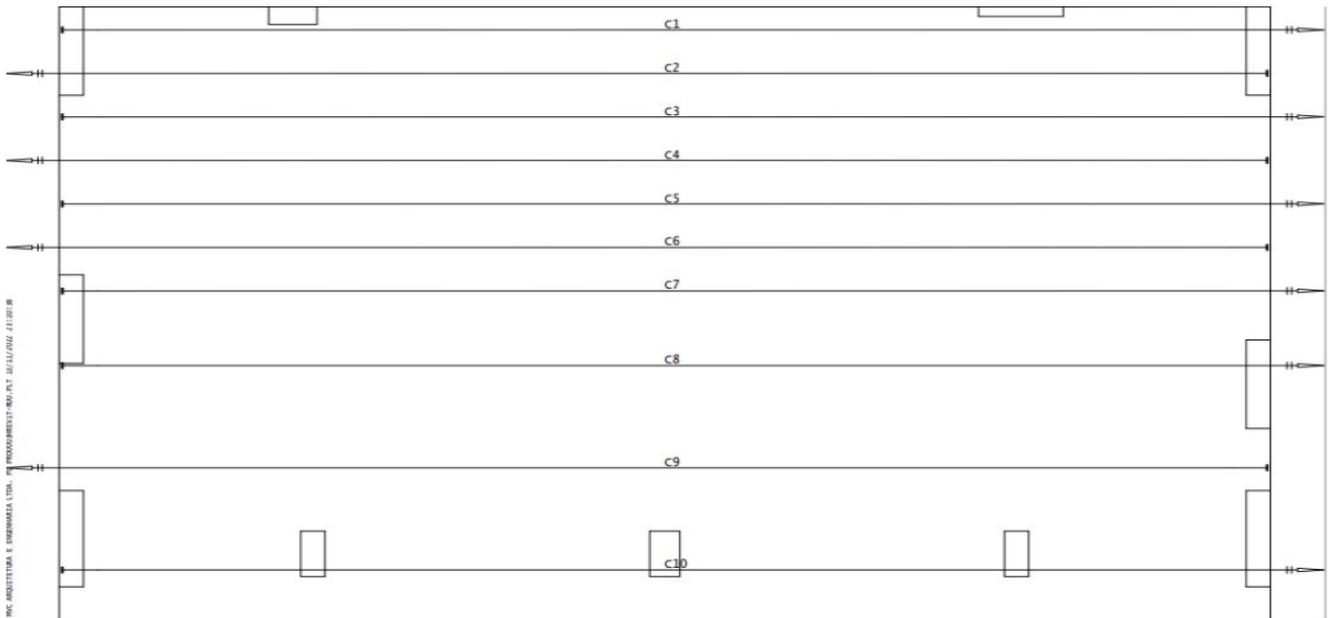
TABELA 11 – TABELA DE AÇO PARA PROTENSÃO

PROTENSÃO: AÇO CP190 RB 12.7 - 12.7									
CABO	Ø (mm)	Q	COMPRIMENTO (m)		ANCORAGENS			ALONG (mm)	
			UNITÁRIO	TOTAL	A	P	I	INI	FIN
C11 A C32	2 Ø 12.7	22	12.7	559.2	44	44		0	72
C33 A C38	"	6	12.7	152.5	12	12		0	94

RESUMO DE PROTENSÃO							
Monocordoalhas não aderentes							
CABO				ANCORAGENS			
Ø mm	COMPR m	PESO			A	P	I
		kgf/m	kgf	kgf+4%			
2 Ø 12.7	712	0.886	631	656	56	56	

Fonte: Tabela dos autores (2022)

FIGURA 51 – ARMAÇÃO PROTENDIDA HORIZONTAL



Fonte: Figura dos autores (2022)

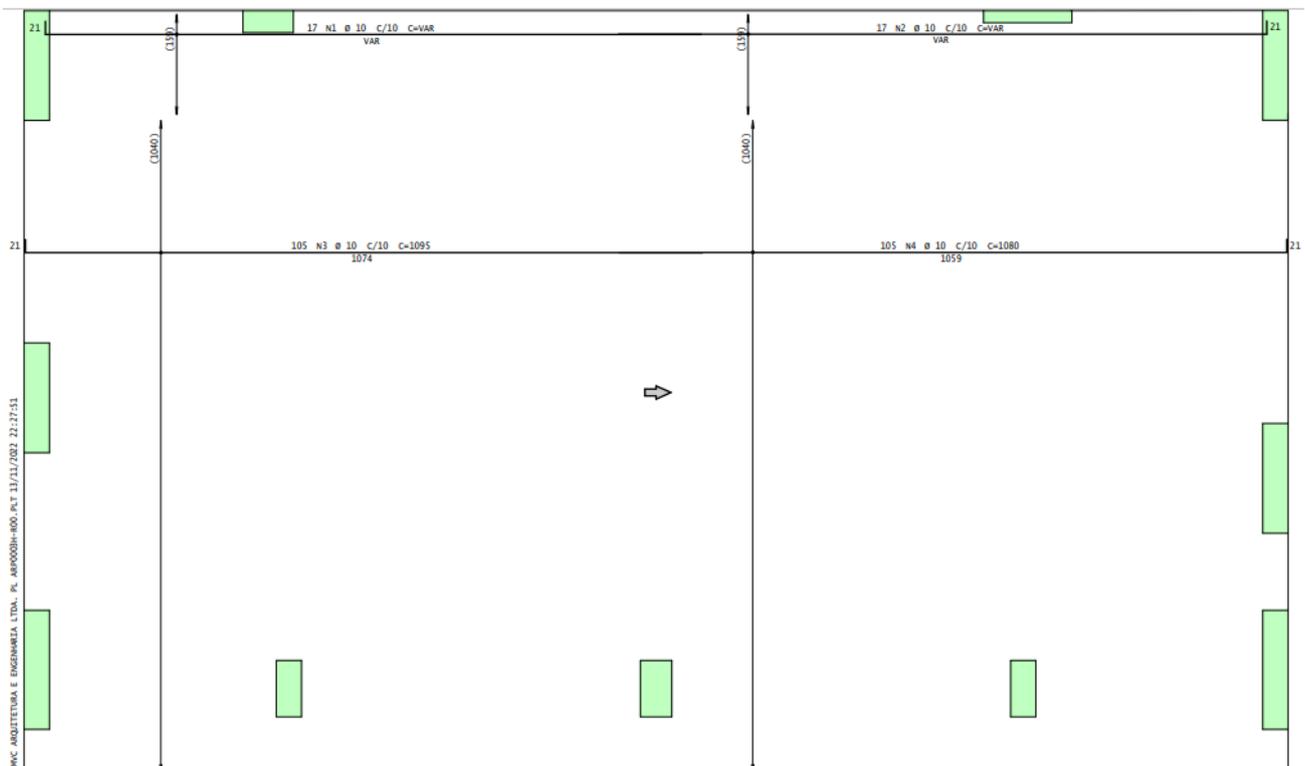
TABELA 13 – TABELA DE RESUMO DE AÇO

AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO		
				UNIT cm	TOTAL cm	
tipo - Armadura negativa principal						
50A	1	10	14	--VAR-	9464	
50A	2	10	14	--VAR-	10066	
50A	3	10	35	695	24325	
50A	4	10	35	740	25900	
50A	5	16	42	340	14280	
50A	6	10	50	260	13000	
50A	7	10	50	240	12000	
50A	8	10	50	375	18750	
60A	9	5	45	1140	51300	

RESUMO DE AÇO			
AÇO	BIT mm	COMPR m	PESO kgf
60A	5	513	79
50A	10	1135	700
50A	16	143	225
Peso Total	60A =		79 kgf
Peso Total	50A =		926 kgf

Fonte: Tabela dos autores (2022)

FIGURA 53– ARMADURA POSITIVA



Fonte: Figura dos autores (2022)

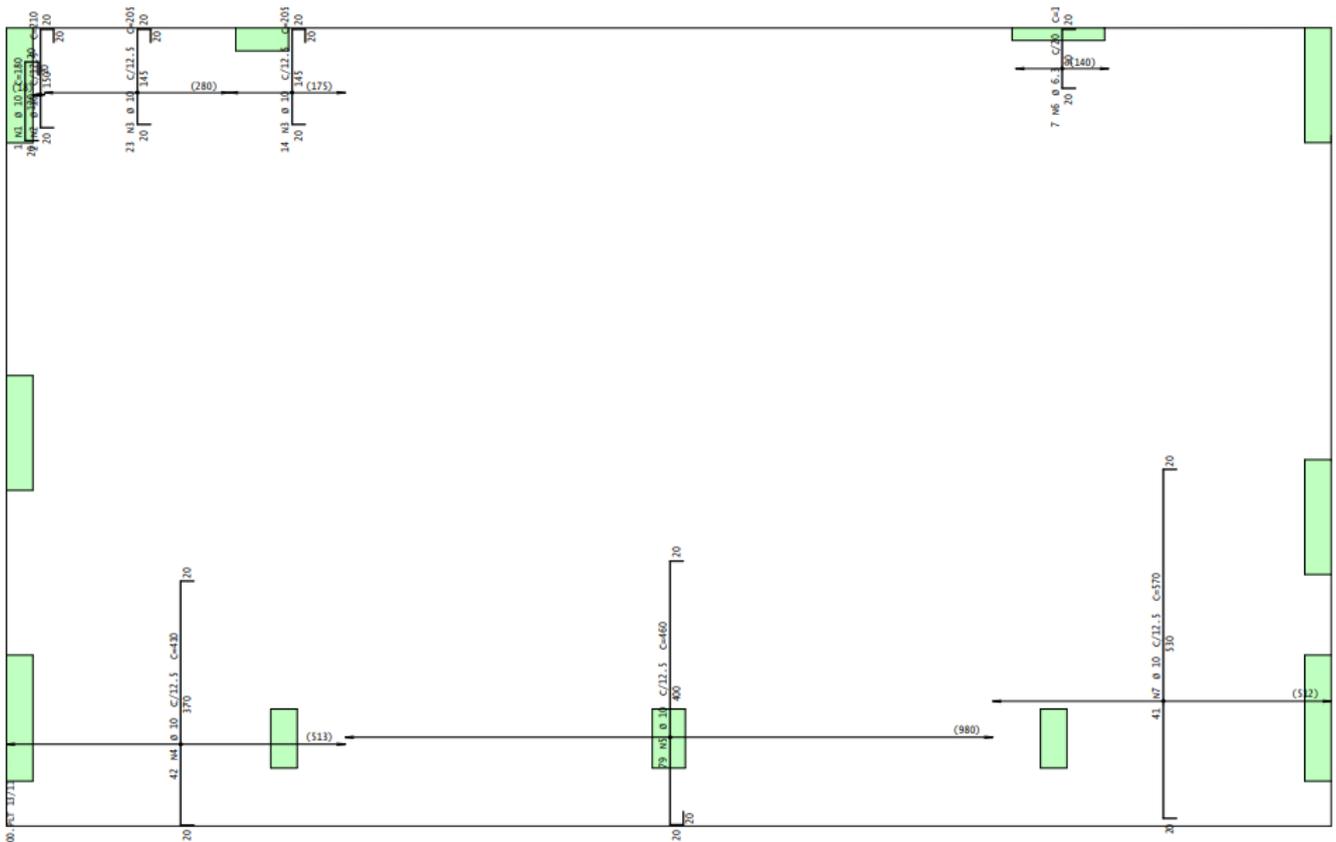
TABELA 14 – TABELA DE RESUMO DE AÇO

AÇO	POS	BIT	QUANT	COMPRIMENTO	
				UNIT	TOTAL
		mm		cm	cm
tipo - Armadura positiva principal					
50A	1	10	17	--VAR-	18241
50A	2	10	17	--VAR-	18037
50A	3	10	105	1095	114975
50A	4	10	105	1080	113400

RESUMO DE AÇO			
AÇO	BIT	COMPR	PESO
	mm	m	kgf
50A	10	2647	1633
Peso Total	50A =		1633 kgf

Fonte: Tabela dos autores (2022)

FIGURA 54 – ARMADURA NEGATIVA SECUNDARIA



Fonte: Figura dos autores (2022)

TABELA 16 – TABELA DE RESUMO DE AÇO

AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO		
				UNIT cm	TOTAL cm	
tipo - Armadura positiva secundaria						
50A	1	10	2	--VAR-	2252	
50A	2	10	1	588	588	
50A	3	10	158	741	117078	
50A	4	10	153	636	97308	
50A	5	10	4	545	2180	
50A	6	10	2	--VAR-	2236	
RESUMO DE AÇO						
AÇO	BIT mm	COMPR m	PESO kgf			
50A	10	2216	1368			
Peso Total	50A =		1368 kgf			

Fonte: Tabela dos autores (2022)

6.3. Laje nervurada

A laje nervurada pode ser entendida como um elemento estrutural constituído por vigas, em uma ou duas direções e o cálculo simplificado consiste em determinar os esforços solicitantes e flechas de acordo com as tabelas desenvolvidas para as lajes maciças, já explicada no capítulo 6.1 deste trabalho.

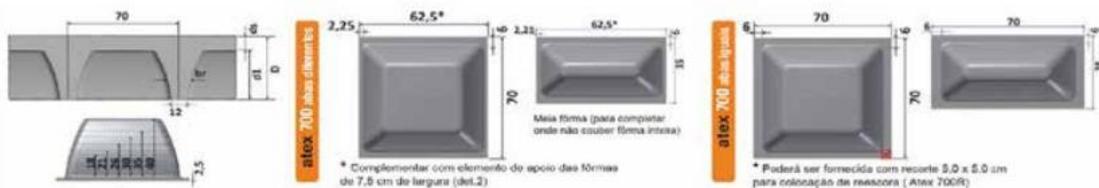
A NBR 6118 (item 14.7.7) especifica que as lajes nervuradas unidirecionais devem ser calculadas segundo a direção das nervuras, desprezadas a rigidez transversal e a rigidez à torção. “As lajes nervuradas bidirecionais (conforme ABNT NBR 14859-2) podem ser calculadas, para efeito de esforços solicitantes, como lajes maciças.”

6.3.1. Premissas

Para dimensionamento da laje nervurada, foi escolhida uma forma pronta especificada no catálogo da empresa Atex para ser utilizada como ponto de partida do projeto. O tipo de forma pode ser inicialmente estipulado considerando alguns parâmetros, como as dimensões da laje e sua altura aproximada de concreto para vencer o vão desejado. A forma escolhida no projeto é a “Atex 700 Bidirecional”:

TABELA 17 – CATÁLOGO DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICA DE FÔRMA BIDIRECIONAL (ATEX 700)

Altura do Molde	Espessura da Lâmina	Altura Total	Largura da Nervura			Área da Seção	Distância do C. G. à		Inércia		Volume do Vazio		Peso Próprio	Volume de Concreto
			Inferior	Superior	Média		Face Superior	Face Inferior	Inércia para nervurada	Altura equivalente	m ³	m ³ /m ²		
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ⁴	cm	m ³	m ³ /m ²	KN/m ²	m ³ /m ²
18,0	5,0	23,0	12,0	14,2	13,1	586	7,0	16,0	24905	16,2	0,058	0,119	2,78	0,111
	7,5	25,5				761	7,6	17,9	34229	18,0			3,40	0,136
	10,0	28,0				936	8,5	19,5	45523	19,8			4,03	0,161
21,0	5,0	26,0	12,0	15,0	13,5	634	8,1	17,9	36015	18,3	0,067	0,137	3,08	0,123
	7,5	28,5				809	8,6	19,9	48206	20,2			3,70	0,148
	10,0	31,0				984	9,4	21,6	62285	22,0			4,33	0,173
26,0	5,0	31,0	12,0	16,4	14,2	719	10,1	20,9	60869	21,9	0,081	0,165	3,63	0,145
	7,5	33,5				894	10,4	23,1	79131	23,8			4,25	0,170
	10,0	36,0				1069	11,0	25,0	99047	25,7			4,88	0,195
30,0	5,0	35,0	12,0	18,0	15,0	800	11,8	23,2	87628	24,7	0,091	0,186	4,13	0,165
	7,5	37,5				975	11,9	25,6	112103	26,8			4,75	0,190
	10,0	40,0				1150	12,4	27,6	138016	28,7			5,38	0,215
35,0	5,0	40,0	12,0	20,0	16,0	910	13,9	26,1	130753	28,2	0,102	0,208	4,80	0,192
	7,5	42,5				1085	14,0	28,5	164577	30,4			5,43	0,217
	10,0	45,0				1260	14,4	30,7	199554	32,5			6,05	0,242
40,0	5,0	45,0	12,0	22,2	17,1	1034	16,1	28,9	186636	31,7	0,112	0,229	5,55	0,222
	7,5	47,5				1209	16,1	31,4	231618	34,1			6,18	0,247
	10,0	50,0				1384	16,4	33,6	277525	36,1			6,80	0,272
d1	ds	D	d1	bs	br	A	rs	ri	I	heq	v/v	Concreto 25 kN/m ³		



Fonte: Atex (2017)

6.3.2. Carregamentos

Os carregamentos considerados nas lajes nervuradas podem ser as mesmas consideradas nas lajes de concreto convencional, porém calculado por metro quadrado de área, separando uma área da laje cujo centro coincide com o cruzamento de duas nervuras.

6.3.3. Carregamentos permanentes

São aquelas que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida útil da construção. Pode-se considerar, por exemplo, o peso próprio da laje, contrapiso, revestimento inferior, piso e paredes.

6.3.4. Carregamentos variáveis

São aquelas que são constituídas a partir do uso específico da edificação, pela ação do vento ou da água, verificadas caso a caso conforme as particularidades do projeto e sempre respeitando valores característicos nominais mínimos indicados na NBR 6120 (Cargas para cálculo de estruturas de edificações).

Especificamente neste projeto utilizaremos também os mesmos valores apresentados no dimensionamento da laje de concreto armado convencional.

6.3.5. Momentos fletores

Os momentos fletores podem ser determinados de acordo com a Teoria das Placas, explicada anteriormente na seção do concreto armado convencional. No caso de lajes nervuradas com nervuras nas duas direções (bidirecionais) é necessário determinar o momento fletor atuante em cada nervura, o que depende da distância entre as nervuras.

Para a direção x, temos: $M_x = 91,12 \text{ (kN.m)}$

Para a direção y, temos: $M_y = 65,46 \text{ (kN.m)}$

6.3.6. Altura da laje

A altura útil pode ser inicialmente verificada considerando a altura da forma utilizada na laje. A altura d pode ser determinada com a seguinte equação:

$$d = 47,50 \text{ cm}$$

6.3.7. Área de aço

Conhecendo os momentos fletores máximos e fazendo uso de equações com coeficientes K tabelados, assim como no dimensionamento da laje convencional, temos:

$$K_{cx} = 6,03$$

$$K_{cy} = 14,00$$

Com isso, determina-se a área de aço em cada direção da nervura da laje:

$$\text{Para a direção x, temos: } A_s = 13,24 \frac{\text{cm}^2}{\text{nervura}}$$

$$\text{Para a direção y, temos: } A_s = 5,46 \frac{\text{cm}^2}{\text{nervura}}$$

6.3.8. Momentos fletores nos apoios intermediários

Nas lajes nervuradas também surgem momentos fletores negativos, assim como as lajes maciças contínuas sobre vigas. O projeto pode ser feito admitindo-se uma das seguintes hipóteses:

- a) A seção com armadura simples negativa é suficiente para resistir ao momento fletor negativo;
- b) Se a seção é insuficiente com armadura simples, pode-se utilizar armadura dupla;
- c) A seção da nervura é insuficiente, mas pode-se aumentar a seção;
- d) Impor uma armadura negativa nas nervuras;
- e) Utilizar uma mesa dupla na extensão dos momentos fletores negativos.

6.3.9. Força cortante

O dimensionamento das lajes nervuradas à força cortante é feito em função do espaçamento entre as nervuras. Quando a distância de eixo a eixo das nervuras é menor que 65cm a força cortante deve ser verificada como nas lajes maciças. Quando essa distância é superior a 65cm e menor do que 110cm, a força cortante nas nervuras deve ser verificada como nas vigas de concreto armado, neste caso, sempre haverá uma armadura transversal nas nervuras.

7 ESTUDO DE CASO: EDÍFICIO CORPORATIVO JT

O bairro do Jardim Paulistano, localizado na região oeste da capital de São Paulo, surgiu na década de 20 e é conhecido pela sua diversidade, que apresenta uma combinação excepcional entre centros financeiros e moradias acolhedoras, sendo um dos preferidos da alta sociedade. Pode-se observar diversos prédios comerciais, restaurantes, shoppings, parques, supermercados bem próximos às residências. O local é muito elogiado por seus moradores pela praticidade e vantagens expostas.

É neste bairro que se localiza o empreendimento do estudo de caso deste trabalho.

FIGURA 56 – ARREDORES DO FUTURO EDÍFICIO NO BAIRRO DO JARDIM PAULISTANO



Fonte: Figura dos autores (2022)

O empreendimento encontra-se no cruzamento entre a Rua Iraci com a Rua Hungria, no nº 707. A primeira é uma via especialmente de residências, sendo bem tranquila e pacata, totalmente em contraste com as grandes avenidas da região, como a Av. Rebouças e a Av. Brigadeiro Faria Lima. Já a segunda trabalha como faixa local para a Marginal Pinheiros.

O local possui fácil acesso tanto para pedestres vindos da estação Hebraica Rebouças e shoppings Eldorado e Iguatemi, como para veículos de pequeno e grande porte.

FIGURA 57 - PERÍMETRO DO BAIRRO JARDIM PAULISTANO E SEUS ARREDORES PELO GOOGLE MAPS



Fonte: Google Maps (2022)

FIGURA 58 – ARREDORES DO FUTURO EDIFÍCIO, OBSERVA-SE DIVERSAS RESIDÊNCIAS PRÓXIMAS



Fonte: Figura dos autores (2022)

FIGURA 59 – FACHADA DO FUTURO EDIFÍCIO, OBSERVA-SE A MARGINAL PINHEIROS E CLUBE JOCKEY



Fonte: Figura dos autores (2022)

FIGURA 60 – ARREDORES DO FUTURO EDIFÍCIO, OBSERVA-SE A MARGINAL PINHEIROS



Fonte: Figura dos autores (2022)

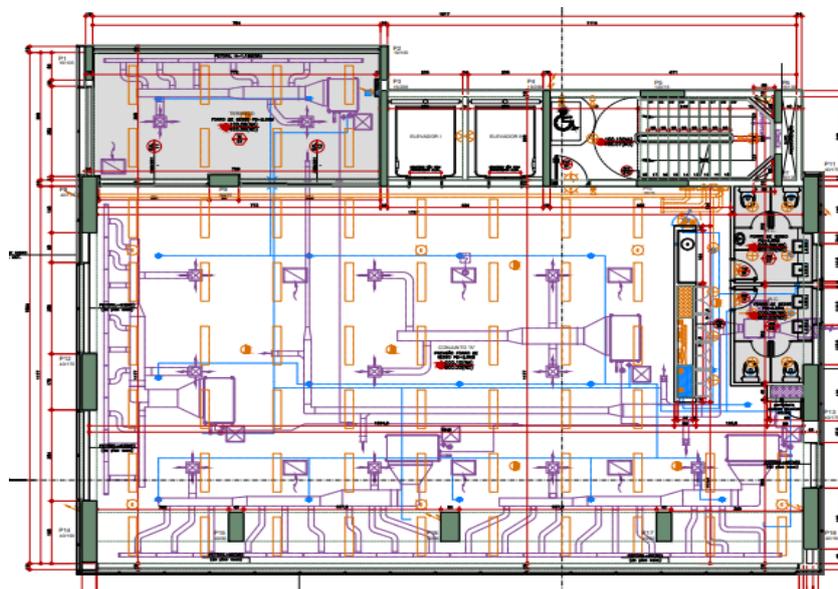
FIGURA 61 – ARREDORES DO FUTURO EDIFÍCIO, OBSERVA-SE PRÉDIOS COMERCIAIS E SHOPPING



Fonte: Figura dos autores (2022)

O edifício, chamado de JT pelas iniciais do cliente, é disposto em um andar subsolo designado para vagas de estacionamento, o andar térreo para recepção de clientes e funcionários e do 1º pavimento ao 12º pavimento estão estruturados os andares que serão comercializados para aluguel e venda de seus espaços, com a finalidade de grandes empresas montarem seus escritórios com livre-arbítrio de ajustá-lo conforme sua necessidade. Acima destes estão os andares técnicos do barrilete com casa de máquinas para os dois elevadores e cobertura com os reservatórios superiores.

FIGURA 62 – PROJETO ARQUITETÔNICO DE PAVIMENTO MODELO



Fonte: JNA Arquitetos (2022)

FIGURA 63 – PERSPECTIVA DIGITAL DO EDIFÍCIO JT FINALIZADO



Fonte: JNA Arquitetos (2022)

A partir da entrada nos pavimentos tipo pelos elevadores ou as escadas, estes recebem enorme destaque pelo vasto salão disponível com a exclusão de pilares centrais, consequentemente fornecendo maior liberdade de autenticação para cada andar.

Além dele, o projeto apresenta sanitários femininos e masculinos alocados para se ocultar ao máximo para permitir o raio de visão limpo do pavimento e um terraço de aproximadamente 31 m². A fachada é toda revestida em pele de vidro, formando uma caixa espelhada na movimentada Marginal Pinheiros. O detalhe fica para a varanda gourmet com pé direito duplo e sacada superior no 11º andar do prédio.

FIGURA 64 – PAVIMENTOS SEPARADOS COM PLATIBANDA RESERVADA



Fonte: Figura dos autores (2022)

FIGURA 65 – DISPOSIÇÃO DE PAVIMENTO MODELO



Fonte: Figura dos autores (2022)

Durante a visita do grupo, a obra encontrava-se em diversas fases executivas, como poderá ser observado nas imagens abaixo. Ocorreu de ter pavimentos com trechos para demolição, em vedação de alvenarias externas e armação de lajes para concretagem. Essa última fora o de maior destaque, por ser responsável pelo tema principal de execução deste estudo comparativo.

FIGURA 66 – DETALHE DE LAJES E PILARES ANTIGOS SENDO DEMOLIDOS PRÓXIMOS À ESTRUTURAS NOVAS EXECUTADAS



Fonte: Figura dos autores (2022)

FIGURA 67 – DISPOSIÇÃO DE PAVIMENTO, REFORÇA-SE O VÃO LIVRE SEM PILARES



Fonte: Figura dos autores (2022)

FIGURA 68 – DETALHE DE MALHAS E CORDOALHAS DE AÇO DE LAJE



Fonte: Figura dos autores (2022)

8 ORÇAMENTO E CRONOGRAMA

Para a construção de um edifício, vários métodos construtivos estão à disposição da equipe de engenharia para serem selecionados. Deve-se avaliar a viabilidade de cada um a fim de comparar a velocidade de obra e principalmente seus custos. Uma análise detalhada é de extrema importância para que seja tomada a melhor decisão de acordo com a exigência de cada projeto.

Desta forma, será apresentado nesse tópico um estudo comparativo de custos, materiais utilizados e mão de obra entre os três métodos construtivos percorridos durante os tópicos anteriores para o estudo de caso, sendo laje em concreto convencional, laje nervurada e laje em concreto protendido.

Para ter uma visão real dos resultados é preciso analisar os cronogramas e as planilhas orçamentárias, já que a mesma apresenta informações que diferem para cada material utilizado, suas aplicações e consumos.

Para análise do estudo, os custos serão obtidos através das tabelas do SINAPI considerando a data base em setembro de 2022 e SIURB com a data base de julho de 2022. Não serão levados em consideração os acréscimos referentes ao BDI ou impostos gerais.

8.1. Laje em concreto armado convencional

Considerando os cálculos obtidos no item 6.1 é apresentada a planilha orçamentária com os quantitativos de material e mão de obra.

TABELA 18 –DESCRIÇÃO DE SERVIÇOS E CUSTO PARA EXECUÇÃO

LAJE EM CONCRETO ARMADO CONVENCIONAL							
ITEM	ORGÃO	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	UN.	QUANT.	CUSTO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL
			SERVIÇOS				
1	SIURB	08-28-00	FORNECIMENTO E APLICAÇÃO DE CONCRETO USINADO FCK=40,0MPA - BOMBEADO	M3	115,55	R\$ 563,96	R\$ 65.165,57
2	SINAPI	92773	ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 16,0 MM - MONTAGEM. AF_06/2022	KG	3.973,00	R\$ 10,27	R\$ 40.802,71
3	SINAPI	92772	ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 12,5 MM - MONTAGEM. AF_06/2022	KG	1.679,00	R\$ 10,45	R\$ 17.545,55
4	SINAPI	92526	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE LAJE MACIÇA, PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA, 10 UTILIZAÇÕES. AF_09/2020	M2	258,22	R\$ 44,02	R\$ 11.366,84
5	SINAPI	95967	SERVIÇOS TÉCNICOS ESPECIALIZADOS PARA ACOMPANHAMENTO DE EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS E ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO	H	6,00	R\$ 158,55	R\$ 951,30
TOTAL							R\$ 135.831,97

Fonte: Tabela dos autores (2022)

TABELA 20 –DESCRIÇÃO DE SERVIÇOS E CUSTO PARA EXECUÇÃO

LAJE NERVURADA							
ITEM	ORGÃO	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	UN.	QUANT.	CUSTO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL
SERVIÇOS							
1	SIURB	08-28-00	FORNECIMENTO E APLICAÇÃO DE CONCRETO USINADO FCK=40,0MPA - BOMBEADO	M3	61,50	R\$ 563,96	R\$ 34.683,54
2	SINAPI	92773	ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 16,0 MM - MONTAGEM. AF_06/2022	KG	894,00	R\$ 10,27	R\$ 9.181,38
3	SINAPI	92771	ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_06/2022	KG	350,00	R\$ 12,42	R\$ 4.347,00
4	SINAPI	92490	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE LAJE NERVURADA COM CUBETA E ASSOALHO, PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, 8 UTILIZAÇÕES. AF_09/2020	M2	258,22	R\$ 77,10	R\$ 19.908,76
5	SINAPI	95967	SERVIÇOS TÉCNICOS ESPECIALIZADOS PARA ACOMPANHAMENTO DE EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS E ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO	H	6,00	R\$ 158,55	R\$ 951,30
TOTAL							R\$ 69.071,98

Fonte: Tabela dos autores (2022)

A laje nervurada é um tipo de processo construtivo recomendado para lajes com maiores vãos entre pilares. O consumo de aço não é muito elevado, mas necessita de uma atenção maior na montagem da armadura.

Formas prontas do tipo cubeta são utilizadas para a redução do volume de concreto mantendo a resistência necessária para as solicitações exigidas pela laje. O escoramento também já está incorporado no custo.

Deve-se tomar cuidado já que o posicionamento das cubetas necessita de uma mão de obra especializada com um escoramento mais elaborado que acaba elevando um pouco o custo e o tempo de execução dessa etapa.

TABELA 21 – CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO DE SERVIÇOS

⑩	Nome	Duração	Início	Fim	Antecessores	4 dez 22	11 dez 22	18 dez 22
1	Montagem de Escoramento	2 dias	05/12/22 07:00	06/12/22 17:00				
2	Montagem de Fôrma	1,667 dias	07/12/22 07:00	08/12/22 14:00	1			
3	Desmoldante	0,222 dias	08/12/22 14:00	08/12/22 16:00	2			
4	Conferência de Locação	0,222 dias	08/12/22 14:00	08/12/22 16:00	2			
5	Alinhamento de Réguas	0,444 dias	08/12/22 16:00	09/12/22 10:00	4			
6	Nivelamento de Fôrma	0,778 dias	08/12/22 16:00	09/12/22 14:00	4			
7	Posicionamento de Passantes	0,778 dias	08/12/22 16:00	09/12/22 14:00	4			
8	Armação	3 dias	09/12/22 14:00	14/12/22 08:00	6;7			
9	Conferência de Armação	0,278 dias	13/12/22 15:30	14/12/22 08:00	8FF			
10	Molhamento de Fôrma	0,056 dias	14/12/22 08:00	14/12/22 08:30	9			
11	Concretagem	0,556 dias	14/12/22 08:00	14/12/22 14:00	10SS			
12	Cura Úmida	3 dias	14/12/22 14:00	19/12/22 08:00	11			
13	Montagem de Reescoramento	0,444 dias	15/12/22 14:00	16/12/22 08:00	11FS+1 dia			
14	Desforma	1,444 dias	19/12/22 08:00	20/12/22 13:00	11FS+3 dias			
15	Desmontagem de Escoramento	0,556 dias	19/12/22 08:00	19/12/22 14:00	11FS+3 dias			

Fonte: Tabela dos autores (2022)

O tempo calculado para todo o ciclo da laje é de 15 dias, desde o início da montagem do escoramento até a desforma. Um dado que prolonga o tempo total é a exigência de uma cura mínima de 72 horas para início da retirada das formas.

8.3. Laje protendida

Considerando os cálculos obtidos no item 6.3 é apresentada a planilha orçamentária com os quantitativos de material e mão de obra.

TABELA 22 – DESCRIÇÃO DE SERVIÇOS E CUSTO PARA EXECUÇÃO

LAJE PROTENDIDA							
ITEM	ORGÃO	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	UN.	QUANT.	CUSTO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL
SERVIÇOS							
1	SIURB	08-28-00	FORNECIMENTO E APLICAÇÃO DE CONCRETO USINADO FCK=40,0MPa - BOMBEADO	M3	77,47	R\$ 563,96	R\$ 43.689,98
2	SINAPI	92771	ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_06/2022	KG	4.226,00	R\$ 12,42	R\$ 52.486,92
3	SINAPI	92769	ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 6,3 MM - MONTAGEM. AF_06/2022	KG	2,20	R\$ 14,69	R\$ 32,31
4	SINAPI	92773	ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 16,0 MM - MONTAGEM. AF_06/2022	KG	226,00	R\$ 10,27	R\$ 2.321,02
5	SINAPI	92768	ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-60 DE 5,0 MM - MONTAGEM. AF_06/2022	KG	79,00	R\$ 15,45	R\$ 1.220,55
6	SINAPI	08-64-00	FORNECIMENTO E COLOCAÇÃO DE AÇO DE PROTENSÃO CP-190-RB - 12 Ø = 1/2" INCLUINDO BAINHA, PROTENSÃO E INJEÇÃO	KG	890,00	R\$ 31,38	R\$ 27.928,20
7	SIURB	08-65-00	ANCORAGEM ATIVA SÉRIE V- 4 Ø = 1/2"	UN	40,00	R\$ 496,43	R\$ 19.857,20
8	SINAPI	92526	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE LAJE MACIÇA, PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA, 10 UTILIZAÇÕES. AF_09/2020	M2	258,22	R\$ 44,02	R\$ 11.366,84
9	SINAPI	95967	SERVIÇOS TÉCNICOS ESPECIALIZADOS PARA ACOMPANHAMENTO DE EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS E ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO	H	12,00	R\$ 158,55	R\$ 1.902,60
TOTAL							R\$ 160.805,62

Fonte: Tabela dos autores (2022)

TABELA 23 – CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO DE SERVIÇOS

Nome	Duração	Início	Fim	Antecessores
1 Montagem de Escoramento	1 dia	05/12/22 07:00	05/12/22 17:00	
2 Montagem de Fôrma	1 dia	06/12/22 07:00	06/12/22 17:00	1
3 Desmoldante	0,222 dias	07/12/22 07:00	07/12/22 09:00	2
4 Conferência de Locação	0,222 dias	07/12/22 07:00	07/12/22 09:00	2
5 Nivelamento de Fôrma	0,778 dias	07/12/22 09:00	07/12/22 17:00	4
6 Posicionamento de Passantes	0,778 dias	07/12/22 09:00	07/12/22 17:00	4
7 Armação Positiva	2 dias	08/12/22 07:00	09/12/22 17:00	5;6
8 Posicionamento de Cordoalhas	1 dia	10/12/22 07:00	12/12/22 11:00	7
9 Armação Negativa	1 dia	12/12/22 11:00	13/12/22 11:00	8
10 Conferência de Armação	0,278 dias	13/12/22 11:00	13/12/22 14:30	9
11 Conferência de Cordoalhas	0,278 dias	13/12/22 11:00	13/12/22 14:30	9
12 Molhamento de Fôrma	0,056 dias	14/12/22 07:00	14/12/22 07:30	10;11
13 Concretagem	0,556 dias	14/12/22 07:00	14/12/22 13:00	12SS
14 Cura Úmida	3 dias	14/12/22 13:00	17/12/22 12:00	13
15 Protensão	1 dia	19/12/22 07:00	19/12/22 17:00	14
16 Análise do Projetista	3 dias	20/12/22 07:00	22/12/22 17:00	15
17 Montagem de Reescoramento	0,444 dias	15/12/22 13:00	15/12/22 17:00	13FS+1 dia
18 Corte das Cordoalhas	0,556 dias	23/12/22 07:00	23/12/22 13:00	16
19 Injeção de Nata	1 dia	23/12/22 13:00	24/12/22 12:00	18
20 Desforma	0,556 dias	26/12/22 07:00	26/12/22 13:00	19
21 Desmontagem de Escoramento	0,556 dias	26/12/22 07:00	26/12/22 13:00	19

Fonte: Tabela dos autores (2022)

A laje em concreto protendido exige uma mão de obra especializada para a realização do serviço, já que a protensão necessita de cuidados e um controle de execução rigoroso. A quantidade de aço não é muito elevada, já que as barras são utilizadas somente como armadura passiva, por outro lado a execução da armadura ativa é um item que pesa no quantitativo e orçamento.

As formas e escoramentos são montadas de maneira idêntica ao concreto armado convencional. A única diferença no processo se dá na montagem da armadura e também nos processos que ocorrem após a concretagem.

O cronograma simulado entrega um ciclo completo de laje em 21 dias, porém o processo executivo não é prejudicado já que outras atividades podem ser iniciadas em paralelo logo após a cura úmida, como a montagem das formas de uma nova laje.

9 CONCLUSÃO

Ainda que os resultados obtidos evidenciem uma disparidade de preços entre os métodos analisados, não é simples definir o mais eficiente. De maneira geral, a escolha deve ser baseada em inúmeros outros aspectos além do custo. Prazo, facilidade de execução e questões arquitetônicas são levadas em consideração para que seja tomada a melhor decisão.

Considerando o estudo de caso, algumas questões podem ser evidenciadas. O concreto armado convencional foi o método que apresentou um maior custo e isso se deve ao fato de não ser o mais indicado para vencer grandes vãos sem que haja pilares e vigas que ajudem a distribuir as solicitações de utilização do edifício. Por outro lado, é a maneira mais rápida de executar o projeto, já que utiliza de materiais, equipamentos e tecnologias que estão a muito tempo sendo empregadas, facilitando a busca de mão de obra especializada e garantindo uma maior competitividade de preço na contratação.

A exigência de empregar pilares no meio do vão para que o projeto se torne sustentável financeiramente atrapalha a questão arquitetônica. Cada vez mais a busca por espaços rigorosamente definidos diminui, principalmente para salas comerciais, sendo preferível locais em que possa existir uma liberdade de criação e mudança dos ambientes internos.

A questão da grande espessura da laje também se torna um problema. Com lajes maiores o espaço vertical é perdido, principalmente pelo pavimento necessitar de instalações aparentes, como dutos de ar condicionado, redes de exaustão de ar e incêndio.

Para tentar melhorar os índices financeiros e também a otimização do espaço se busca outras soluções, como o emprego de uma laje nervurada. Nesse caso o consumo de concreto, que é um dos materiais mais caros da composição, reduz em aproximadamente 50%. Em contrapartida, materiais especiais devem ser encontrados no mercado, como as próprias cubetas de plástico e as réguas que são utilizadas para alinhamento das formas. O cimbramento também dispõe de uma montagem um pouco mais complexa. O tempo de obra nesse sistema é um pouco maior, mas não torna o processo demorado.

Laje nervurada se mostra uma opção com grande potencial de ser empregada, porém alguns malefícios existem. Como o vão a ser vencido é extenso, a altura total de laje também fica alta e interfere diretamente no conforto do ambiente. Para contornar essa situação deve-se aumentar o pé direito entre os pavimentos, mas acarreta em uma perda de altura total do edifício, já que as construções devem seguir normas que definem um gabarito máximo de acordo com a região.

Por mais que a procura por esse tipo de execução aumente, a facilidade de encontrar variedades de empresas que fornecem as formas e a mão de obra de instalação é menor comparado com um meio convencional. No caso estudado, foram utilizados materiais da empresa Atex, uma das maiores do ramo em solo brasileiro.

O concreto protendido surge como uma terceira alternativa para o problema. É a forma que melhor otimiza os espaços da laje e também proporciona uma redução do consumo de concreto por conseguir vencer grandes vãos. Por outro lado, necessita da utilização de uma quantidade muito grande armadura tanto passiva quanto ativa.

O cronograma considerando apenas uma laje executada parece longo, mas o projeto adota um sistema de pós tração e algumas atividades podem ser executadas em paralelo com a montagem de formas de lajes superiores, por exemplo.

Normalmente as empresas que fornecem as cordoalhas para a armadura ativa dispõe dos equipamentos necessários para que todo o processo ocorra,

simplificando a operação. Protensão, injeção de nata, corte das cordoalhas e acompanhamento das etapas através de relatórios são serviços essenciais que andam junto com o controle tecnológico e análise do engenheiro calculista.

De maneira geral, a definição de um método construtivo depende de diversos fatores e não fica limitada a um único parâmetro, dependendo do projeto, arquitetura, sustentabilidade e até mesmo a região da obra o processo pode ser diferente. A utilização da laje armada convencional no caso do estudo em questão é descartada de acordo com as inúmeras justificativas já citadas nesse texto. Isso não muda o fato de poder ser a melhor opção para um projeto específico com diferentes concepções.

A melhor alternativa para o estudo de caso está entre a laje nervurada e a laje em concreto protendido, mesmo a segunda opção apresentando uma diferença de custo que pode ser compensada principalmente pela liberdade arquitetônica que é criada pelo espaço interno sem nenhum tipo de interferência.

Empreendimentos residenciais e comerciais prezam cada vez mais por outros fatores além do valor pago na obra, é vantajoso um investimento um pouco maior na concepção e execução do projeto já que com a valorização do mercado imobiliário essa diferença de custo acaba sendo retornada rapidamente aos investidores.

Em suma, todos os métodos estudados podem ser empregados nos diferentes tipos de projetos que são encontrados pelo mundo da construção civil, cada um com suas características, métodos de execução distintos, vantagens e incapacidades. Cabe aos profissionais envolvidos definirem junto com a equipe técnica e financeira qual é o objetivo que se busca para a edificação e quais as prioridades que devem ser seguidas.

10 BIBLIOGRAFIA

ARCELORMITTAL **Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido. 2021.** Catálogo próprio retirado do site Arcelormittal, 2022.

AURICH, M. **Modelo da ligação entre concreto e armadura na análise de estruturas de concreto pelo método dos elementos finitos.** 2001 - Dissertação de pós-graduação - UFRGS, Porto Alegre, 2001.

BASTOS, P. **Fundamentos do concreto armado.** 2019. Apostila - UNESP, São Paulo, 2019.

BASTOS, P. **Fundamentos do concreto protendido.** 2019. Apostila - UNESP, São Paulo, 2019.

CHOLFE, L; BONILHA, L. **Concreto protendido: Teoria e Prática.** 2ª Edição. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2018.

EMERICK, A. **Projeto e execução de lajes protendidas.** 2002. Apostila, Brasília, 2002.

HANAI, J. B. **Fundamentos do concreto protendido.** Universidade de São Paulo – Escola de engenharia de São Carlos. 2005

KIMURA, A. **Informática aplicada a estruturas de concreto armado.** São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2018.

LEONHARDT, F; MONNIG, E. **Construções de concreto - Volume 1: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado.** 2ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Editora Bookman, 2016.

PFEIL, W. **Concreto protendido - Volume 1: Introdução.** 2ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 1984.

ROCHA, A. M. **Novo curso prático de concreto armado.** Rio de Janeiro: Editora Científica, 1975.

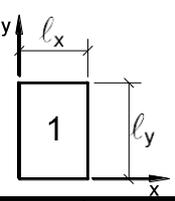
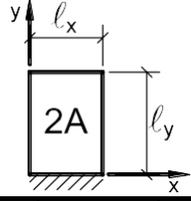
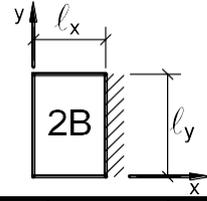
RUDLOFF **Concreto Protendido**. 2015. Catálogo próprio retirado do site Rudloff, 2022.

SILVA, M. A. F. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005 - Dissertação de mestrado - UFSCAR, São Carlos, 2005.

SPOHR, V. H. **Análise comparativa: Sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas**. 2008 - Dissertação de mestrado - UFSM, Santa Maria, 2008.

YIN, R. **Estudo de caso: Planejamento e Métodos**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Bookman, 2001.

11 ANEXO A – TABELAS CLASSIFICATÓRIAS DE LAJES CONFORME OS MOMENTOS FLETORES

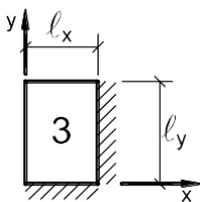
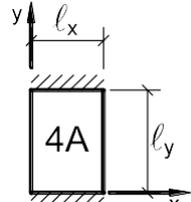
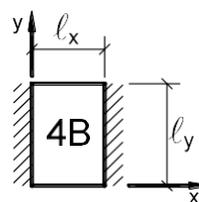
Tabela A-8									
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME									
Tipo									Tipo
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	μ_x	μ_y	μ_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$
1,00	4,23	4,23	2,91	3,54	8,40	3,54	8,40	2,91	1,00
1,05	4,62	4,25	3,26	3,64	8,79	3,77	8,79	2,84	1,05
1,10	5,00	4,27	3,61	3,74	9,18	3,99	9,17	2,76	1,10
1,15	5,38	4,25	3,98	3,80	9,53	4,19	9,49	2,68	1,15
1,20	5,75	4,22	4,35	3,86	9,88	4,38	9,80	2,59	1,20
1,25	6,10	4,17	4,72	3,89	10,16	4,55	10,06	2,51	1,25
1,30	6,44	4,12	5,09	3,92	10,41	4,71	10,32	2,42	1,30
1,35	6,77	4,06	5,44	3,93	10,64	4,86	10,54	2,34	1,35
1,40	7,10	4,00	5,79	3,94	10,86	5,00	10,75	2,25	1,40
1,45	7,41	3,95	6,12	3,91	11,05	5,12	10,92	2,19	1,45
1,50	7,72	3,89	6,45	3,88	11,23	5,24	11,09	2,12	1,50
1,55	7,99	3,82	6,76	3,85	11,39	5,34	11,23	2,04	1,55
1,60	8,26	3,74	7,07	3,81	11,55	5,44	11,36	1,95	1,60
1,65	8,50	3,66	7,28	3,78	11,67	5,53	11,48	1,87	1,65
1,70	8,74	3,58	7,49	3,74	11,79	5,61	11,60	1,79	1,70
1,75	8,95	3,53	7,53	3,69	11,88	5,68	11,72	1,74	1,75
1,80	9,16	3,47	7,56	3,63	11,96	5,75	11,84	1,68	1,80
1,85	9,35	3,38	8,10	3,58	12,05	5,81	11,94	1,67	1,85
1,90	9,54	3,29	8,63	3,53	12,14	5,86	12,03	1,59	1,90
1,95	9,73	3,23	8,86	3,45	12,17	5,90	12,08	1,54	1,95
2,00	9,91	3,16	9,08	3,36	12,20	5,94	12,13	1,48	2,00
> 2,00	12,50	3,16	12,50	3,36	12,20	7,03	12,50	1,48	> 2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994).

$$M = \mu \frac{p l_x^2}{100}$$

p = carga uniforme x = menor vão

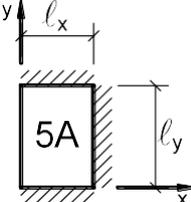
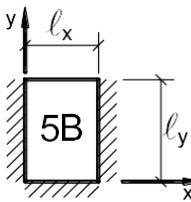
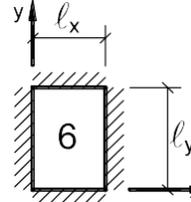
Fonte: Bastos (2021)

Tabela A-9											
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME											
Tipo											Tipo
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$
1,00	2,69	6,99	2,69	6,99	2,01	3,09	6,99	3,09	6,99	2,01	1,00
1,05	2,94	7,43	2,68	7,18	2,32	3,23	7,43	3,22	7,20	1,92	1,05
1,10	3,19	7,87	2,67	7,36	2,63	3,36	7,87	3,35	7,41	1,83	1,10
1,15	3,42	8,28	2,65	7,50	2,93	3,46	8,26	3,46	7,56	1,73	1,15
1,20	3,65	8,69	2,62	7,63	3,22	3,56	8,65	3,57	7,70	1,63	1,20
1,25	3,86	9,03	2,56	7,72	3,63	3,64	9,03	3,66	7,82	1,56	1,25
1,30	4,06	9,37	2,50	7,81	3,99	3,72	9,33	3,74	7,93	1,49	1,30
1,35	4,24	9,65	2,45	7,88	4,34	3,77	9,69	3,80	8,02	1,41	1,35
1,40	4,42	9,93	2,39	7,94	4,69	3,82	10,00	3,86	8,11	1,33	1,40
1,45	4,58	10,17	2,32	8,00	5,03	3,86	10,25	3,91	8,13	1,26	1,45
1,50	4,73	10,41	2,25	8,06	5,37	3,90	10,49	3,96	8,15	1,19	1,50
1,55	4,86	10,62	2,16	8,09	5,70	3,90	10,70	4,00	8,20	1,14	1,55
1,60	4,99	10,82	2,07	8,12	6,03	3,89	10,91	4,04	8,25	1,08	1,60
1,65	5,10	10,99	1,99	8,14	6,35	3,85	11,08	4,07	8,28	1,03	1,65
1,70	5,21	11,16	1,91	8,15	6,67	3,81	11,24	4,10	8,30	0,98	1,70
1,75	5,31	11,30	1,85	8,16	6,97	3,79	11,39	4,12	8,31	0,95	1,75
1,80	5,40	11,43	1,78	8,17	7,27	3,76	11,53	4,14	8,32	0,91	1,80
1,85	5,48	11,55	1,72	8,17	7,55	3,72	11,65	4,15	8,33	0,87	1,85
1,90	5,56	11,67	1,66	8,18	7,82	3,67	11,77	4,16	8,33	0,83	1,90
1,95	5,63	11,78	1,63	8,19	8,09	3,60	11,83	4,16	8,33	0,80	1,95
2,00	5,70	11,89	1,60	8,20	8,35	3,52	11,88	4,17	8,33	0,76	2,00
> 2,00	7,03	12,50	1,60	8,20	12,50	3,52	11,88	4,17	8,33	0,76	> 2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994).

$M = \mu \frac{p l_x^2}{100}$ $p =$ carga uniforme $x =$ menor vão

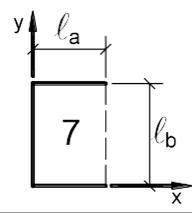
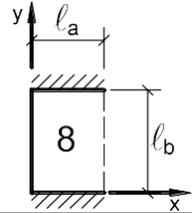
Fonte: Bastos (2021)

Tabela A-10													
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME													
Tipo													Tipo
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$
1,00	2,02	5,46	2,52	6,17	2,52	6,17	2,02	5,46	2,02	5,15	2,02	5,15	1,00
1,05	2,27	5,98	2,56	6,46	2,70	6,47	1,97	5,56	2,22	5,50	2,00	5,29	1,05
1,10	2,52	6,50	2,60	6,75	2,87	6,76	1,91	5,65	2,42	5,85	1,98	5,43	1,10
1,15	2,76	7,11	2,63	6,97	3,02	6,99	1,84	5,70	2,65	6,14	1,94	5,51	1,15
1,20	3,00	7,72	2,65	7,19	3,16	7,22	1,77	5,75	2,87	6,43	1,89	5,59	1,20
1,25	3,23	8,31	2,64	7,36	3,28	7,40	1,70	5,75	2,97	6,67	1,83	5,64	1,25
1,30	3,45	8,59	2,61	7,51	3,40	7,57	1,62	5,76	3,06	6,90	1,77	5,68	1,30
1,35	3,66	8,74	2,57	7,63	3,50	7,70	1,55	5,75	3,19	7,09	1,71	5,69	1,35
1,40	3,86	8,88	2,53	7,74	3,59	7,82	1,47	5,74	3,32	7,28	1,65	5,70	1,40
1,45	4,05	9,16	2,48	7,83	3,67	7,91	1,41	5,73	3,43	7,43	1,57	5,71	1,45
1,50	4,23	9,44	2,43	7,91	3,74	8,00	1,35	5,72	3,53	7,57	1,49	5,72	1,50
1,55	4,39	9,68	2,39	7,98	3,80	8,07	1,29	5,69	3,61	7,68	1,43	5,72	1,55
1,60	4,55	9,91	2,34	8,02	3,86	8,14	1,23	5,66	3,69	7,79	1,36	5,72	1,60
1,65	4,70	10,13	2,28	8,03	3,91	8,20	1,18	5,62	3,76	7,88	1,29	5,72	1,65
1,70	4,84	10,34	2,22	8,10	3,95	8,25	1,13	5,58	3,83	7,97	1,21	5,72	1,70
1,75	4,97	10,53	2,15	8,13	3,99	8,30	1,07	5,56	3,88	8,05	1,17	5,72	1,75
1,80	5,10	10,71	2,08	8,17	4,02	8,34	1,00	5,54	3,92	8,12	1,13	5,72	1,80
1,85	5,20	10,88	2,02	8,16	4,05	8,38	0,97	5,55	3,96	8,18	1,07	5,72	1,85
1,90	5,30	11,04	1,96	8,14	4,08	8,42	0,94	5,56	3,99	8,24	1,01	5,72	1,90
1,95	5,40	11,20	1,88	8,13	4,10	8,45	0,91	5,60	4,02	8,29	0,99	5,72	1,95
2,00	5,50	11,35	1,80	8,12	4,12	8,47	0,88	5,64	4,05	8,33	0,96	5,72	2,00
> 2,00	7,03	12,50	1,80	8,12	4,17	8,33	0,88	5,64	4,17	8,33	0,96	5,72	> 2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994).

$M = \mu \frac{p l_x^2}{100}$ $p =$ carga uniforme $x =$ menor vão

Fonte: Bastos (2021)

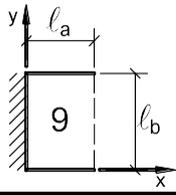
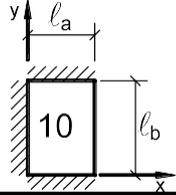
Tabela A-11									
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME									
Tipo							Tipo		
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ_y	μ_{yb}	μ'_y	μ'_{yb}	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
0,30	11,33	15,89	28,44	10,44	14,22	25,55	41,89	77,00	0,30
0,35	10,63	15,60	27,19	8,85	12,86	22,37	35,69	62,94	0,35
0,40	9,94	15,31	25,94	7,25	11,50	19,19	29,50	48,88	0,40
0,45	9,13	14,48	24,47	6,22	10,39	16,82	25,89	41,36	0,45
0,50	8,32	13,64	23,00	5,20	9,28	14,44	22,28	33,84	0,50
0,55	7,58	12,95	21,56	4,57	8,35	12,82	19,64	28,76	0,55
0,60	6,83	12,25	20,11	3,94	7,42	11,19	17,00	23,67	0,60
0,65	6,21	11,59	18,71	3,46	6,76	9,94	15,26	20,55	0,65
0,70	5,59	10,92	17,31	2,98	6,10	8,69	13,51	17,43	0,70
0,75	5,09	10,24	15,86	2,61	5,54	7,77	12,28	15,38	0,75
0,80	4,59	9,55	14,41	2,23	4,98	6,84	11,05	13,33	0,80
0,85	4,16	9,09	13,61	1,96	4,65	6,15	10,12	11,91	0,85
0,90	3,73	8,63	12,80	1,68	4,31	5,46	9,19	10,49	0,90
0,95	3,39	8,14	11,94	1,47	3,97	4,96	8,45	9,49	0,95
1,00	3,05	7,64	11,08	1,26	3,62	4,45	7,71	8,48	1,00
1,05	3,05	7,94	11,31	1,23	3,68	4,45	7,80	8,48	1,05
1,10	3,06	8,24	11,55	1,19	3,74	4,46	7,88	8,47	1,10
1,15	3,06	8,53	11,78	1,16	3,80	4,47	7,97	8,46	1,15
1,20	3,07	8,83	12,01	1,12	3,86	4,47	8,05	8,46	1,20
1,25	3,03	9,01	12,12	1,09	3,90	4,47	8,09	8,46	1,25
1,30	3,00	9,19	12,22	1,06	3,93	4,47	8,13	8,46	1,30
1,35	2,97	9,38	12,33	1,03	3,97	4,48	8,17	8,46	1,35
1,40	2,94	9,56	12,43	0,99	4,01	4,48	8,20	8,45	1,40
1,45	2,91	9,74	12,54	0,96	4,05	4,49	8,24	8,45	1,45
1,50	2,88	9,92	12,64	0,92	4,08	4,49	8,28	8,45	1,50
1,55	2,84	10,04	12,69	0,90	4,09	4,49	8,29	8,45	1,55
1,60	2,81	10,16	12,74	0,88	4,10	4,49	8,29	8,45	1,60
1,65	2,77	10,29	12,80	0,86	4,11	4,49	8,30	8,45	1,65
1,70	2,74	10,41	12,85	0,84	4,12	4,49	8,30	8,45	1,70
1,75	2,70	10,53	12,90	0,82	4,13	4,50	8,31	8,45	1,75
1,80	2,66	10,65	12,95	0,80	4,13	4,50	8,31	8,45	1,80
1,85	2,63	10,77	13,00	0,78	4,14	4,50	8,32	8,45	1,85
1,90	2,59	10,90	13,06	0,76	4,15	4,50	8,32	8,45	1,90
1,95	2,56	11,02	13,11	0,74	4,16	4,50	8,33	8,45	1,95
2,00	2,52	11,14	13,16	0,72	4,17	4,50	8,33	8,45	2,00
> 2,00	2,52	12,50	13,16	0,72	4,17	4,50	8,33	8,45	> 2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

p = carga uniforme = menor valor entre a e b

M_b = momento ao longo da borda livre

Fonte: Bastos (2021)

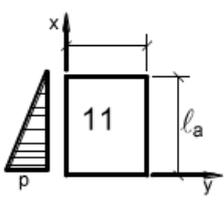
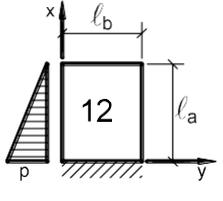
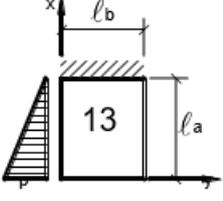
Tabela A-12												
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME												
Tipo											Tipo	
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_{yb}	μ'_y	μ'_{yb}	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	
< 0,30	-12,50	50,00	0,78	6,22	-12,5	50,00	2,11	8,67	14,56	37,00	< 0,30	
0,30	-7,33	43,08	0,78	6,22	-4,89	38,33	2,11	8,67	14,56	37,00	0,30	
0,35	-5,17	39,98	1,89	7,89	-2,57	33,08	3,18	9,74	14,84	35,53	0,35	
0,40	-3,00	36,87	3,00	9,56	-0,25	27,83	4,25	10,81	15,13	34,06	0,40	
0,45	-1,78	33,89	3,62	10,54	0,54	23,94	4,53	10,77	14,26	31,21	0,45	
0,50	-0,56	30,91	4,24	11,52	1,32	20,04	4,80	10,72	13,40	28,36	0,50	
0,55	0,25	28,02	4,62	11,82	1,62	17,40	4,86	9,99	12,48	25,26	0,55	
0,60	1,06	25,13	5,00	12,11	1,92	14,76	4,92	9,25	11,56	22,17	0,60	
0,65	1,47	22,90	5,25	12,12	1,91	12,91	4,68	8,55	10,81	19,63	0,65	
0,70	1,88	20,66	5,49	12,12	1,90	11,06	4,43	7,84	10,06	17,08	0,70	
0,75	2,06	18,84	5,61	11,81	1,82	9,86	4,14	7,15	9,42	15,17	0,75	
0,80	2,23	17,02	5,72	11,50	1,73	8,65	3,86	6,45	8,77	13,25	0,80	
0,85	2,26	15,59	5,66	11,05	1,64	7,78	3,59	5,86	8,19	11,87	0,85	
0,90	2,28	14,16	5,60	10,59	1,54	6,91	3,33	5,26	7,60	10,49	0,90	
0,95	2,25	12,99	5,48	10,07	1,40	6,25	3,11	4,81	7,12	9,50	0,95	
1,00	2,21	11,82	5,36	9,55	1,25	5,59	2,88	4,35	6,64	8,51	1,00	
1,05	2,33	11,91	5,72	9,91	1,25	5,59	2,98	4,37	6,82	8,50	1,05	
1,10	2,45	12,00	6,08	10,27	1,24	5,58	3,08	4,39	6,99	8,50	1,10	
1,15	2,57	12,08	6,44	10,62	1,24	5,58	3,18	4,41	7,17	6,49	1,15	
1,20	2,69	12,17	6,80	10,98	1,24	5,57	3,27	4,43	7,34	8,48	1,20	
1,25	2,67	12,20	7,09	11,20	1,20	5,57	3,34	4,44	7,44	8,48	1,25	
1,30	2,64	12,22	7,37	11,42	1,17	5,57	3,41	4,45	7,54	8,47	1,30	
1,35	2,62	12,25	7,55	11,64	1,14	5,57	3,49	4,46	7,64	8,47	1,35	
1,40	2,59	12,28	7,93	11,85	1,11	5,58	3,56	4,47	7,73	8,47	1,40	
1,45	2,57	12,31	8,22	12,07	1,09	5,58	3,63	4,48	7,83	8,46	1,45	
1,50	2,54	12,33	8,50	12,29	1,06	5,58	3,70	4,49	7,93	8,46	1,50	
1,55	2,56	12,35	8,68	12,37	1,04	5,58	3,74	4,49	7,97	8,46	1,55	
1,60	2,58	12,36	8,86	12,45	1,01	5,58	3,77	4,49	8,00	8,46	1,60	
1,65	2,59	12,38	9,04	12,53	0,99	5,57	3,81	4,49	8,04	8,46	1,65	
1,70	2,61	12,39	9,22	12,61	0,97	5,57	3,84	4,49	8,08	8,46	1,70	
1,75	2,63	12,41	9,41	12,68	0,95	5,57	3,88	4,50	8,12	8,46	1,75	
1,80	2,65	12,42	9,59	12,76	0,93	5,57	3,92	4,50	8,15	8,45	1,80	
1,85	2,67	12,44	9,76	12,84	0,91	5,57	3,95	4,50	8,19	8,45	1,85	
1,90	2,68	12,45	9,94	12,92	0,88	5,56	3,99	4,50	8,23	8,45	1,90	
1,95	2,70	12,47	10,13	13,00	0,86	5,56	4,02	4,50	8,26	8,45	1,95	
2,00	2,72	12,48	10,31	13,08	0,84	5,56	4,06	4,50	8,30	8,45	2,00	
> 2,00	2,72	12,48	12,50	13,08	0,84	5,56	4,17	4,50	8,33	8,45	> 2,00	

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

p = carga uniforme = menor valor entre a e b

M_b = momento ao longo da borda livre

Fonte: Bastos (2021)

Tabela A-13									
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR									
Tipo									Tipo
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ_y	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_x	μ'_x	μ_y	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
< 0,50	6,41	1,60	2,98	6,67	0,92	4,23	5,83	1,28	< 0,50
0,50	5,14	1,60	2,81	6,53	0,92	3,94	5,60	1,28	0,50
0,55	4,83	1,72	2,73	6,41	0,99	3,80	5,46	1,31	0,55
0,60	4,52	1,83	2,65	6,29	1,06	3,66	5,31	1,33	0,60
0,65	4,21	1,92	2,54	6,13	1,12	3,49	5,11	1,39	0,65
0,70	3,90	2,00	2,43	5,97	1,16	3,32	4,90	1,45	0,70
0,75	3,63	2,05	2,31	5,79	1,21	3,15	4,68	1,50	0,75
0,80	3,35	2,09	2,19	5,61	1,23	2,98	4,46	1,55	0,80
0,85	3,11	2,12	2,07	5,42	1,26	2,83	4,24	1,59	0,85
0,90	2,86	2,14	1,94	5,23	1,28	2,67	4,02	1,63	0,90
0,95	2,64	2,13	1,83	5,09	1,31	2,52	3,77	1,67	0,95
1,00	2,41	2,12	1,72	4,95	1,34	2,36	3,52	1,70	1,00
1,05	2,47	2,32	1,78	5,20	1,51	2,44	3,64	1,92	1,05
1,10	2,53	2,51	1,84	5,44	1,68	2,53	3,75	2,13	1,10
1,15	2,58	2,71	1,90	5,68	1,87	2,60	3,86	2,34	1,15
1,20	2,64	2,90	1,96	5,92	2,05	2,68	3,96	2,55	1,20
1,25	2,66	3,10	2,00	6,13	2,23	2,73	4,02	2,76	1,25
1,30	2,70	3,28	2,06	6,37	2,40	2,79	4,07	2,96	1,30
1,35	2,73	3,46	2,10	6,59	2,58	2,83	4,09	3,17	1,35
1,40	2,76	3,64	2,14	6,80	2,75	2,86	4,12	3,37	1,40
1,45	2,79	3,81	2,17	7,00	2,92	2,89	4,14	3,56	1,45
1,50	2,81	3,97	2,21	7,20	3,08	2,93	4,16	3,74	1,50
1,55	2,84	4,12	2,23	7,38	3,24	2,95	4,17	3,92	1,55
1,60	2,87	4,27	2,25	7,55	3,39	2,97	4,17	4,09	1,60
1,65	2,85	4,43	2,25	7,66	3,56	2,95	4,12	4,27	1,65
1,70	2,83	4,59	2,25	7,76	3,72	2,94	4,08	4,46	1,70
1,75	2,84	4,72	2,27	7,92	3,85	2,96	4,06	4,60	1,75
1,80	2,85	4,85	2,30	8,07	3,98	2,98	4,05	4,74	1,80
1,85	2,84	4,98	2,33	8,18	4,11	2,97	4,01	4,89	1,85
1,90	2,84	5,11	2,35	8,29	4,23	2,96	3,97	5,03	1,90
1,95	2,80	5,24	2,34	8,34	4,36	2,92	3,87	5,18	1,95
2,00	2,78	5,36	2,32	8,40	4,48	2,88	3,76	5,32	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$M = \mu \frac{p l^2}{6}$

= menor valor entre a e b

Fonte: Bastos (2021)

Tabela A-14												
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR												
Tipo											Tipo	
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ'_{xi}	μ'_{xs}	μ_y	μ_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
< 0,50	2,15	5,00	3,33	0,68	6,41	1,80	6,12	2,98	6,67	0,96	3,60	< 0,50
0,50	2,13	5,12	3,36	0,68	4,42	1,80	6,12	2,59	6,14	0,96	3,60	0,50
0,55	2,11	5,09	3,35	0,73	3,97	1,87	5,87	2,43	5,90	0,93	3,59	0,55
0,60	2,08	5,06	3,33	0,78	3,52	1,94	5,61	2,27	5,65	0,89	3,58	0,60
0,65	2,04	5,00	3,29	0,83	3,15	1,96	5,42	2,10	5,35	1,03	3,53	0,65
0,70	1,99	4,93	3,24	0,88	2,78	1,98	5,22	1,92	5,05	1,16	3,47	0,70
0,75	1,93	4,83	3,17	0,92	2,52	1,94	4,99	1,75	4,75	1,21	3,38	0,75
0,80	1,87	4,72	3,09	0,95	2,26	1,89	4,75	1,57	4,45	1,25	3,28	0,80
0,85	1,81	4,64	3,00	0,97	2,08	1,83	4,49	1,45	4,47	1,24	3,17	0,85
0,90	1,74	4,56	2,90	0,99	1,86	1,77	4,23	1,33	3,89	1,23	3,06	0,90
0,95	1,67	4,44	2,79	1,00	1,69	1,69	3,99	1,22	3,65	1,21	2,96	0,95
1,00	1,60	4,32	2,67	1,01	1,51	1,62	3,75	1,11	3,40	1,19	2,85	1,00
1,05	1,70	4,64	2,81	1,18	1,52	1,72	3,89	1,13	3,50	1,29	3,03	1,05
1,10	1,79	4,96	2,94	1,34	1,54	1,81	4,02	1,15	3,60	1,38	3,20	1,10
1,15	1,87	5,23	3,03	1,51	1,55	1,89	4,14	1,15	3,69	1,47	3,36	1,15
1,20	1,94	5,50	3,15	1,67	1,56	1,97	4,26	1,16	3,78	1,54	3,51	1,20
1,25	2,02	5,75	3,23	1,84	1,53	2,04	4,38	1,16	3,84	1,61	3,66	1,25
1,30	2,06	6,05	3,31	2,02	1,52	2,10	4,46	1,17	3,94	1,67	3,78	1,30
1,35	2,11	6,33	3,35	2,21	1,50	2,17	4,57	1,18	3,99	1,73	3,92	1,35
1,40	2,15	6,61	3,39	2,39	1,47	2,23	4,67	1,19	4,05	1,79	4,05	1,40
1,45	2,18	6,82	3,45	2,56	1,46	2,28	4,75	1,20	4,11	1,84	4,16	1,45
1,50	2,21	7,04	3,51	2,72	1,44	2,32	4,82	1,21	4,18	1,90	4,27	1,50
1,55	2,22	7,21	3,56	2,88	1,42	2,36	4,94	1,22	4,22	1,96	4,36	1,55
1,60	2,23	7,37	3,61	3,03	1,41	2,40	5,06	1,23	4,27	2,02	4,46	1,60
1,65	2,22	7,49	3,63	3,20	1,37	2,44	5,15	1,23	4,30	2,08	4,55	1,65
1,70	2,22	7,60	3,64	3,37	1,33	2,47	5,23	1,23	4,33	2,13	4,63	1,70
1,75	2,24	7,77	3,68	3,51	1,31	2,49	5,32	1,25	4,38	2,18	4,69	1,75
1,80	2,27	7,94	3,73	3,66	1,30	2,51	5,41	1,26	4,44	2,23	4,75	1,80
1,85	2,29	8,08	3,74	3,81	1,26	2,53	5,49	1,26	4,48	2,28	4,81	1,85
1,90	2,31	8,23	3,75	3,95	1,23	2,54	5,57	1,26	4,51	2,33	4,86	1,90
1,95	2,30	8,32	3,74	4,10	1,17	2,56	5,65	1,25	4,50	2,38	4,92	1,95
2,00	2,28	8,40	3,72	4,24	1,12	2,58	5,72	1,24	4,48	2,43	4,98	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

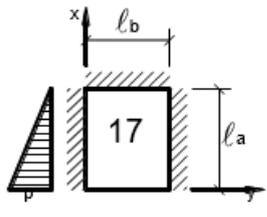
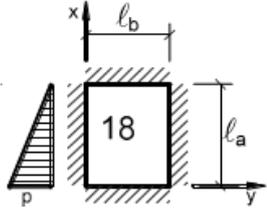
$M = \mu \frac{p l^2}{8}$

= menor valor entre a e b

Fonte: Bastos (2021)

Tabela A-15

MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR

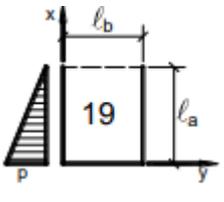
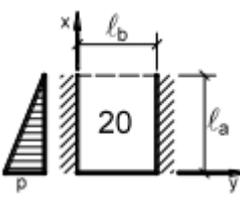
Tipo									Tipo	
	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_{xi}	μ'_{xs}		μ_{iy}
< 0,50	4,23	5,83	1,16	4,64	2,15	5,00	3,33	0,80	2,92	< 0,50
0,50	3,62	5,12	1,16	4,64	2,07	4,94	3,23	0,80	2,92	0,50
0,55	3,38	4,83	1,23	4,61	1,99	4,84	3,16	0,79	2,95	0,55
0,60	3,13	4,53	1,31	4,58	1,91	4,74	3,08	0,78	2,97	0,60
0,65	2,90	4,18	1,39	4,53	1,81	4,59	2,93	0,80	2,98	0,65
0,70	2,67	3,82	1,47	4,47	1,70	4,44	2,78	0,82	2,98	0,70
0,75	2,47	3,48	1,52	4,33	1,62	4,26	2,62	0,87	2,94	0,75
0,80	2,27	3,13	1,56	4,19	1,53	4,08	2,45	0,92	2,91	0,80
0,85	2,08	2,84	1,55	4,02	1,44	3,89	2,28	0,97	2,89	0,85
0,90	1,88	2,55	1,54	3,85	1,34	3,70	2,11	1,01	2,86	0,90
0,95	1,72	2,30	1,52	3,73	1,24	3,50	1,94	1,02	2,78	0,95
1,00	1,55	2,05	1,49	3,61	1,14	3,30	1,76	1,03	2,70	1,00
1,05	1,58	1,99	1,60	3,75	1,17	3,43	1,75	1,14	2,90	1,05
1,10	1,60	1,93	1,71	3,89	1,20	3,56	1,75	1,25	3,09	1,10
1,15	1,60	1,90	1,80	4,03	1,21	3,66	1,73	1,34	3,26	1,15
1,20	1,59	1,86	1,89	4,18	1,22	3,76	1,73	1,42	3,43	1,20
1,25	1,56	1,80	1,98	4,32	1,20	3,83	1,69	1,51	3,59	1,25
1,30	1,57	1,76	2,05	4,46	1,22	3,92	1,67	1,58	3,74	1,30
1,35	1,56	1,69	2,12	4,61	1,21	3,98	1,63	1,66	3,90	1,35
1,40	1,55	1,63	2,19	4,75	1,20	4,04	1,59	1,74	4,05	1,40
1,45	1,55	1,58	2,25	4,87	1,21	4,11	1,56	1,81	4,17	1,45
1,50	1,55	1,54	2,30	4,98	1,22	4,18	1,53	1,88	4,28	1,50
1,55	1,55	1,49	2,35	5,08	1,22	4,22	1,49	1,95	4,38	1,55
1,60	1,55	1,43	2,40	5,18	1,23	4,27	1,45	2,01	4,48	1,60
1,65	1,54	1,38	2,44	5,28	1,23	4,30	1,40	2,07	4,56	1,65
1,70	1,53	1,33	2,49	5,38	1,23	4,33	1,35	2,13	4,65	1,70
1,75	1,53	1,31	2,51	5,47	1,25	4,38	1,33	2,17	4,71	1,75
1,80	1,52	1,30	2,53	5,55	1,26	4,44	1,30	2,21	4,77	1,80
1,85	1,48	1,26	2,56	5,64	1,26	4,48	1,26	2,25	4,83	1,85
1,90	1,44	1,23	2,58	5,73	1,26	4,51	1,23	2,29	4,88	1,90
1,95	1,40	1,17	2,61	5,82	1,25	4,50	1,15	2,33	4,94	1,95
2,00	1,36	1,12	2,63	5,91	1,24	4,48	1,08	2,37	5,00	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$$M = \frac{p \cdot l_a^2}{100}$$

= menor valor entre a e b

Fonte: Bastos (2021)

Tabela A-16									
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR									
Tipo							Tipo		
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ_y	μ_{yb}	μ'_y	μ'_{yb}	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
0,30	5,78	5,78	9,56	5,89	5,00	8,11	15,33	23,56	0,30
0,35	5,49	5,67	9,09	5,32	4,66	7,15	13,48	18,87	0,35
0,40	5,19	5,56	8,63	4,75	4,31	6,19	11,63	14,19	0,40
0,45	4,80	5,30	8,11	4,16	3,96	5,39	10,35	11,65	0,45
0,50	4,40	5,04	7,60	3,56	3,60	4,60	9,08	9,12	0,50
0,55	4,05	4,97	7,05	3,09	3,33	3,95	8,16	7,37	0,55
0,60	3,69	4,89	6,50	2,61	3,06	3,31	7,28	5,61	0,60
0,65	3,39	4,54	6,02	2,28	2,82	2,86	6,64	4,62	0,65
0,70	3,08	4,18	5,53	1,94	2,59	2,41	6,00	3,63	0,70
0,75	2,83	4,01	5,09	1,72	2,41	2,09	5,52	3,03	0,75
0,80	2,58	3,83	4,64	1,50	2,22	1,77	5,03	2,42	0,80
0,85	2,36	3,63	4,25	1,31	2,07	1,54	4,64	2,03	0,85
0,90	2,13	3,43	3,86	1,12	1,91	1,31	4,25	1,63	0,90
0,95	1,95	3,27	3,57	1,00	1,79	1,14	3,95	1,38	0,95
1,00	1,76	3,10	3,27	0,87	1,67	0,96	3,65	1,13	1,00
1,05	1,77	3,25	3,29	0,84	1,72	0,93	3,72	1,08	1,05
1,10	1,77	3,40	3,31	0,82	1,77	0,90	3,79	1,03	1,10
1,15	1,78	3,55	3,32	0,79	1,82	0,86	3,86	0,97	1,15
1,20	1,79	3,70	3,34	0,76	1,87	0,83	3,93	0,92	1,20
1,25	1,77	3,82	3,31	0,74	1,90	0,80	3,97	0,88	1,25
1,30	1,75	3,93	3,27	0,71	1,92	0,77	4,00	0,85	1,30
1,35	1,74	4,05	3,24	0,69	1,95	0,74	4,04	0,81	1,35
1,40	1,72	4,17	3,21	0,66	1,98	0,70	4,07	0,77	1,40
1,45	1,70	4,26	3,17	0,63	2,00	0,67	4,11	0,74	1,45
1,50	1,69	4,40	3,14	0,61	2,03	0,64	4,14	0,70	1,50
1,55	1,66	4,48	3,10	0,59	2,04	0,62	4,15	0,68	1,55
1,60	1,64	4,56	3,06	0,57	2,04	0,60	4,16	0,65	1,60
1,65	1,61	4,64	3,02	0,55	2,05	0,57	4,17	0,63	1,65
1,70	1,59	4,72	2,98	0,53	2,05	0,55	4,18	0,60	1,70
1,75	1,56	4,80	2,95	0,50	2,06	0,53	4,20	0,58	1,75
1,80	1,54	4,88	2,91	0,48	2,07	0,51	4,21	0,56	1,80
1,85	1,51	4,96	2,87	0,46	2,07	0,49	4,22	0,53	1,85
1,90	1,50	5,04	2,83	0,44	2,08	0,46	4,23	0,51	1,90
1,95	1,47	5,12	2,79	0,42	2,08	0,44	4,24	0,48	1,95
2,00	1,44	5,20	2,75	0,40	2,09	0,42	4,25	0,46	2,00

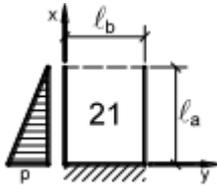
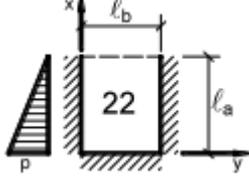
Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$$M = \mu \frac{p \ell^2}{6}$$

= menor valor entre a e b

Tabela A-17

MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR

Tipo									Tipo		
	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ'_x	μ_y		μ_{yb}	μ'_y
< 0,30	-4,17	16,67	0,33	1,67	-4,17	16,67	0,78	2,67	5,33	9,22	< 0,30
0,30	-1,67	15,04	0,33	1,67	-0,89	13,69	0,78	2,67	5,33	9,22	0,30
0,35	-0,81	14,23	0,64	2,12	-0,32	12,58	1,05	2,83	5,14	8,71	0,35
0,40	0,06	13,42	0,94	2,56	0,25	11,47	1,31	3,00	4,94	8,19	0,40
0,45	0,49	12,50	1,17	2,82	0,53	10,32	1,42	2,86	4,81	7,25	0,45
0,50	0,92	11,58	1,40	3,08	0,80	9,16	1,52	2,72	4,68	6,23	0,50
0,55	1,10	10,81	1,58	3,24	0,97	8,22	1,58	2,51	4,56	5,47	0,55
0,60	1,28	10,03	1,75	3,39	1,14	7,28	1,64	2,31	4,44	4,61	0,60
0,65	1,37	9,34	1,86	3,35	1,18	6,47	1,65	2,09	4,28	3,98	0,65
0,70	1,45	8,64	1,96	3,31	1,22	5,65	1,65	1,88	4,12	3,35	0,70
0,75	1,48	8,05	2,01	3,22	1,22	5,09	1,64	1,71	3,94	2,89	0,75
0,80	1,50	7,46	2,07	3,13	1,22	4,53	1,63	1,55	3,77	2,44	0,80
0,85	1,47	7,01	2,05	2,98	1,16	4,22	1,55	1,39	3,56	2,07	0,85
0,90	1,43	6,55	2,03	2,83	1,10	3,90	1,47	1,22	3,36	1,70	0,90
0,95	1,39	6,15	2,00	2,67	1,01	3,68	1,38	1,09	3,18	1,45	0,95
1,00	1,35	5,74	1,97	2,51	0,91	3,45	1,29	0,95	3,01	1,19	1,00
1,05	1,40	5,93	2,14	2,60	0,90	3,52	1,34	0,92	3,13	1,14	1,05
1,10	1,45	6,12	2,31	2,70	0,89	3,50	1,39	0,89	3,24	1,10	1,10
1,15	1,49	6,30	2,48	2,79	0,88	3,67	1,43	0,85	3,36	1,05	1,15
1,20	1,54	6,49	2,65	2,88	0,86	3,74	1,48	0,82	3,47	1,00	1,20
1,25	1,57	6,65	2,78	2,88	0,83	3,80	1,52	0,79	3,53	0,96	1,25
1,30	1,59	6,80	2,95	2,88	0,80	3,86	1,55	0,76	3,59	0,91	1,30
1,35	1,61	6,96	3,10	2,88	0,77	3,92	1,59	0,73	3,65	0,87	1,35
1,40	1,64	7,11	3,24	2,88	0,74	3,98	1,62	0,69	3,70	0,83	1,40
1,45	1,66	7,27	3,39	2,88	0,71	4,04	1,66	0,66	3,76	0,78	1,45
1,50	1,69	7,43	3,54	2,88	0,68	4,10	1,69	0,63	3,82	0,74	1,50
1,55	1,68	7,53	3,65	2,86	0,66	4,13	1,72	0,61	3,85	0,71	1,55
1,60	1,67	7,64	3,76	2,84	0,64	4,17	1,75	0,59	3,88	0,68	1,60
1,65	1,66	7,74	3,87	2,82	0,62	4,21	1,76	0,56	3,91	0,66	1,65
1,70	1,65	7,85	3,98	2,80	0,60	4,25	1,78	0,54	3,94	0,63	1,70
1,75	1,64	7,95	4,09	2,78	0,58	4,29	1,80	0,52	3,97	0,60	1,75
1,80	1,64	8,06	4,19	2,75	0,56	4,33	1,82	0,50	4,00	0,57	1,80
1,85	1,63	8,16	4,30	2,73	0,54	4,37	1,84	0,48	4,03	0,54	1,85
1,90	1,62	8,27	4,41	2,71	0,52	4,40	1,87	0,45	4,06	0,52	1,90
1,95	1,61	8,38	4,52	2,69	0,50	4,44	1,89	0,43	4,09	0,49	1,95
2,00	1,60	8,48	4,63	2,67	0,48	4,48	1,91	0,41	4,12	0,46	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$$M = \mu \frac{p \ell^2}{2}$$

= menor valor entre a e b

12 ANEXO B – TABELA DE COEFICIENTES DE CONCRETO E AÇO PARA CÁLCULO DE FLEXÃO SIMPLES EM SEÇÃO RETANGULAR DE ARMADURA SIMPLES

Tabela A-25 - Valores de K_c e K_s para o aço CA-50 (para concretos do Grupo I de resistência – $f_{ck} \leq 50$ MPa, $\gamma_c = 1,4$, $\gamma_s = 1,15$).

FLEXÃO SIMPLES EM SEÇÃO RETANGULAR - ARMADURA SIMPLES										Dom.
$\beta_x = \frac{x}{d}$	K_c (cm ² /kN)								K_s (cm ² /kN)	
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	CA-50	
0,01	137,8	103,4	82,7	68,9	59,1	51,7	45,9	41,3	0,023	2
0,02	69,2	51,9	41,5	34,6	29,6	25,9	23,1	20,8	0,023	
0,03	46,3	34,7	27,8	23,2	19,8	17,4	15,4	13,9	0,023	
0,04	34,9	26,2	20,9	17,4	14,9	13,1	11,6	10,5	0,023	
0,05	28,0	21,0	16,8	14,0	12,0	10,5	9,3	8,4	0,023	
0,06	23,4	17,6	14,1	11,7	10,0	8,8	7,8	7,0	0,024	
0,07	20,2	15,1	12,1	10,1	8,6	7,6	6,7	6,1	0,024	
0,08	17,7	13,3	10,6	8,9	7,6	6,6	5,9	5,3	0,024	
0,09	15,8	11,9	9,5	7,9	6,8	5,9	5,3	4,7	0,024	
0,10	14,3	10,7	8,6	7,1	6,1	5,4	4,8	4,3	0,024	
0,11	13,1	9,8	7,8	6,5	5,6	4,9	4,4	3,9	0,024	
0,12	12,0	9,0	7,2	6,0	5,1	4,5	4,0	3,6	0,024	
0,13	11,1	8,4	6,7	5,6	4,8	4,2	3,7	3,3	0,024	
0,14	10,4	7,8	6,2	5,2	4,5	3,9	3,5	3,1	0,024	
0,15	9,7	7,3	5,8	4,9	4,2	3,7	3,2	2,9	0,024	
0,16	9,2	6,9	5,5	4,6	3,9	3,4	3,1	2,7	0,025	
0,17	8,7	6,5	5,2	4,3	3,7	3,2	2,9	2,6	0,025	
0,18	8,2	6,2	4,9	4,1	3,5	3,1	2,7	2,5	0,025	
0,19	7,8	5,9	4,7	3,9	3,4	2,9	2,6	2,3	0,025	
0,20	7,5	5,6	4,5	3,7	3,2	2,8	2,5	2,2	0,025	
0,21	7,1	5,4	4,3	3,6	3,1	2,7	2,4	2,1	0,025	
0,22	6,8	5,1	4,1	3,4	2,9	2,6	2,3	2,1	0,025	
0,23	6,6	4,9	3,9	3,3	2,8	2,5	2,2	2,0	0,025	
0,24	6,3	4,7	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9	0,025	
0,25	6,1	4,6	3,7	3,1	2,6	2,3	2,0	1,8	0,026	
0,26	5,9	4,4	3,5	2,9	2,5	2,2	2,0	1,8	0,026	
0,27	5,7	4,3	3,4	2,8	2,4	2,1	1,9	1,7	0,026	
0,28	5,5	4,1	3,3	2,8	2,4	2,1	1,8	1,7	0,026	
0,29	5,4	4,0	3,2	2,7	2,3	2,0	1,8	1,6	0,026	
0,30	5,2	3,9	3,1	2,6	2,2	1,9	1,7	1,6	0,026	
0,31	5,1	3,8	3,0	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	0,026	
0,32	4,9	3,7	3,0	2,5	2,1	1,8	1,6	1,5	0,026	
0,33	4,8	3,6	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	0,026	
0,34	4,7	3,5	2,8	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	0,027	
0,35	4,6	3,4	2,7	2,3	2,0	1,7	1,5	1,4	0,027	
0,36	4,5	3,3	2,7	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	0,027	
0,37	4,4	3,3	2,6	2,2	1,9	1,6	1,5	1,3	0,027	
0,38	4,3	3,2	2,6	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	0,027	
0,40	4,1	3,1	2,5	2,0	1,8	1,5	1,4	1,2	0,027	
0,42	3,9	2,9	2,4	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	0,028	
0,44	3,8	2,8	2,3	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	0,028	
0,45	3,7	2,8	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	0,028	
0,46	3,7	2,7	2,2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,028	
0,48	3,5	2,7	2,1	1,8	1,5	1,3	1,2	1,1	0,028	
0,50	3,4	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,029	
0,52	3,3	2,5	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0	0,029	
0,54	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	0,029	
0,56	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,030	
0,58	3,1	2,3	1,8	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,030	
0,60	3,0	2,3	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,030	
0,62	2,9	2,2	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,031	
0,63	2,9	2,2	1,7	1,5	1,2	1,1	1,0	0,9	0,031	

Fonte: Bastos (2021)

13 ANEXO C – TABELA DE ÁREA DE ARMADURA POR METRO DE LARGURA

Tabela A-26						
ÁREA DE ARMADURA POR METRO DE LARGURA (cm ² /m)						
Espaçamento (cm)	Diâmetro Nominal (mm)					
	4,2	5	6,3	8	10	12,5
5	2,77	4,00	6,30	10,00	16,00	25,00
5,5	2,52	3,64	5,73	9,09	14,55	22,73
6	2,31	3,33	5,25	8,33	13,33	20,83
6,5	2,13	3,08	4,85	7,69	12,31	19,23
7	1,98	2,86	4,50	7,14	11,43	17,86
7,5	1,85	2,67	4,20	6,67	10,67	16,67
8	1,73	2,50	3,94	6,25	10,00	15,63
8,5	1,63	2,35	3,71	5,88	9,41	14,71
9	1,54	2,22	3,50	5,56	8,89	13,89
9,5	1,46	2,11	3,32	5,26	8,42	13,16
10	1,39	2,00	3,15	5,00	8,00	12,50
11	1,26	1,82	2,86	4,55	7,27	11,36
12	1,15	1,67	2,62	4,17	6,67	10,42
12,5	1,11	1,60	2,52	4,00	6,40	10,00
13	1,07	1,54	2,42	3,85	6,15	9,62
14	0,99	1,43	2,25	3,57	5,71	8,93
15	0,92	1,33	2,10	3,33	5,33	8,33
16	0,87	1,25	1,97	3,13	5,00	7,81
17	0,81	1,18	1,85	2,94	4,71	7,35
17,5	0,79	1,14	1,80	2,86	4,57	7,14
18	0,77	1,11	1,75	2,78	4,44	6,94
19	0,73	1,05	1,66	2,63	4,21	6,58
20	0,69	1,00	1,58	2,50	4,00	6,25
22	0,63	0,91	1,43	2,27	3,64	5,68
24	0,58	0,83	1,31	2,08	3,33	5,21
25	0,55	0,80	1,26	2,00	3,20	5,00
26	0,53	0,77	1,21	1,92	3,08	4,81
28	0,49	0,71	1,12	1,79	2,86	4,46
30	0,46	0,67	1,05	1,67	2,67	4,17
33	0,42	0,61	0,95	1,52	2,42	3,79

Elaborada por PINHEIRO (1994)
Diâmetros especificados pela NBR 7480.

Fonte: Bastos (2021)