

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO FERNANDES MENEZES

**PROJETO DE LAJE MACIÇA PROTENDIDA EM SISTEMA DE PÓS-TRAÇÃO
NÃO ADERENTE**

GOIÂNIA, GO

2026

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☒ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☐ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gustavo Fernandes Menezes

Matrícula: 20211011050044

Título do Trabalho: PROJETO DE LAJE MACIÇA PROTENDIDA EM SISTEMA DE PÓS-TRAÇÃO NÃO ADERENTE

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia-GO,
Local

24/02/2026
Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

GUSTAVO FERNANDES MENEZES

**PROJETO DE LAJE MACIÇA PROTENDIDA EM SISTEMA DE PÓS-TRAÇÃO
NÃO ADERENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à coordenação do Curso de
Engenharia Civil, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás,
Campus Goiânia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Cláudio Marra Alves

Coorientador: Estevão Rezende Brisolla-Zara

GOIÂNIA, GO

2026

M543p Menezes, Gustavo Fernadnes.

Projeto de laje maciça protendida em sistema de pós-tração não aderente / Gustavo Fernandes Menezes. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2026.
73f.

Orientação: Prof. Me. Cláudio Marra Alves.

Coorientação: Estevão Rezende Brizolla-Zara.

TCC (trabalho de conclusão de curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inclui apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Projeto estrutural. 3. Lajes. 4. Concreto protendido. I. Alves, Cláudio Marra (orientação). II. Brizolla-Zara, Estevão Rezende (coorientação). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 624.1834

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **PROJETO DE LAJE MACIÇA PROTENDIDA EM SISTEMA DE PÓS-TRAÇÃO NÃO ADERENTE**, sob orientação de Claudio Marra Alves, apresentado pelo aluno **Gustavo Fernandes Menezes (20211011050044)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Civil (Câmpus Goiânia)**. Os trabalhos foram iniciados às **17:00** do dia **05/02/2026** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Claudio Marra Alves** (Presidente)
- **Paulo Francinete Silva Junior** (Examinador Interno)
- **Phablo Verissimo Inacio Dias** (Examinador Interno)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 9,3

Observação / Apreciações:

O aluno deverá se reunir com o orientador para decidirem sobre os ajustes a serem feitos no TCC, após as sugestões e observações da banca examinadora.

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Claudio Marra Alves** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Paulo Francinete Silva Junior**, em **17/02/2026 08:59:51** com chave **2a1cefc80bf811f1a792005056a537a4**.
- **Claudio Marra Alves**, em **12/02/2026 17:40:32** com chave **133c26b4085311f1a465005056a537a4**.
- **Phablo Verissimo Inacio Dias**, em **12/02/2026 19:27:24** com chave **0147d25a086211f19cd3005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 17/02/2026

Código de Autenticação: 084480



RESUMO

O concreto protendido tem se consolidado como uma solução estrutural eficiente para edificações que demandam maiores vãos livres e flexibilidade arquitetônica, sobretudo quando comparado aos sistemas convencionais em concreto armado. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar, dimensionar, detalhar e comparar o desempenho estrutural de um pavimento com laje maciça em concreto protendido em relação a duas concepções estruturais em concreto armado, considerando diferentes arranjos de vigas e pilares. A metodologia adotada baseou-se em pesquisa bibliográfica e normativa, com destaque para a ABNT NBR 6118:2023, aliada ao dimensionamento estrutural por meio do software comercial Eberick®. Foram avaliados os Estados Limites de Serviço e Último, bem como os principais índices de projeto, incluindo consumo de concreto, aço e formas, além dos deslocamentos e esforços solicitantes. Os resultados obtidos indicaram que a supressão de vigas e pilares internos em lajes de concreto armado implica aumento significativo da espessura da laje e do consumo de materiais, a fim de atender aos critérios normativos de desempenho. Em contrapartida, a laje maciça protendida apresentou maior eficiência estrutural, possibilitando a redução da espessura, o controle das deformações e melhor aproveitamento do material resistente, mantendo-se dentro dos limites normativos. Conclui-se que a utilização de lajes maciças protendidas representa uma alternativa tecnicamente viável e eficiente para pavimentos com vãos elevados, desde que observados os critérios normativos e adotado adequado controle de projeto e execução.

Palavras-chave: Protensão não aderente. Concreto protendido. Laje maciça. Pós-tração. Dimensionamento estrutural.

ABSTRACT

Prestressed concrete has become an efficient structural solution for buildings that require larger spans and greater architectural flexibility, especially when compared to conventional reinforced concrete systems. In this context, this study aims to analyze, design, detail, and compare the structural performance of a floor slab composed of a solid prestressed concrete slab with two reinforced concrete structural configurations, considering different arrangements of beams and columns. The adopted methodology was based on bibliographic and normative research, with emphasis on ABNT NBR 6118:2023, combined with structural design using the commercial software Eberick®. Serviceability and Ultimate Limit States were evaluated, as well as the main design indices, including concrete, steel, and formwork consumption, in addition to deflections and internal forces. The results indicated that the removal of internal beams and columns in reinforced concrete slabs leads to a significant increase in slab thickness and material consumption in order to meet normative performance criteria. Conversely, the solid prestressed concrete slab demonstrated higher structural efficiency, allowing for reduced thickness, improved control of deformations, and better utilization of the resistant material, while remaining within the prescribed code limits. It is concluded that the use of solid prestressed concrete slabs represents a technically viable and efficient alternative for floors with large spans, provided that normative requirements are met and appropriate design and execution control is adopted.

Keywords: Unbonded prestressing. Prestressed concrete. Solid slab. Post-tensioning. Structural design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Montagem da primeira ponte do Galeão, no Rio de Janeiro	10
Figura 2 - Ações aplicadas em viga.....	13
Figura 3 - Somatório de tensões normais (MPa) na viga	14
Figura 4 - Comparação de custos entre lajes em CA e CP	15
Figura 5: Tipos de lajes protendidas.....	16
Figura 6 - Representação esquemática de uma cordoalha engraxada	18
Figura 7 - Cordoalhas engraxadas	19
Figura 8 - Acessórios de protensão	20
Figura 9 – Atuador hidráulico (macaco de protensão).....	22
Figura 10 - Combinações Quase Permanente - ELS-D	29
Figura 11 - Combinações Frequente - ELS-F	30
Figura 12 - Combinações raras - ELS-F.....	30
Figura 13 - Combinações Frequentes - ELS-D	31
Figura 14 - Traçado de cordoalha em elemento protendido	34
Figura 15 – Planta de forma do pavimento referência – caso 1	36
Figura 16 - Planta de forma do pavimento em concreto armado - caso 2.....	37
Figura 17 - Deslocamentos nas lajes do caso 1 (h=12cm).....	40
Figura 18 - Deslocamentos na laje do caso 2 (h=30cm)	40
Figura 19 - Momentos fletores nas lajes do caso 1	41
Figura 20 - Momentos fletores na laje do caso 2.....	41
Figura 21 – Distribuição dos feixes – Direção X.....	44
Figura 22 – Distribuição dos feixes – Direção Y	45
Figura 23 – Perfil vertical do feixe CPX-6 – Direção X (Sem escala)	46
Figura 24 – Perfil vertical do feixe CPY-6 – Direção Y (Sem escala)	47
Figura 25 – Armadura de fretagem.....	49
Figura 26 – Estado-limite de descompressão parcial	50
Figura 27 – Tensões ELS-F no CPX-6, em kgf/cm ²	51
Figura 28 – Tensões ELS-F no CPY-6, em kgf/cm ²	52
Figura 29 – Tensões ELS-DP no CPX-6, em kgf/cm ²	52
Figura 30 – Tensões ELS-DP no CPY-6, em kgf/cm ²	53
Figura 31 – Tensões ELU-AP no CPX-6, em kgf/cm ²	53
Figura 32 – Tensões ELU-AP no CPY-6, em kgf/cm ²	54
Figura 33 – Grelha da laje L1 – caso 3	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correspondência entre a CAA e relação A/C.....	17
Tabela 2 - Cobrimento de armadura para elementos estruturais.....	25
Tabela 3 - Estados limites de serviço para estruturas de concreto.....	26
Tabela 4 - Combinações de serviço (Tabela 11.4 da NBR 6118).....	28
Tabela 5- Fatores de redução ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 (Tabela 11.2 da NBR 6118).....	29
Tabela 6 - Perdas de protensão (imediatas e progressivas).....	33
Tabela 7 - Flechas no tempo infinito para os casos 1 e 2.....	39
Tabela 8: Consumo de materiais e índices de projeto - caso 1	42
Tabela 9: Consumo de materiais e índices de projeto - caso 2	42
Tabela 10 – Tensões limites para aprovação da protensão.....	50
Tabela 11 - Flechas no tempo infinito para os casos 1, 2 e 3	55
Tabela 12 – Alongamento teórico dos cabos.....	55
Tabela 13 - Armadura passiva da laje L1 (Tabela 19.1 – NBR 6118:2023).....	56
Tabela 14 – Consumo de materiais e índices de projeto – caso 3	56
Tabela 15 - Consumo de materiais e índices de projeto - Resumo geral	57
Tabela 16 - Custo de materiais dos pavimentos estudados	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Objetivo geral	11
1.2.2	Objetivos específicos.....	11
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	A PROTENSÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	13
2.2	TIPOS DE LAJES PROTENDIDAS.....	15
2.3	MATERIAIS DE PROTENSÃO.....	17
2.3.1	Concreto.....	17
2.3.2	Aço de protensão	18
2.3.3	Equipamentos de protensão.....	20
2.4	CLASSIFICAÇÃO DA PROTENSÃO	22
2.4.1	Aderência ao concreto.....	22
2.4.2	Nível de protensão	23
2.5	CRITÉRIOS DE PROJETO.....	24
2.5.1	Espessura da laje	24
2.5.2	Cobrimento das armaduras	25
2.5.3	Estado limite de serviço (ELS).....	26
2.5.4	Estado limite últimos (ELU)	31
2.5.5	Força de protensão	32
2.5.6	Perdas de protensão: imediatas e progressivas.....	32
2.5.7	Traçado da cordoalha de protensão	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	METODOLOGIA DE PESQUISA	35
4	ESTUDO DE CASO	36
4.1	DADOS DE PROJETO	38
4.2	COMPARAÇÃO DOS PAVIMENTOS	38
4.2.1	Resultado dos deslocamentos - ELS.....	39

4.2.2	Resultado dos esforços solicitantes – ELU	40
4.2.3	Índices de materiais.....	42
5	DIMENSIONAMENTO DA LAJE PROTENDIDA	43
5.1	ESPESSURA DA LAJE	43
5.2	POSICIONAMENTO DAS CORDOALHAS	43
5.2.1	Distribuição em planta	43
5.2.2	Perfil vertical dos cabos.....	45
5.3	FORÇA DE PROTENSÃO APLICADA.....	48
5.4	ARMADURA DE FRETAGEM	48
5.5	NÍVEL DE PROTENSÃO	49
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
6.1	VERIFICAÇÃO ELS-F.....	51
6.2	VERIFICAÇÃO ELS-DP	52
6.3	VERIFICAÇÃO ELU-AP	53
6.4	DESLOCAMENTO/FLECHA DA LAJE	54
6.5	ALONGAMENTO DOS CABOS	55
6.6	ARMADURA PASSIVA DA LAJE	55
6.7	ÍNDICE DE MATERIAIS	56
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – PRANCHAS EXECUTIVAS DO CASO 1	65
	APÊNDICE B – PRANCHAS EXECUTIVAS DO CASO 2	69
	APÊNDICE C – PRANCHAS EXECUTIVAS DO CASO 3	73

1 INTRODUÇÃO

Na arquitetura contemporânea, o espaço livre é admirado por muitos, tendo forte presença nas edificações civis do baixo ao alto padrão, sobretudo neste último. Todavia, vãos maiores e áreas mais amplas, sem interferência de elementos como pilares, necessitam de estruturas mais robustas ou sistemas estruturais mais avançados, que conseguem superar estes obstáculos utilizando menores seções transversais para os elementos estruturais, como por exemplo as vigas e lajes.

Um dos sistemas construtivos mais comuns no Brasil, o concreto armado, apresenta dificuldades em seguir esta tendência arquitetônica, em primeiro lugar, pelo seu elevado peso específico (γ) de 2500 kg/m³ (NBR 6120:2019) e sua baixa resistência as tensões de tração, presentes nas lajes e vigas de concreto armado.

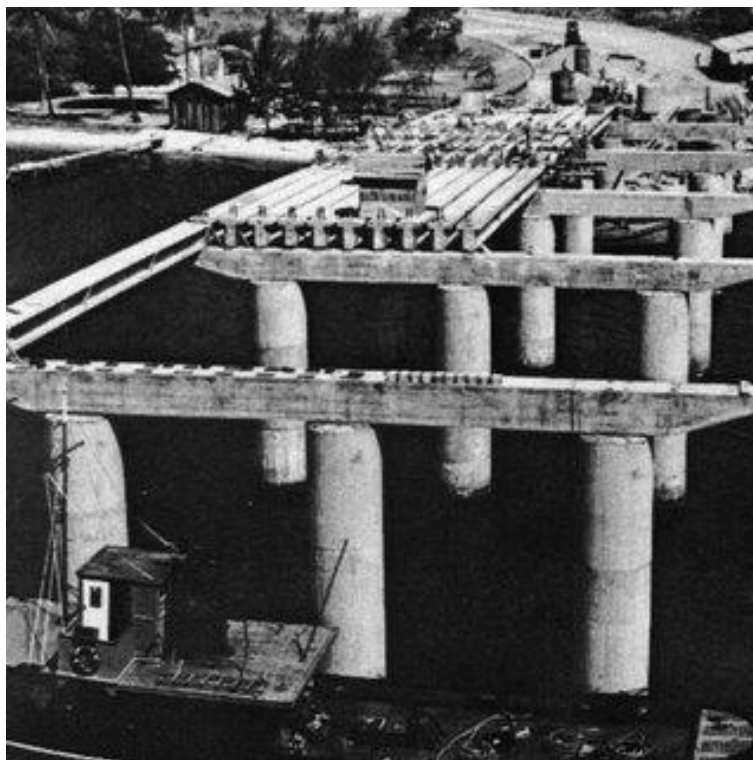
Para viabilizar o projeto estrutural de projetos de arquitetura que especifiquem vãos acima dos normalmente utilizados para soluções estruturais em concreto armado, pode-se utilizar uma concepção estrutural em concreto protendido.

Os primeiros registros da utilização de estruturas de concreto com tecnologia de protensão estão datados no século XX, tendo grande parte de seu desenvolvimento atribuído ao engenheiro civil francês Eugène Freyssinet (VERÍSSIMO; CÉSAR JR, 1998). Desde então, a técnica de protensão do concreto vem sendo usada em escala global, fomentando assim seu estudo e o consequente desenvolvimento das técnicas de dimensionamento e execução.

No Brasil, a primeira estrutura a utilizar o concreto protendido foi a ponte do Galeão, conforme mostra a Figura 1. Construída na cidade do Rio de Janeiro e inaugurada em 1949, seu projeto foi supervisionado pelo próprio Freyssinet, na França (VERÍSSIMO; CÉSAR JR, 1998) e contou com longarinas protendidas de 19,40m de comprimento (THOMAZ, 2011).

Desde então, sua presença na construção civil brasileira vem se expandindo devido às novas possibilidades apresentadas. Estas incluem, mas não estão limitadas à longarinas protendidas para pontes e viadutos, que podem contar com dezenas de metros de vão livre. Em edifícios de andares múltiplos ou em residências as vigas e lajes protendidas proporcionam espaços mais amplos.

Figura 1 - Montagem da primeira ponte do Galeão, no Rio de Janeiro



Fonte: Vasconcelos (1992)

1.1 JUSTIFICATIVA

Obras como “Projeto e Execução de Lajes Protendidas” (Emerick, 2005) e “Concreto Protendido: Teoria e Prática” (CHOLFE; BONILHA, 2018), bem como estudos acadêmicos recentes — como os de Brisolla-Zara (2023) e Souza e Hugo (2022) — representam importantes contribuições. No entanto, a maioria destas publicações fundamenta-se nas versões da ABNT NBR 6118 de 2014 ou anteriores.

A edição de 2023 da NBR 6118 passou a exigir que estruturas com protensão completa, isto é, aquelas dimensionadas para permanecer apenas sob compressão, sem ocorrência de tração no concreto em serviço, adotem critérios mais rigorosos de projeto. Anteriormente, esses critérios mais severos eram aplicáveis principalmente aos sistemas de pré-tração situados em ambientes mais agressivos (CAA III e IV). Com a atualização da norma, exigências equivalentes passaram a ser aplicadas também aos sistemas de pós-tração, mesmo quando inseridos em ambientes de menor agressividade (CAA I e II).

Na versão da norma publicada em 2014, a tensão máxima de compressão no concreto, independente da classe, deveria respeitar o limite de 70% da resistência

característica à compressão (f_{ck}). Na versão de 2023, este limite deve ser respeitado para concretos com $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$. Em concretos com f_{ck} entre 50 e 90 MPa, a tensão máxima deve respeitar o resultado obtido pela equação

$$\sigma_c = 0,7 * [1,0 - (f_{ckj} - 50)/200] \quad [1]$$

Onde,

σ_c é a tensão máxima de compressão no concreto;

f_{ckj} é a resistência característica à compressão na idade de aplicação da protensão.

A versão de 2023 estabeleceu também limites para as tensões de compressão oriundas das diversas combinações de carga em serviço, conforme indicado a seguir:

- a. Combinação quase permanente: $0,45 * f_{ck}$;
- b. Combinação frequente: $0,60 * f_{ck}$
- c. Combinação rara: $0,60 * f_{ck}$ (*somente para protensão completa*)

Considerando que a edição mais recente da NBR 6118, publicada em 2023, trouxe atualizações significativas, sobretudo ao dimensionamento em concreto protendido, o presente trabalho justifica-se pela necessidade de produzir conteúdo técnico-acadêmico atualizado. Assim, este estudo visa somar à literatura especializada ao apresentar os mais recentes procedimentos de cálculo e detalhamento de uma laje maciça protendida, além de possibilitar ao autor o aprofundamento teórico e prático sobre este sistema construtivo, e o desenvolvimento do seu primeiro projeto estrutural dentro dessa tipologia.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos são apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar, dimensionar, detalhar e determinar os índices de projeto de uma laje maciça em concreto protendido, utilizando o *software* comercial de cálculo estrutural, *Eberick®*.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Elaborar um roteiro para o dimensionamento de lajes em concreto protendido;

- b) Apresentar os parâmetros normativos para o dimensionamento de uma laje protendida maciça apoiada em vigas de bordo.
- c) Comparar os índices de projeto de uma laje dimensionada em concreto protendido com um mesmo pavimento em concreto armado;
- d) Elaborar o projeto executivo em pranchas, contendo todas as informações necessárias para a execução da estrutura.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No 1º capítulo expõe-se a introdução do trabalho, a qual aborda a disparidade entre concreto armado e protendido, a origem do concreto protendido e sua chegada no Brasil, além de um breve comentário quanto as suas aplicações. Encontra-se também nesta primeira parte, a justificativa deste estudo e seus objetivos.

No 2º capítulo é exposto um levantamento do estado da arte da protensão e os critérios normativos para dimensionamento do pavimento com laje maciça protendida.

No 3º capítulo é apresentada a metodologia de pesquisa adotada acerca do dimensionamento de lajes protendidas, o pavimento que foi analisado e os materiais (concreto, aço, cordoalhas etc.) utilizados.

No 4º capítulo encontra-se o dimensionamento e análise de duas concepções de laje em concreto armado, as quais foram comparadas à laje em concreto protendido.

O 5º capítulo trata do desenvolvimento do projeto, apresentando ao leitor os dados geométricos do pavimento, a distribuição das cordoalhas em planta e o perfil vertical dos cabos; a força de protensão utilizada e considerações acerca da armadura de fretagem e do nível de protensão empregado na laje.

No 6º capítulo a laje é analisada quanto aos esforços resultantes nos Estados Limites de Serviço e Último, verificando se estes atendem aos limites impostos pela NBR 6118 (2023). Ademais, verifica-se o deslocamento desta laje, o alongamento teórico das cordoalhas de protensão, a armadura mínima passiva segundo os critérios da norma e, por fim, é apresentado ao leitor um comparativo de materiais entre os três casos de concepções estruturais analisadas.

No 7º capítulo são apresentadas as considerações acerca dos resultados obtidos e sugestões para futuros trabalhos.

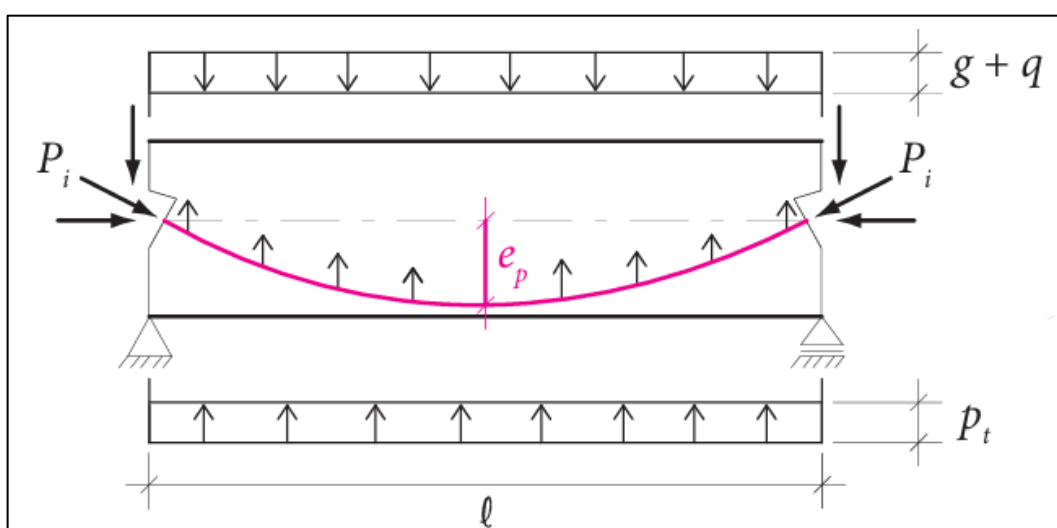
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um bom projeto em concreto protendido observa diversas considerações preconizadas por normas e autores relacionados ao assunto. O tipo de protensão que será utilizado, as tensões máximas que serão aplicadas, o material dos elementos e dos sistemas de protensão, o traçado dos cabos, entre outros devem ser considerados pelo projetista na busca de um projeto que concilie o custo da execução e o resultado obtido. Neste capítulo serão abordados os pontos mencionados e outros conceitos também importantes.

2.1 A PROTENSÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

O engenheiro estrutural Emerick (2005), coloca a protensão como a aplicação prévia de tensões desejadas nos elementos, de modo a combater as tensões indesejadas e de magnitude contrária que surgirão no decorrer de seu uso. Esta ideia é evidenciada na Figura 2, que apresenta uma viga biapoiada com determinado vão (l) sob efeito de cargas externas ($g + q$) - que atuam de cima para baixo - e da carga de protensão (p_t) - atuando de baixo para cima. Devido à diferença nos sentidos de aplicação, a carga de protensão equilibra parte das ações externas, reduzindo a deformação do elemento estrutural e possibilitando a utilização de maiores vãos.

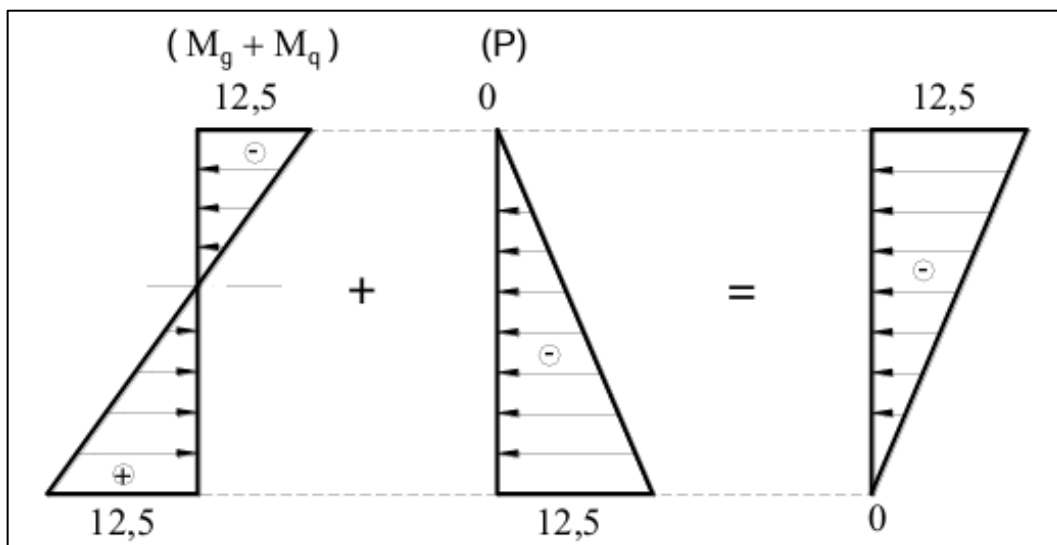
Figura 2 - Ações aplicadas em viga



Fonte: Cholfe e Bonilha (2018)

Nos elementos biapoiados, é de conhecimento da teoria das estruturas a predominância de momentos fletores positivos. Estes momentos provocam tensões de compressão no banzo superior e tensões de tração no banzo inferior. Na Figura 3 são exibidos os diagramas de tensões normais, com valores para exemplificação, para uma viga semelhante ao exemplo supracitado.

Figura 3 - Somatório de tensões normais (MPa) na viga



Fonte: Bastos (2024)

Com os esforços normais de tração convencionados com sinal positivo, e os esforços de compressão convencionados com sinal negativo, pode-se observar o equilíbrio de forças mencionados. Após aplicada a força de protensão, a viga de concreto agora lida apenas com esforços de compressão, mesmo no banzo inferior, comumente sujeito à tração.

A prática da protensão é de muito valor sobretudo para as estruturas de concreto devido a uma característica em particular deste material. O concreto, apesar de ser muito resistente à compressão, apresenta baixa resistência às ações de tração. Na falta de ensaios, a NBR 6118:2023 nos permite calcular a resistência média à tração do concreto ($f_{ct,m}$) em função do seu f_{ck} , através da fórmula:

$$f_{ctm} = 0,30 * f_{ck}^{2/3} \quad [2]$$

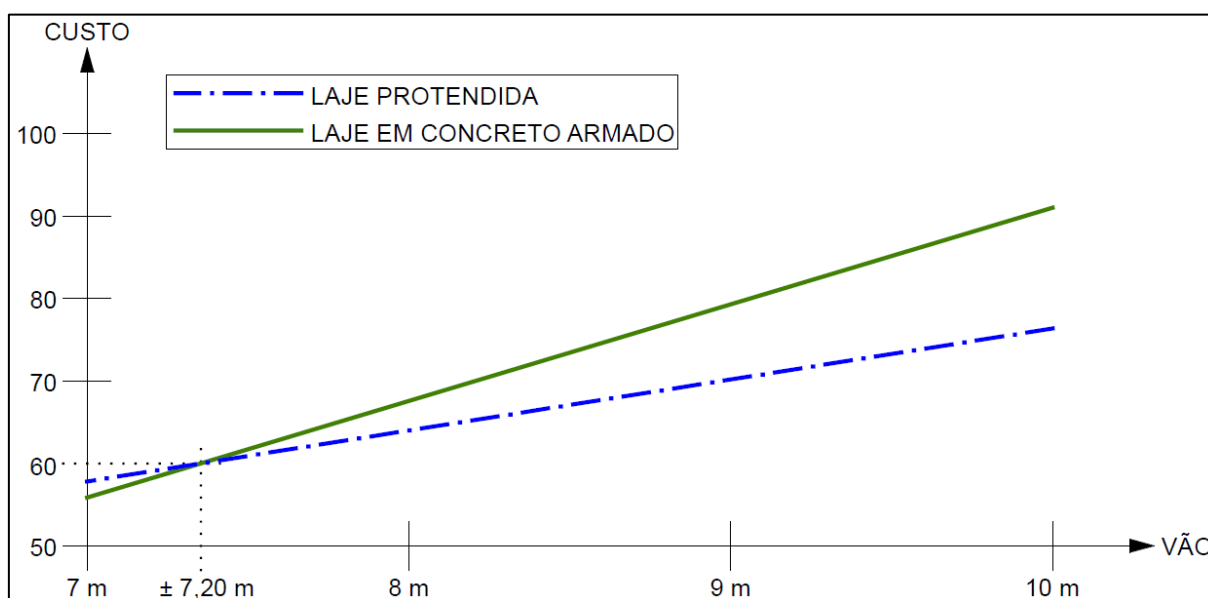
Onde:

$f_{ct,m}$ é a resistência média a tração do concreto;

Para as classes usuais de concreto, de C20 a C90, sua resistência à compressão encontra-se tida entre 7% e 11% do f_{ck} , valores muito baixos frente à magnitude das tensões às quais as estruturas estão submetidas.

Por esta razão, Araújo (2024) conclui que a resistência à tração do concreto pode ser desprezada no dimensionamento. Todavia, Emerick (2005) mostra uma comparação, disposta na Figura 4, quanto ao custo entre lajes de concreto armado e com protensão em relação ao tamanho do vão. Pela comparação realizada conclui-se que, para comprimentos de vão superior à 7,20m, a laje protendida se torna economicamente mais viável ao projeto.

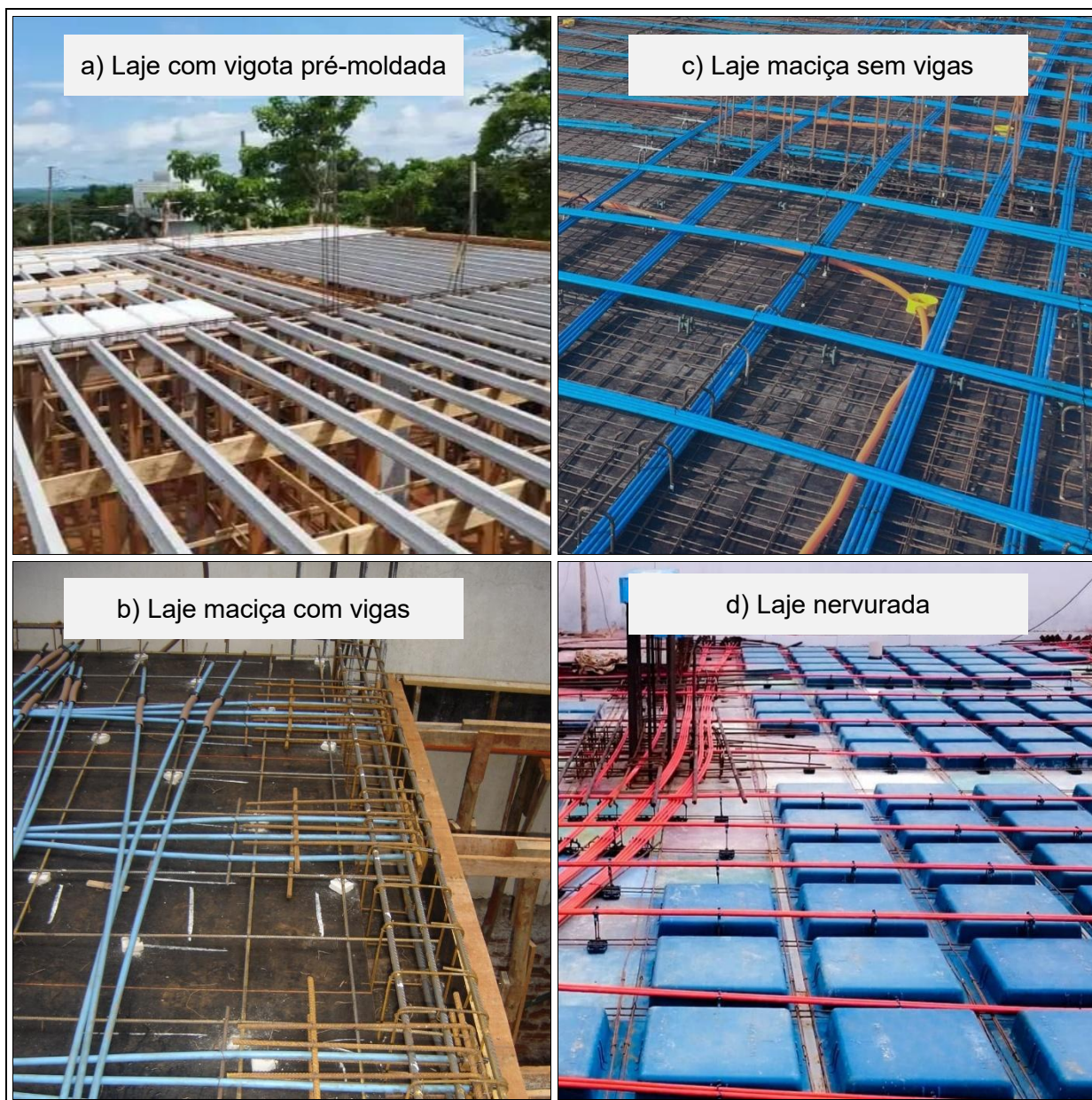
Figura 4 - Comparação de custos entre lajes em CA e CP



Fonte: adaptado de Emerick (2005)

2.2 TIPOS DE LAJES PROTENDIDAS

No campo da construção civil, as lajes protendidas são amplamente empregadas, destacando-se as lajes com vigotas pré-moldadas (Figura 5.a), lajes maciças com vigas de bordo (Figura 5.b) e sem vigas de bordo (Figura 5.c) e lajes nervuradas (Figura 5.d). O uso de capitéis — reforços na ligação laje-pilar para evitar o efeito de puncionamento, onde o pilar tende a "romper" a laje (CARLOS, 2013) — pode ser incorporado ou não a essas estruturas.

Figura 5: Tipos de lajes protendidas

Fonte: Autoria própria

A escolha do tipo de laje protendida ideal deve considerar múltiplos fatores, como o impacto arquitetônico, a relação custo-benefício, a complexidade do dimensionamento e, principalmente, a viabilidade executiva.

Nesse cenário, as lajes maciças protendidas demonstram um desempenho estrutural superior, conforme apontado por Toscano (2022). A componente vertical da força de protensão nessas lajes atua contra os esforços de cisalhamento na conexão laje-pilar, frequentemente eliminando a necessidade de capitéis. Além disso, a

pesquisa de Linck (2013) ressalta a maior agilidade e simplicidade do processo de execução das lajes maciças protendidas em comparação com outros tipos.

2.3 MATERIAIS DE PROTENSÃO

Materiais específicos e adequados devem ser empregados para garantir o correto funcionamento das estruturas protendidas. Além dos materiais próprios para o concreto protendido, como cordoalhas, bainhas, macacos hidráulicos e ancoragens, algumas considerações sobre o concreto utilizado na peça estrutural também são importantes.

2.3.1 Concreto

Para viabilizar a protensão e otimizar o processo de desforma, Emerick (2005) recomenda a utilização de concretos com f_{ck} superiores em comparação ao concreto armado. Após 28 dias de cura, estes concretos apresentam maior resistência à compressão, conferindo-lhes melhor desempenho frente às deformações induzidas pela protensão.

De fato, a própria ABNT NBR 6118 (2023) aponta classes superiores para o concreto protendido, especificados em função da classe de agressividade ambiental. Na Tabela 1 estes valores são apresentados. A norma ainda orienta que devem ser realizados ensaios para averiguar a durabilidade da estrutura frente a agressividade ambiental a qual será exposta. Mas na ausência destes ensaios, permite-se utilizar a relação água-cimento por apresentar uma forte relação com a resistência à compressão do concreto (ABNT NBR 6118, 2023).

Tabela 1 - Correspondência entre a CAA e relação A/C

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		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 (NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: ABNT NBR 6118 (2023)

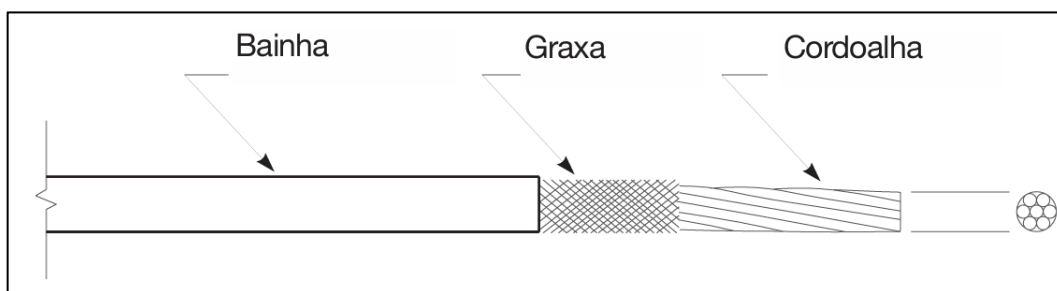
Alguns autores se posicionam de modo mais conservador que a NBR 6118 quando se trata da resistência do concreto. Bastos (2024), por exemplo, sugere que no concreto protendido deve ser considerado uma resistência mínima de 40 MPa, acompanhada por rigoroso controle tecnológico.

2.3.2 Aço de protensão

O aço utilizado nas armaduras ativas se destaca frente ao aço do tipo CA (Concreto Armado) por sua alta resistência a tração. Todavia, essa resistência elevada se justifica pela perda de tensão sofrida pela armadura ao longo do tempo - fenômeno este chamado de relaxação. Fenômenos como a retração e a fluência provocam o encurtamento dos elementos de concreto e, devido a ligação entre os materiais, a armadura ativa também é afetada, gerando uma perda de tensão na ordem de 150 a 300 MPa (BASTOS, 2024).

Em projetos de lajes protendidas com protensão não aderente, utiliza-se comumente as cordoalhas engraxadas. Para sistemas de protensão moldados *in loco*, estas cordoalhas oferecem maior versatilidade de execução por serem flexíveis e vendidas em rolos, permitindo que sejam cortadas em diferentes tamanhos. Nas Figuras 6 e 7 são apresentados, respectivamente, uma ilustração esquemática e um registro fotográfico destas cordoalhas.

Figura 6 - Representação esquemática de uma cordoalha engraxada



Fonte: Cauduro (2003)

Figura 7 - Cordoalhas engraxadas



Fonte: ArcelorMittal, Catálogo (2019)

As cordoalhas apresentadas são formadas por seis fios entalhados, de mesmo diâmetro, dispostos helicoidalmente em torno de um fio central liso, com diâmetro nominal de pelo menos 3% maior que os demais. A ABNT NBR 7843 (2021) traz a seguinte definição destas cordoalhas:

Cordoalha de sete fios revestida (engraxada e plastificada ou encerada e plastificada): cordoalha constituída por sete fios, sendo seis fios com o mesmo diâmetro nominal, encordoados juntos, entalhados, em uma forma helicoidal, com passo uniforme, em torno do fio central liso (alma), recoberta por uma camada de graxa ou cera e por uma capa extrudada de polietileno ou polipropileno de alta densidade. (ABNT NBR 7483, 2021, p. 2)

Os diâmetros nominais de cordoalhas mais empregados no mercado são de 12,7mm (1/2") e 15,20mm (5/8"). Ambos devem apresentar limite mínimo de resistência à tração de 1863,90 MPa ou 190 kgf/mm² e relaxação baixa, ou seja, a redução de protensão na cordoalha após 1000h sendo submetida a uma carga de 80% da carga de ruptura, não excede 3,50% (ABNT NBR 7483, 2021)

Estas características podem ser encontradas na própria identificação da cordoalha que, segundo a padronização da ABNT NBR 7483 (2021) é dada por:

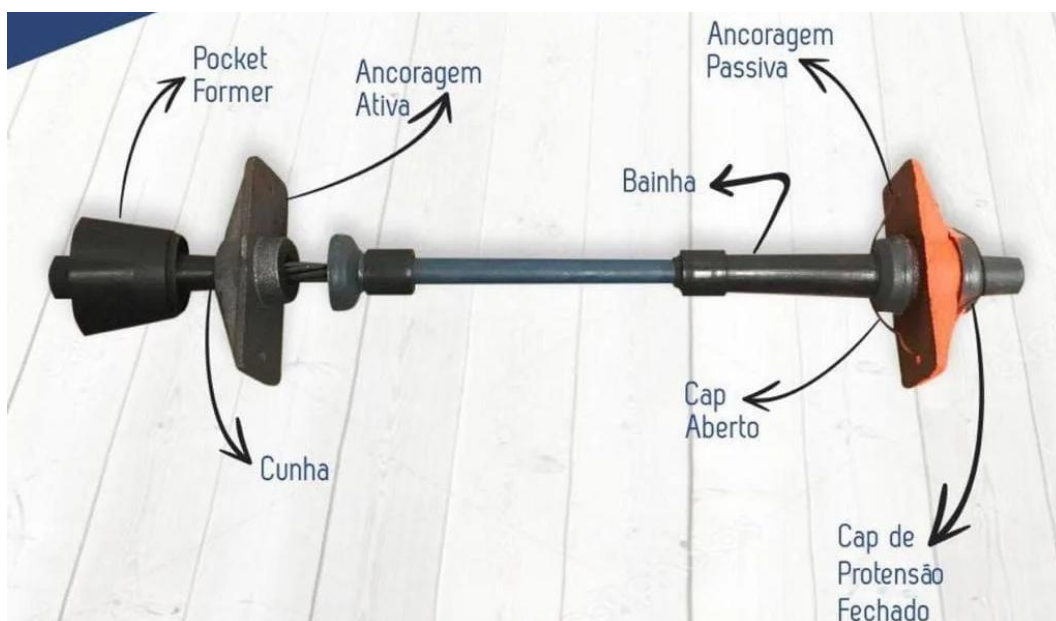
- CP-190 RB 12,7 EGP
- CP-190 RB 15,2 ECP

A última sigla representa o recobrimento da cordoalha, podendo ser engraxada e plastificada (EGP) ou encerada e plastificada (ECP). Ambas são encontradas nos dois diâmetros mencionados.

2.3.3 Equipamentos de protensão

Para realizar a protensão das peças, utiliza-se alguns acessórios e equipamentos auxiliares como placas de ancoragem (ou ancoragem ativa), macaco hidráulico, cunhas, entre outros. Na Figura 8 estão representados os acessórios utilizados na montagem do sistema de protensão.

Figura 8 - Acessórios de protensão



Fonte: PTE (2018)

Cada acessório apontado na Figura 8 possui sua função dentro do sistema de protensão, sendo elas:

- a) **Pocket Former:** Acessório utilizado para formar um rebaixo cônico na superfície do concreto, na extremidade ativa da cordoalha. Esse espaço permite o encaixe do macaco hidráulico durante o tensionamento e posterior acesso à ancoragem ativa. Após o processo de protensão, esse rebaixo facilita a inspeção da cunha e viabiliza o preenchimento com calda de cimento ou graute;
- b) **Ancoragem ativa ou placa de ancoragem:** Elemento onde é aplicada a força de protensão através de um macaco hidráulico. A função principal da ancoragem ativa é transferir a força da armadura ativa ao concreto,

garantindo que a compressão induzida seja preservada após a retirada do macaco;

- c) **Cunha:** A cunha é um dispositivo metálico serrilhado internamente, responsável por travar mecanicamente a cordoalha no interior da ancoragem. Durante o tensionamento, ela é pressionada contra o corpo da ancoragem, e o atrito entre as superfícies impede o deslizamento da cordoalha, preservando a força de protensão após a retirada do macaco.
- d) **Cap aberto:** O cap aberto é um componente provisório instalado sobre a extremidade ativa da ancoragem. Ele serve para proteger a região durante a execução e tensionamento, além de facilitar a posterior aplicação do cap definitivo e o selamento com produtos protetores. Seu uso garante o acesso adequado à cunha e aos dispositivos de ancoragem durante as fases finais da execução da protensão.;
- e) **Cap de protensão fechado:** O cap fechado é um elemento de proteção instalado nas extremidades após o tensionamento e corte da cordoalha. Ele tem como principal função proteger a ancoragem e o trecho exposto da cordoalha contra agentes agressivos, como umidade e dióxido de carbono, prevenindo sua corrosão.
- f) **Ancoragem passiva:** A ancoragem passiva é instalada na extremidade oposta à ativa e recebe a cordoalha antes da concretagem. Diferentemente da ancoragem ativa, não é submetida ao esforço direto de tensionamento com macaco hidráulico, mas sua função é igualmente importante, pois é nela que a cordoalha se apoia e transmite parte da força de protensão após ser tensionada do lado oposto. É importante salientar que alguns projetos podem exigir a que as cordoalhas sejam tensionadas nas duas extremidades. Neste caso não se faz uso das ancoragens passivas, apenas ativas.

Na Figura 9 está representado um modelo de atuador hidráulico ligado a uma bomba injetora de pressão.

Figura 9 – Atuador hidráulico (macaco de protensão)



Fonte: Engenharia Ativa (2021)

2.4 CLASSIFICAÇÃO DA PROTENSÃO

O sistema de protensão pode ser classificado quanto ao momento de aplicação da força de protensão; quanto à aderência da armadura de protensão no concreto e quanto ao nível de intensidade da força de protensão.

2.4.1 Aderência ao concreto

A ABNT NBR 6118 (2023) considera três tipos de protensão, expostos nos subitens 3.1.7, 3.1.8, 3.1.9 da referida norma. São eles:

- a) Concreto com armadura ativa pré-tracionada (protensão com aderência inicial):** Também chamado de protensão com pré-tração (ou pré-tensão), neste sistema a armadura ativa é montada, em conjunto com a armadura passiva, e tracionada antes da concretagem do elemento. Aguarda-se o concreto atingir cerca de 75% da resistência de projeto para retirada das formas e equipamentos de protensão (Souza, 2024). Neste momento, a força de protensão é transferida inteiramente ao concreto por meio da aderência;
- b) Concreto com armadura ativa pós-tracionada (protensão com aderência posterior):** ou protensão com pós-tração aderente. Neste processo a armadura ativa é colocada no interior de uma bainha metálica e apenas posicionada no elemento, junto a armadura passiva, e segue-se com a concretagem. Após o concreto atingir cerca de 75% de sua resistência de projeto, a armadura ativa é tracionada com o auxílio de atuadores hidráulicos (macacos hidráulicos). Alcançado o alongamento necessário, as bainhas metálicas são preenchidas com calda de cimento ou graute, para garantir a aderência entre a armadura ativa e o concreto;

- c) Concreto com armadura ativa pós-tracionada sem aderência (protensão sem aderência):** O processo é similar a protensão com pós-tração aderente, porém as bainhas metálicas são substituídas por cordoalhas revestidas com graxa – para combater a corrosão da armadura ativa e garantir a não aderência ao concreto – e protegidas por uma capa plástica sendo chamadas de cordoalhas engraxadas. Idem ao método anterior, aguarda-se o endurecimento da peça de concreto e faz o alongamento da armadura ativa com um macaco hidráulico. Na montagem das cordoalhas, estas são fixadas às pontas do elemento através de dispositivos de ancoragem, placas metálicas de alta resistência. Ao retirar o macaco hidráulico, a força de protensão é transferida ao concreto por meio das ancoragens, diferente dos demais métodos onde a transferência dessa força se dá em toda a extensão do elemento.

De acordo com Bastos (2024), a protensão com pré-tração é mais utilizada no setor de peças pré-fabricadas por fatores como a uniformidade das peças, rigoroso controle tecnológico, agilidade e repetitividade dos serviços. Nos elementos moldados *in loco*, utiliza-se a protensão com pós-tração devido a melhor trabalhabilidade oferecida. Para peças de viadutos e pontes de médios e grandes vãos, o sistema de pós-tração com aderência fornece maior segurança à estrutura. Para lajes e pisos industriais, vigas e reforços estruturais, a pós-tração sem aderência.

2.4.2 Nível de protensão

Na subseção 13.4.2, a ABNT NBR 6118 (2023) apresenta três níveis de protensão em função da força de protensão aplicada. A classificação do sistema em um destes nível é em consideração à classe de agressividade ambiental (CAA) e da presença de fissuras no elemento protendido. Os três níveis apresentados pela norma são:

- a) Nível 1 – Protensão parcial:** Limitada a estruturas com pré-tração e CAA I; e pós-tração e CAA I e CAA II. Para se enquadrar neste nível de protensão deve-se respeitar o Estado Limite de Formação de Fissuras, com identificação de fissuras características menor ou igual a 0,2mm, quando analisada na combinação frequente de ações;

- b) Nível 2 – Protensão limitada:** Limitada a estruturas com pré-tração e CAA I e CAA II; e pós-tração e CAA I a CAA IV. É necessário que a protensão respeite dois critérios: o Estado Limite de Descompressão para combinações quase-permanente de ações; e o Estado Limite de Formação de Fissuras para combinações frequentes de ações;
- c) Nível 3 – Protensão completa:** Limitada a estruturas com pré-tração e CAA I e CAA II; e pós-tração e CAA I a CAA IV. É necessário que a protensão respeite dois critérios: o Estado Limite de Descompressão para as combinações frequentes de ações; e o Estado Limite de Formação de fissuras para as combinações raras de ações.

A fissuração nos elementos de concreto ocorre pela incidência de tensões de tração. Analisando então os níveis de protensão definidos pela NBR 6118:2023, Brisolla-Zara (2023) apresenta que na protensão parcial temos a abertura controlada de fissuras; na protensão limitada, pequenas tensões de tração na peça, mas com pouca probabilidade de fissuração; e na protensão completa, não há incidência de tração, portanto, não há fissuras no concreto.

2.5 CRITÉRIOS DE PROJETO

Para determinar se o dimensionamento de uma laje maciça protendida é aceitável, é necessário verificar se o resultado atende aos critérios dispostos nas respectivas normativas brasileiras. Neste cenário, temos a ABNT NBR 6118 (2023) e ABNT NBR 15200 (2024), que propõe valores máximos e mínimos para deslocamentos, espessuras, cobrimentos de armadura, ações atuantes, perdas de carga, entre outros.

2.5.1 Espessura da laje

A ABNT NBR 6118 (2023) sugere para lajes maciças de concreto armado, espessuras mínimas que variam entre 7 e 12 cm a depender da utilização – laje de piso ou cobertura – e da carga atuante. Para as lajes maciças com protensão e que estejam apoiadas em vigas, todavia, a norma é mais conservadora e especifica uma espessura mínima de 15 cm, a qual ainda deve atender aos seguintes critérios:

$$h_{\min} = \begin{cases} l/42 \rightarrow \text{para lajes de piso biapoiadas} \\ l/50 \rightarrow \text{para lajes de piso contínuas} \end{cases}$$

Onde:

l = vão teórico entre os apoios das lajes;

$h_{\min}$ = espessura mínima da laje.

Deve-se levar também em consideração a ABNT NBR 15200 (2024), que trata das adequações estruturais para situações de incêndio na estrutura. Esta norma recomenda para lajes biapoiadas, sem distinção entre sistemas de concreto armado e protendido, espessuras mínimas que variam de 6 a 15cm a depender do Tempo de Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), o qual pode variar entre 30 e 180 minutos.

2.5.2 Cobrimento das armaduras

Quanto ao cobrimento, a ABNT NBR 6118 (2023) preconiza valores mais conservadores para as armaduras ativas de estruturas em concreto protendido, garantindo maior segurança para as cordoalhas que trabalham tensionadas.

Na Tabela 2, estão apresentados os cobrimentos para as armaduras ativas do concreto protendido em função da classe de agressividade ambiental. As armaduras passivas devem respeitar os mesmos cobrimentos para o concreto armado.

Tabela 2 - Cobrimento de armadura para elementos estruturais

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118 (2023)

2.5.3 Estado limite de serviço (ELS)

As estruturas de concreto quando submetidas a ações durante seu uso, apresentam deformações, fissuras e vibrações. Estas patologias, apesar de serem inevitáveis – na verdade é recomendado que elas ocorram – são permitidas desde que tenham sua ocorrência controlada. Este controle é realizado por critérios normativos, e podem ser verificados através dos Estados Limites de Serviço (ELS) apresentados na ABNT NBR 6118 (2023). A Tabela 3 apresenta sete estados limites de serviços que esta norma orienta a serem observados no dimensionamento das estruturas de concreto.

Tabela 3 - Estados limites de serviço para estruturas de concreto.

Estados Limites de serviço (Segundo a NBR 6118:2023)	
Estado-limite de formação de fissuras (ELS-F):	Início da fissuração quando a tração máxima atinge a resistência característica à tração.
Estado-limite de abertura das fissuras (ELS-W):	Fissuras com abertura igual ao limite máximo permitido. Limitada a 0,2 mm na protensão parcial.
Estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF)	Deformações (flechas) acima do limite para uso normal da estrutura.
Estado-limite de descompressão (ELS-D)	Os esforços de compressão provocados pela protensão diminuem devido aos esforços externos. As tensões normais ficam nulas em um ou mais pontos da seção, sem tração no restante.
Estado-limite de descompressão parcial (ELS-DP)	Compressão garantida apenas na região com armaduras ativas.
Estado-limite de compressão excessiva (ELS-CE)	Tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido.
Estado limite de vibrações excessivas (ELS-VE)	Vibrações acima do limite que garante o conforto do usuário.

Fonte: Autoria própria

2.5.3.1 Combinações de serviço

Cada um dos níveis de protensão (Parcial, Limitada e Completa) deve ser avaliado em algum dos estados limites de serviços apresentados na seção anterior. Estes estados são analisados sob diferentes combinações de serviços, ou seja, a disposição das ações na estrutura, e são utilizados para verificação de flechas, fissuras e vibrações.

Considera-se para este fim, três combinações de serviço:

- a) Combinação quase permanente de serviço (CQP):** Representa as ações que estão praticamente sempre presentes na estrutura ao longo da vida útil, como peso próprio, revestimentos e, em alguns casos, cargas de ocupação permanentes. É usada para avaliar deformações de longo prazo, como flechas e efeitos de fluência e retração.
- b) Combinação frequente de serviço (CF):** Considera as ações permanentes mais as variáveis que ocorrem com certa regularidade, mas não o tempo todo. É usada, por exemplo, para verificar abertura de fissuras e vibrações em situações do dia a dia.
- c) Combinação rara de serviços (CR):** Representa a soma das ações permanentes e das variáveis na sua intensidade máxima, mas que ocorrem de forma eventual, como sobrecargas máximas de uso ou condições excepcionais. Serve para avaliar o comportamento da estrutura em situações mais críticas de serviço.

As equações referentes a estas combinações, com suas variáveis e coeficientes, estão apresentados na Tabela 4, a seguir:

Tabela 4 - Combinações de serviço (Tabela 11.4 da NBR 6118)

Combinações de serviço (ELS)	Descrição	Cálculo das solicitações
Combinações quase permanentes de serviço (CQP)	Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \psi_{2j} F_{qj,k}$
Combinações frequentes de serviço (CF)	Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor frequente $\psi_1 F_{q1,k}$, e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \psi_1 F_{q1,k} + \sum \psi_{2j} F_{qj,k}$
Combinações raras de serviço (CR)	Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor característico $F_{q1,k}$, e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes $\psi_1 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + F_{q1,k} + \sum \psi_{1j} F_{qj,k}$

Fonte: ABNT NBR 6118 (2023)

Onde,

 $F_{d,ser}$ – Valor de cálculo das ações para combinações de serviço; $F_{q1,k}$ – Valor característico das ações variáveis principais diretas; ψ_1 – Fator de redução de combinações frequente para ELS; ψ_2 – Fator de redução de combinação quase permanente para ELS.

Os coeficientes ψ por sua vez, são fatores que reduzem a intensidade das ações nos estados-limites de serviço. A Tabela 5, fornece os valores destes coeficientes, em função das cargas atuantes na estrutura.

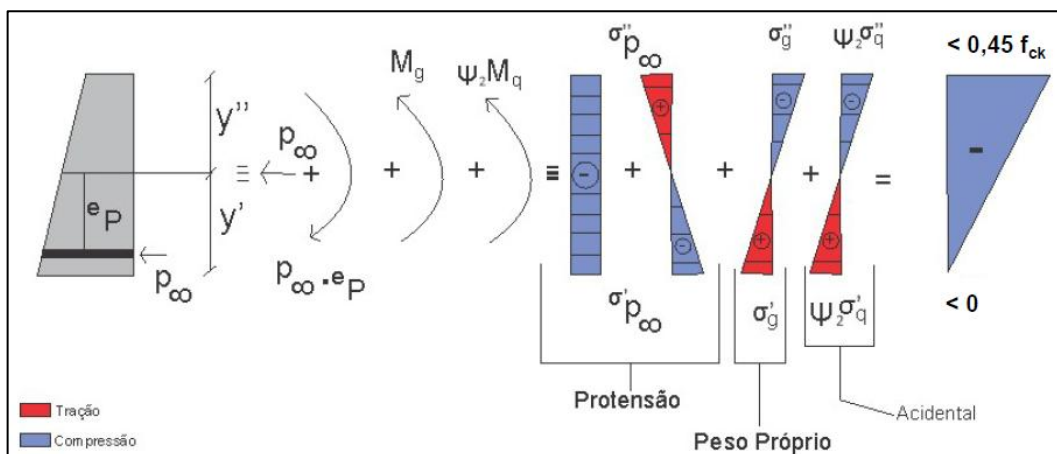
Tabela 5- Fatores de redução ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 (Tabela 11.2 da NBR 6118)

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos, nem de elevadas concentrações de pessoas	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos, ou de elevada concentração de pessoas	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0,0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

Fonte: ABNT NBR 6118 (2023)

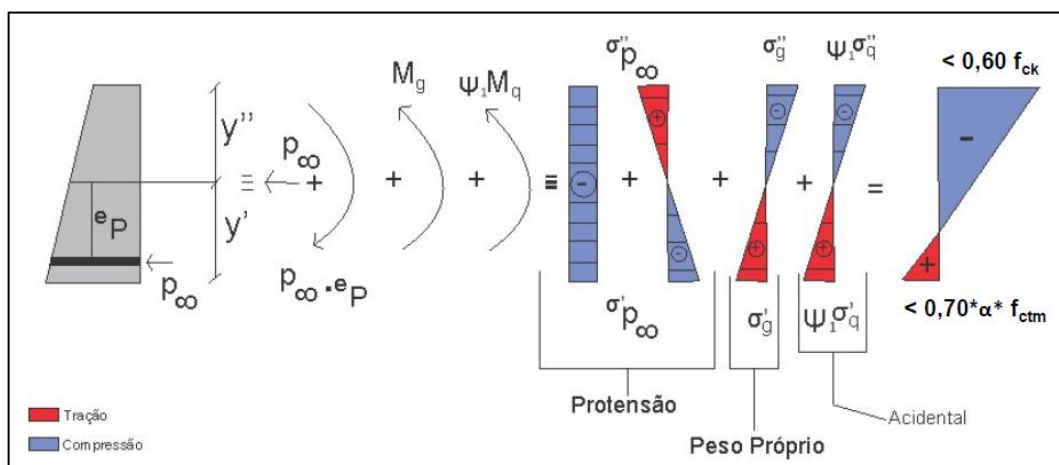
As Figuras 10 e 11 mostram os diagramas de solicitações na seção transversal do elemento protendido, respectivamente das CQP e CF para a protensão limitada.

Figura 10 - Combinações Quase Permanente - ELS-D



Fonte: Souza (2024)

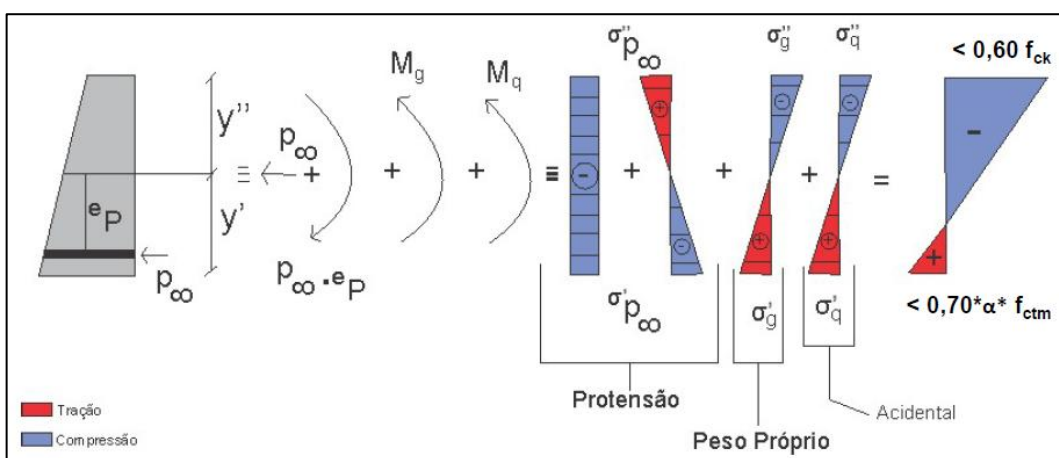
Figura 11 - Combinações Frequentes - ELS-F



Fonte: Souza (2024)

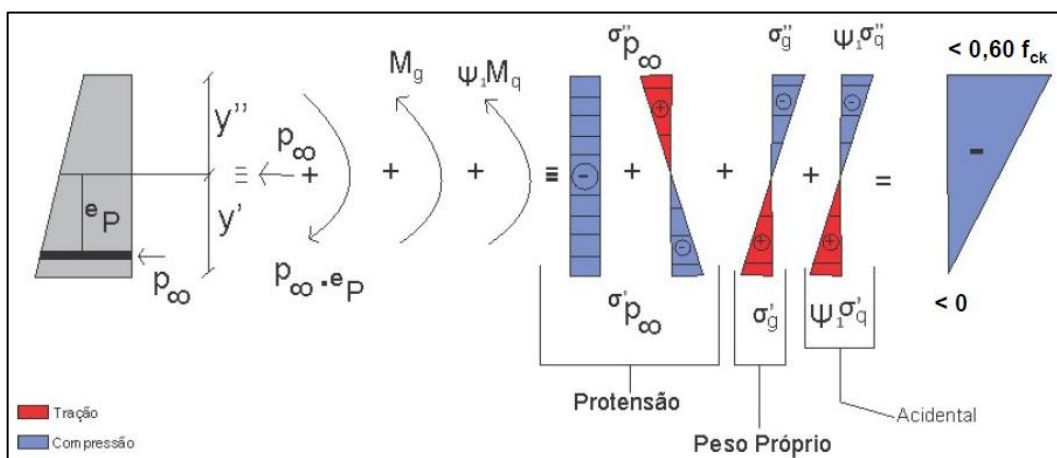
As figuras 12 e 13 mostram os diagramas de solicitações na seção transversal do elemento protendido, respectivamente das CF e CR para a protensão completa.

Figura 12 - Combinações raras - ELS-F



Fonte: Souza (2024)

Figura 13 - Combinações Frequentes - ELS-D



Fonte: Souza (2024)

2.5.4 Estado limite últimos (ELU)

Os Estados Limites Últimos (ELU) estão associados à segurança estrutural frente às combinações mais desfavoráveis de ações que possam ocorrer ao longo da vida útil da construção. A superação desses limites caracteriza a perda da capacidade resistente da estrutura, conduzindo-a a um estado de colapso ou ruína (TOSCANO, 2022). É neste estado em que se dimensiona as armaduras ativas e passivas dos elementos de concreto.

Nas estruturas em concreto protendido, é necessário verificar o ELU no momento da protensão, onde os esforços sobre o concreto aumentam repentinamente (CARNEIRO, 2015).

2.5.4.1 Estado Limite Último no ato da protensão (ELU-AP)

A ABNT NBR 6118 (2023) dispõe que esta verificação deve ser feita no estágio I, onde o concreto não está fissurado e os materiais apresentam um comportamento elástico-linear. Neste caso admite uma verificação simples a partir dos seguintes critérios:

- a) Tensão máxima de compressão no concreto, com as cargas de protensão ponderadas em $\gamma_p = 1,1$ e demais ações em $\gamma_f = 1,0$, não podem superar 70% do f_{ck} na data de protensão para concretos de classe C50 e inferior;
- b) Tensão máxima de tração no concreto não pode superar 120% da resistência à tração na data da protensão;

c) Quando houver tensões de tração nas seções transversais, é necessário prever armaduras de tração para resistir a esses esforços, dimensionadas considerando o estágio II. Para o cálculo, pode-se adotar que a força nessa armadura seja equivalente à resultante das tensões de tração que atuariam no concreto no estágio I. No entanto, essa força não deve gerar acréscimos de tensão superiores 250 MPa em barras nervuradas.

2.5.5 Força de protensão

No ato da protensão, em que o atuador hidráulico tensiona a cordoalha, a NBR 6118 (2023) dispõe que a tensão aplicada deve respeitar alguns limites, em função do sistema de protensão escolhido:

a) **Armadura pré-tracionada:** $\sigma_{pi} = 0,74 * f_{ptk}$

b) **Armadura pós-tracionada aderente:** $\sigma_{pi} = 0,77 * f_{ptk}$

c) **Armadura pós-tracionada não aderente:** $\sigma_{pi} = 0,80 * f_{ptk}$

Onde:

σ_{pi} = tensão na armadura ativa no ato de protensão;

f_{ptk} = resistência característica à tração do aço de armadura ativa.

Obedecendo estes limites, tem-se que força máxima que pode ser aplicada no tensionamento das cordoalhas equivale à:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_0}{A_{cord}} \quad [3]$$

$$P_0 = \sigma_{pi} * A_{cord} \quad [4]$$

Onde:

P_0 = força máxima a ser aplicada na cordoalha pelo atuador hidráulico;

A_{cord} = área da seção de aço da cordoalha, conforme NBR 7483 (2021).

2.5.6 Perdas de protensão: imediatas e progressivas

Conforme Brisolla-Zara (2023), as perdas de protensão podem ser agrupadas em duas categorias: imediatas e progressivas. As imediatas acontecem quando a protensão é aplicada, sendo resultado principalmente do atrito entre o cabo e sua bainha, da acomodação das ancoragens — fenômeno conhecido como encunhamento — e do encurtamento instantâneo do concreto provocado pela

aplicação da força. Já as perdas progressivas ocorrem de forma gradual ao longo da vida útil da estrutura, decorrentes da fluência e retração do concreto, bem como da relaxação do aço de protensão, que, ao permanecer sob tensão elevada por longos períodos, sofre uma redução natural dessa tensão. A Tabela 6 expõe a definição das perdas mencionadas.

Tabela 6 - Perdas de protensão (imediatas e progressivas)

Tipo de Perda	Subtipo / Descrição
Imediatas	
Atrito	Redução da força devido ao contato e irregularidades entre a armadura ativa e a bainha.
Encunhamento	Escorregamento e ajuste da ancoragem após o tensionamento, causando alívio de força.
Encurtamento elástico do concreto	Redução da tensão nas armaduras ativas devido à deformação imediata do concreto após receber a carga de protensão.
Progressivas	
Retração	Deformação volumétrica do concreto devido à perda de umidade ao longo do tempo.
Fluência	Deformação lenta e contínua do concreto sob tensão constante.
Relaxação do aço	Redução gradual da tensão no aço protendido mantido sob alta carga por longos períodos.

Fonte: Autoria própria

Na prática, é comum que os projetistas adotem os valores para a perda de protensão, tendo por respaldo os estudos de autores como Hanai (2005), Toscano (2022) e Souza (2024), indicando que a perda final pode variar entre 20% e 30% da força inicial aplicada em elementos protendidos, sendo comum a adoção de estimativas preliminares em projeto, como 6% para perdas iniciais e 12% para perdas finais, conforme Emerick (2005) ou 15% para perdas progressivas, conforme Mello (2005). Estes valores são confirmados por Brisolla-Zara (2023) ao demonstrar o cálculo, passo a passo, para as perdas de protensão que, apesar de ser realizado em uma viga protendida, comprova a faixa de valores apresentada pelos autores.

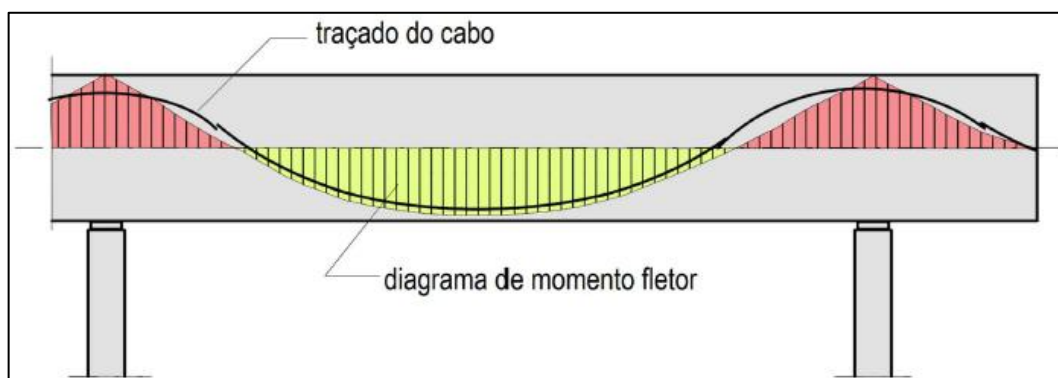
2.5.7 Traçado da cordoalha de protensão

As armaduras passivas dos elementos de concreto armado/protendido são dispostas na seção de modo a respeitar o cobrimento sugerido pela NBR 6118. As

armaduras de flexão são dispostas no sentido longitudinal do elemento, enquanto as armaduras de cisalhamento são dispostas no sentido transversal.

Nas armaduras ativas, todavia, não é suficiente apenas posicionar as cordoalhas de modo a respeitar o cobrimento estipulado, como orienta a NBR 6118 (2023). Deve-se considerar a geometria do traçado, *i. e.*, se a cordoalha será disposta de modo linear, parabólico, semicircular, entre outros. Esta disposição é escolhida pelo projetista de modo que “os esforços de protensão variem proporcionalmente aos esforços externos” (VERÍSSIMO; CÉSAR JR, 1998). De outro modo, o traçado da cordoalha de protensão deve “seguir” os diagramas de momentos fletores, conforme exposto na Figura 14.

Figura 14 - Traçado de cordoalha em elemento protendido



Fonte: Adaptado de Veríssimo e César Jr. (1998), *apud* Brisolla-Zara (2023).

Todavia, é importante destacar que o projetista deve evitar o uso desnecessário de curvas e elevados ângulos de curvatura para evitar as perdas por atrito sofridas pela força de protensão (BASTOS, 2024).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este estudo tem caráter quantitativo de natureza aplicada e exploratória, pois visa dimensionar uma laje maciça protendida utilizando o programa computacional de cálculo estrutural Eberick.

Inicialmente, fora realizado um levantamento bibliográfico sobre lajes maciças protendidas, abrangendo conceitos fundamentais, normas técnicas e critérios de análise, dimensionamento e detalhamento. Foram consultadas referências como:

- a) Livros e artigos técnicos sobre estruturas de concreto armado e protendido;
- b) Manuais do *software* Eberick;
- c) Trabalhos acadêmicos relacionados ao tema.

Estas referências foram utilizadas para compreender os conceitos teóricos do projeto protendido, as especificações das normas que regem o assunto e, sem desrespeitá-las, as recomendações de projeto fornecidas por autores especializados.

Posteriormente foi realizado o dimensionamento, no *software* Eberick, do pavimento em concreto protendido, analisando os resultados como deslocamento e esforços de momento fletor com os limites normativos.

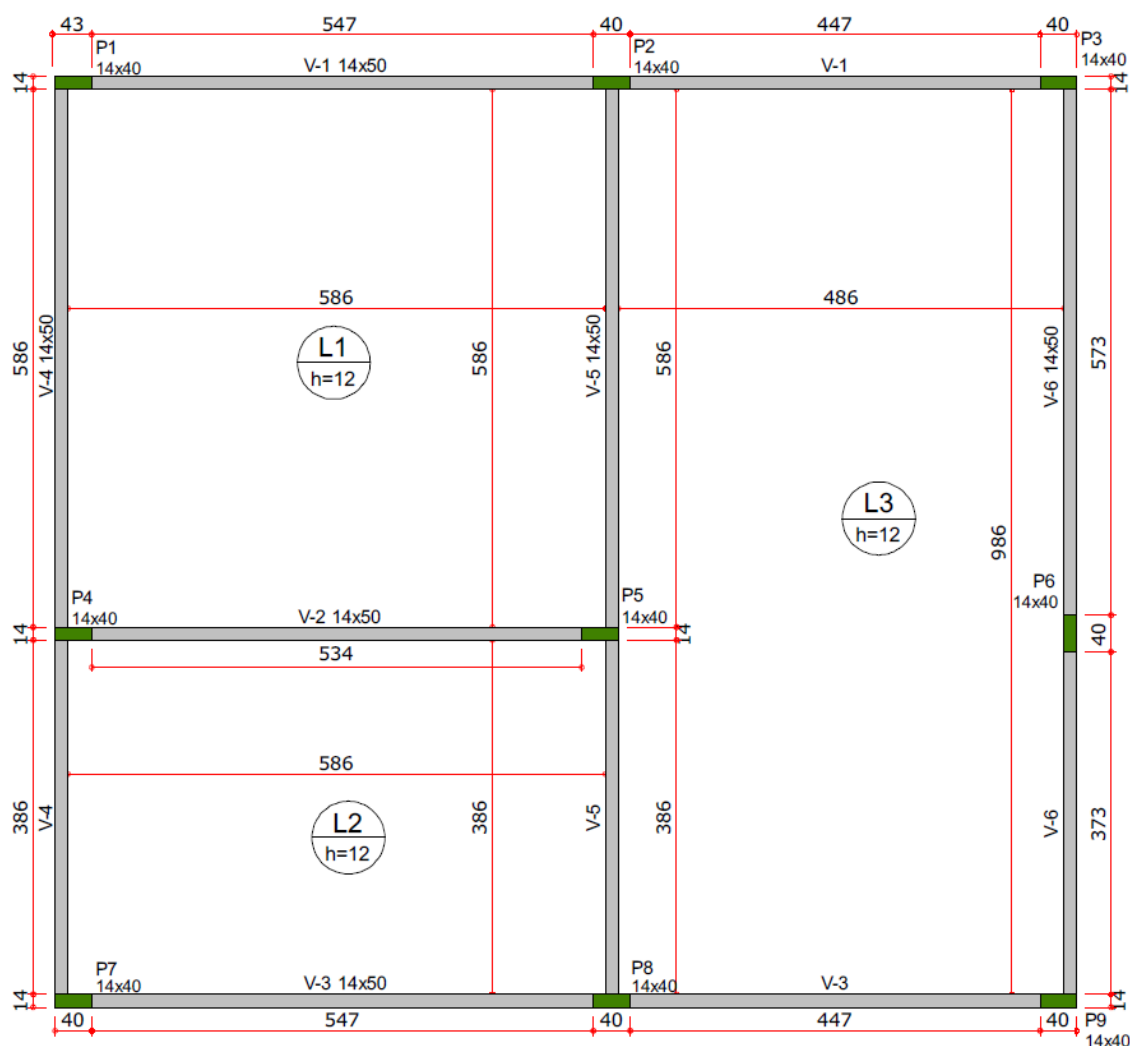
Por fim, foi comparado o projeto da laje realizada em concreto protendido com duas lajes em concreto armado, com diferentes concepções estruturais, por meio dos deslocamentos no tempo infinito, máximos esforços de momento fletor e índices de consumo de materiais - concreto, aço e forma - determinado para cada projeto.

Os resultados obtidos permitirão avaliar as vantagens e limitações de cada sistema construtivo, proporcionando ao interessado melhor entendimento do comportamento de lajes protendidas e da precisão dos métodos computacionais no dimensionamento estrutural.

4 ESTUDO DE CASO

Como referência para o projeto da laje protendida, foi utilizado o pavimento apresentando no exemplo 5 do Capítulo 7 do livro “Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: Segundo a NBR 6118:2023” (Ver Figura 15), dos autores Carvalho e Filho (2023).

Figura 15 – Planta de forma do pavimento referência – caso 1

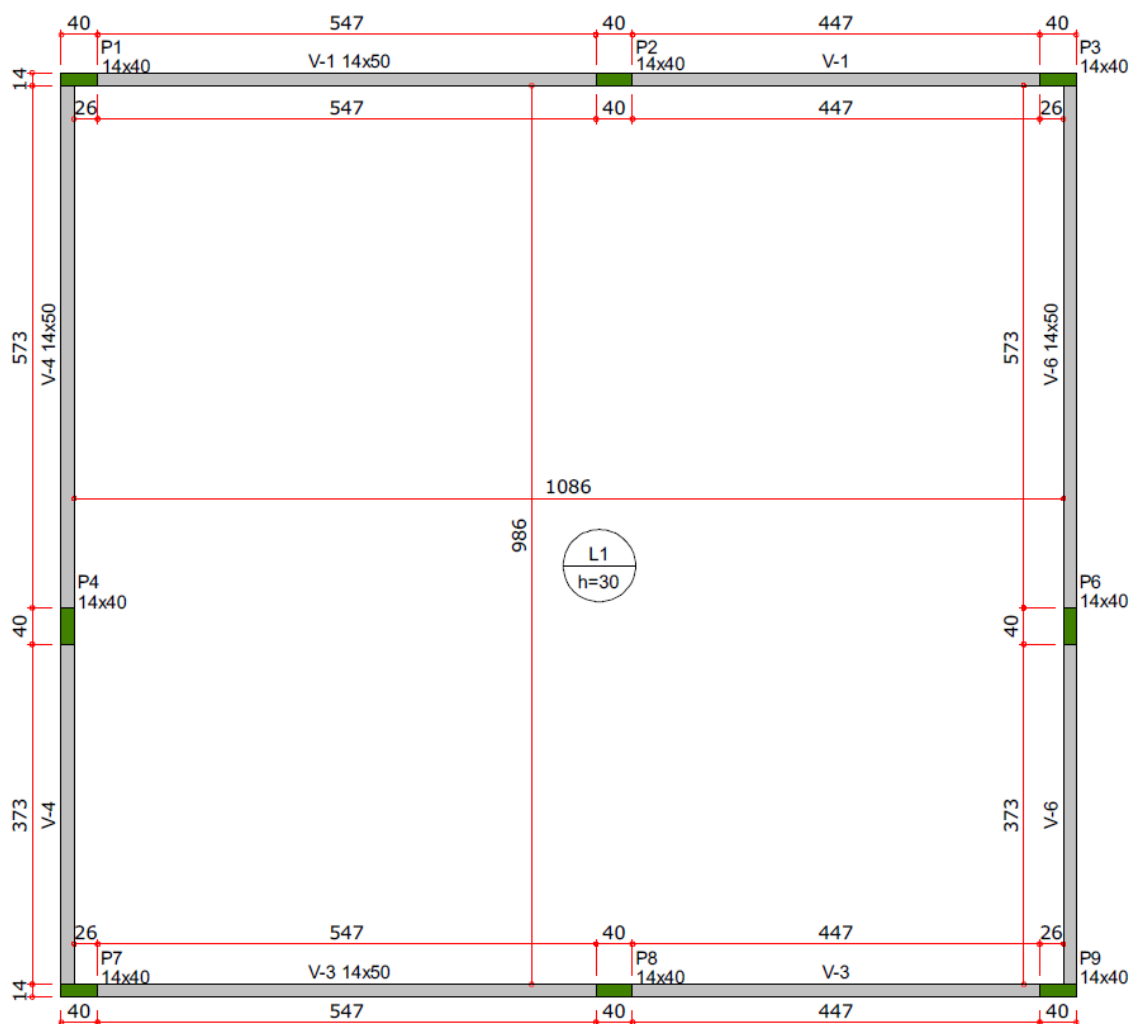


Fonte: Adaptado de Carvalho e Filho (2023)

No pavimento apresentado, foram eliminadas as vigas V2 e V5 e o pilar P5. As lajes L1, L2 e L3 foram unidas em uma única laje maciça protendida, com dimensões no plano de 11x10m. O pilar P4 foi rotacionado em 90° à esquerda e suas faces alinhadas com o pilar P6 a fim de remover as interferências no espaço interno do ambiente. As alterações descritas, ainda em concreto armado, estão apresentadas

na Figura 16. Em seguida esse mesmo esquema estrutural será calculado com uma laje em concreto protendido.

Figura 16 - Planta de forma do pavimento em concreto armado - caso 2



Fonte: Autoria própria

O pavimento comportará um escritório financeiro instalado acima de uma garagem. Na busca em maximizar o número de vagas de veículos, optou-se pelas adequações mencionadas e a utilização de uma laje maciça protendida. Ademais, o pavimento está localizado em perímetro urbano, estando, portanto, sujeito a classe de agressividade ambiental II.

Respeitando o valor mínimo sugerido pela ABNT NBR 6118 (2023) para protensão, será utilizado concreto da classe C30, ou seja, com resistência característica à compressão de 30 MPa. As cordoalhas de protensão serão engraxadas e com diâmetro de 12,7mm (1/2"). As armaduras passivas consistirão em

aço CA-50 e CA-60, ou seja, aço para concreto armado com resistência característica ao escoamento de 500 e 600 MPa, respectivamente.

O pavimento será analisado, dimensionado e detalhado no *software* comercial Eberick, bem como as análises do Estado Limite de Serviço e Estado Limite Último.

O pavimento apresentado na Figura 15 será estudado em três casos:

- a) Caso 1:** Mesma concepção estrutural da Figura 15 (Ver Apêndice A);
- b) Caso 2:** Calculado com uma única laje em concreto armado, com as alterações indicadas na subseção 3.2 (Ver Apêndice B);
- c) Caso 3:** Calculado com uma única laje em concreto protendido, com as alterações indicadas na subseção 3.2 (Ver Apêndice C).

4.1 DADOS DE PROJETO

Nos três casos mencionados, serão utilizados os seguintes dados de projeto:

- a)** Classe de agressividade ambiental (CAA) II;
- b)** Concreto C30 ($f_{ck} = 30 \text{ MPa}$);
- c)** Aço CA-50 e CA-60;
- d)** Carga de revestimento (Lajes): $154,50 \text{ kgf/m}^2$ (ABNT NBR 6120:2019);
- e)** Carga acidental (Lajes): 250 kgf/m^2 (ABNT NBR 6120:2019);
- f)** Seção vigas: 14x50 cm;
- g)** Seção pilares: 14x40 cm;
- h)** Altura do pé-direito: 3,10 m;

Embora a NBR 6118 (2023) estabeleça o valor mínimo de $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ para estruturas de concreto armado enquadradas na CAA II – casos 1 e 2, optou-se pela adoção do concreto com $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ em ambos os pavimentos analisados. Tal escolha visa uniformizar os materiais empregados, permitindo que a comparação entre os modelos estruturais enfatize predominantemente a presença da protensão.

4.2 COMPARAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Para a comparação dos casos apresentados, serão avaliados os deslocamentos, no ELS e os esforços solicitantes, no ELU, além dos índices de projeto indicados a seguir:

- a) **Taxa de armadura:** Relação entre a massa de aço, em quilogramas, e volume de concreto, em metros cúbicos;
- b) **Taxa de concreto:** Relação entre volume de concreto, em metros cúbicos, e área construída, em metros quadrados;
- c) **Taxa de forma:** Relação entre área de forma, em metros quadrados, e o volume de concreto, em metros cúbicos.

4.2.1 Resultado dos deslocamentos - ELS

Para analisar o deslocamento dos pavimentos, consideremos o valor limite estabelecido pela NBR 6118: $L/250$ para aceitabilidade sensorial, sendo L o vão teórico do elemento, na combinação quase permanente. Conforme a norma, todavia, o deslocamento limite para a laje do caso 2 seria de 4,00 cm, um valor considerado exagerado para lajes. Por esta razão, optou-se por adotar como deslocamento limite para os três casos, o maior deslocamento obtido no caso 1: 2,07cm, conforme apresentado na Tabela 7 juntamente com os deslocamentos totais de cada laje do caso 1 e caso 2.

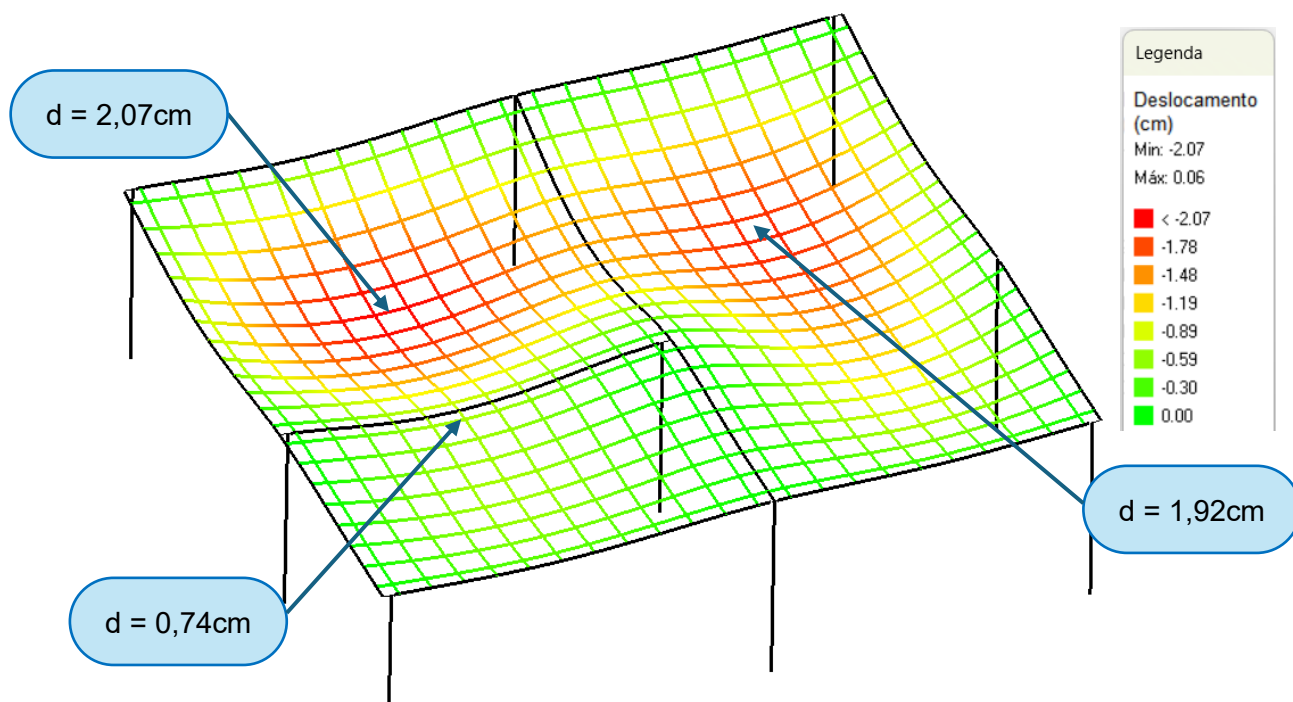
Tabela 7 - Flechas no tempo infinito para os casos 1 e 2

Laje		Menor vão (cm)	Flecha limite (cm)	Flecha total (cm)
Caso 1	L1	600	2,40	2,07
	L2	400	1,60	0,74
	L3	500	2,00	1,92
Caso 2	L1	1000	4,00	2,08

Fonte: Autoria própria

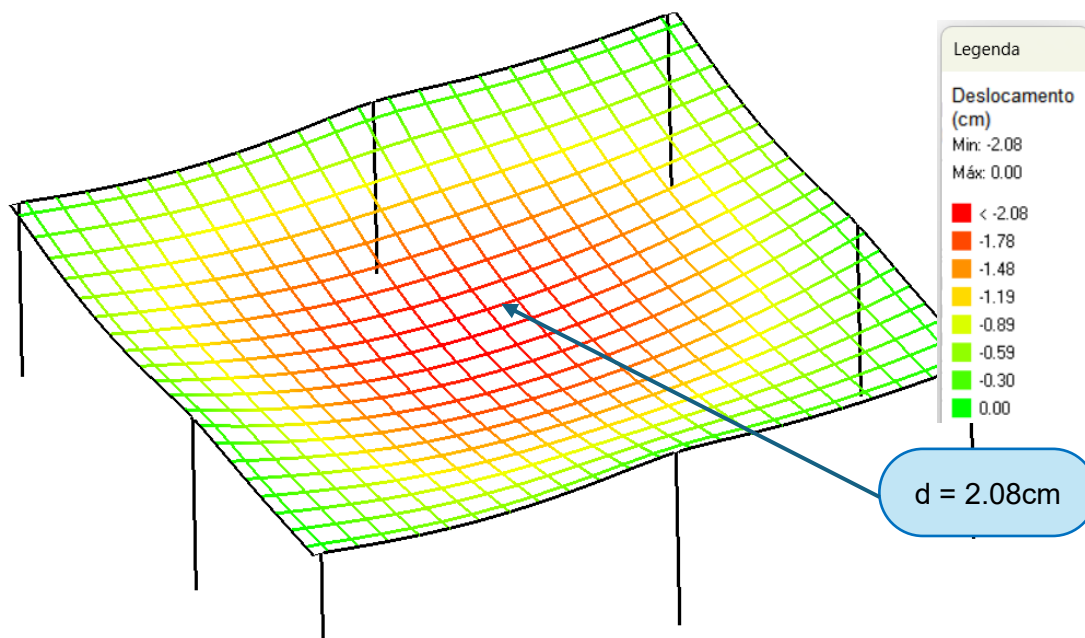
Nas Figuras 17 e 18, estão representadas as lajes de ambos os casos com a distribuição dos deslocamentos apresentados no painel de lajes analisado com analogia de grelha, com malhas de 50x50cm.

Figura 17 - Deslocamentos nas lajes do caso 1 ($h=12\text{cm}$)



Fonte: Autoria própria

Figura 18 - Deslocamentos na laje do caso 2 ($h=30\text{cm}$)



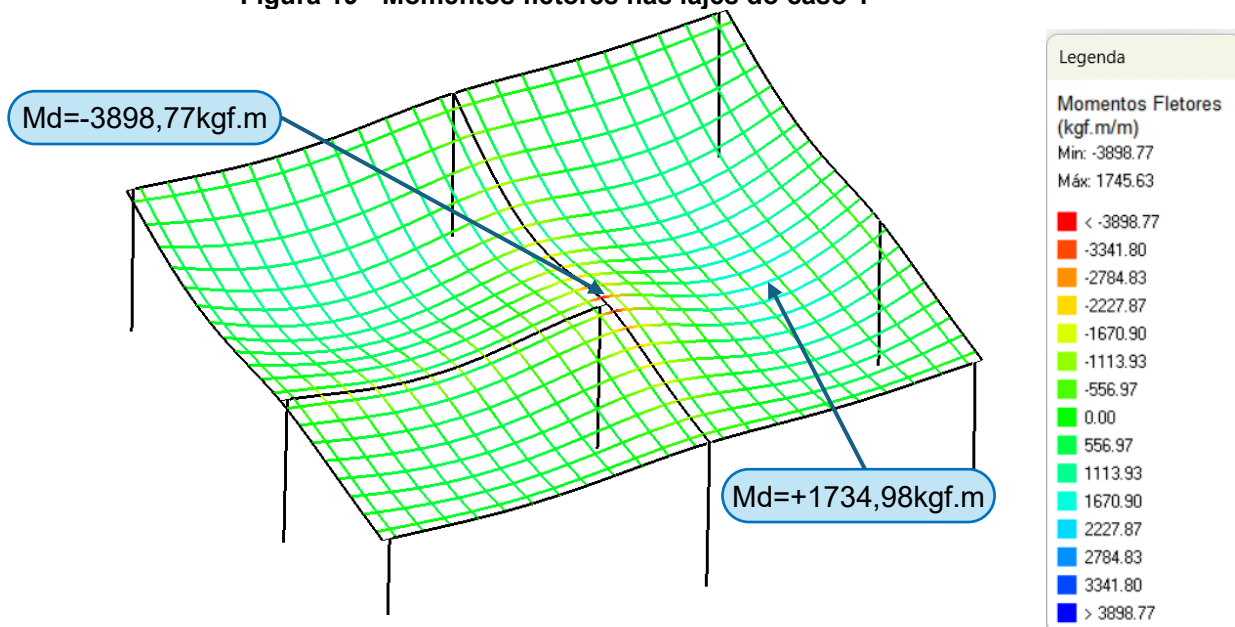
Fonte: Autoria própria

4.2.2 Resultado dos esforços solicitantes – ELU

Para fins de comparação, são analisados os momentos fletores, que predominam em elementos do tipo laje. No caso 1, existe a continuidade entre as

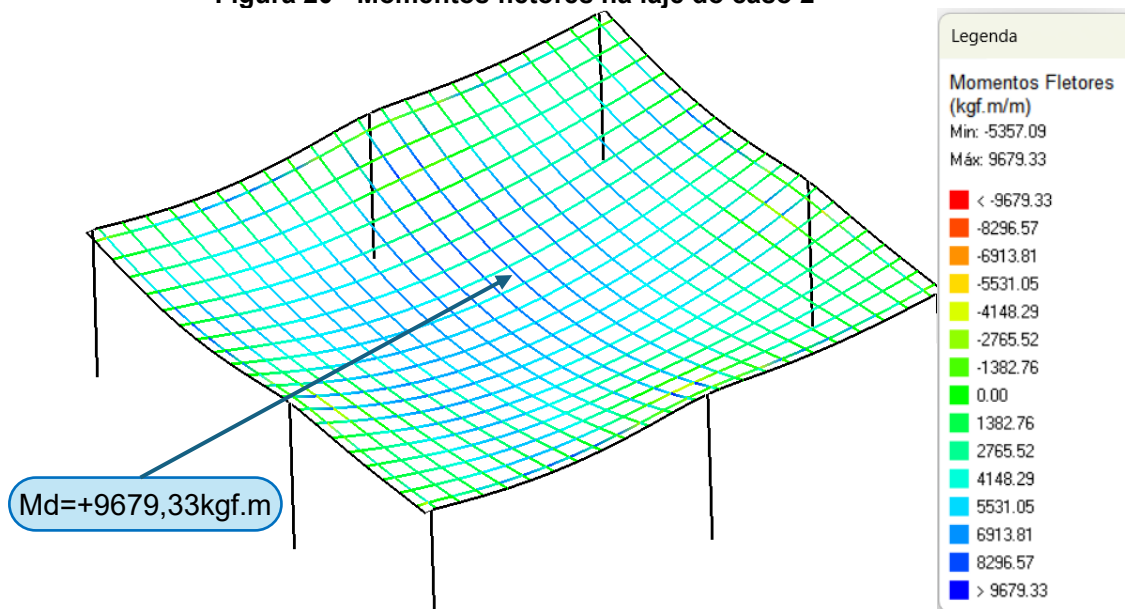
lajes, provocando momentos negativos nos encontros das mesmas sobre as vigas de apoio, reduzindo assim os momentos positivos. Já no caso 2, a laje é biapoiada em vigas de bordo, o que resulta em momentos positivos mais elevados. As Figuras 19 e 20 ilustram esses esforços nas grelhas de ambos os casos.

Figura 19 - Momentos fletores nas lajes do caso 1



Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Momentos fletores na laje do caso 2



Fonte: Autoria própria

4.2.3 Índices de materiais

Os índices de projeto dos casos 1 e 2 são apresentados nas Tabelas 8 e 9, respectivamente. As pranchas com o detalhamento das plantas de formas e armaduras positivas e negativas das lajes se encontram nos apêndices A e B, respectivamente.

Tabela 8: Consumo de materiais e índices de projeto - caso 1

CONSUMO DE MATERIAIS				
MATERIAIS	VIGAS	PILARES	LAJES	TOTAL
Peso de aço (kg)	324,90	277,50	907,66	1510,06
Volume de concreto (m ³)	3,79	2,07	12,60	18,46
Área de forma (m ²)	53,40	39,85	104,70	197,95
ÍNDICES DE PROJETO				
Taxa de armadura (kg/m ³)	81,80			
Taxa de concreto (m ³ /m ²)	0,16			
Taxa de forma (m ² /m ³)	10,72			

Fonte: Autoria própria

Tabela 9: Consumo de materiais e índices de projeto - caso 2

CONSUMO DE MATERIAIS					
MATERIAIS	VIGAS	PILARES	LAJES	TOTAL	VAR. CASO 1 (%)
Peso de aço (kg)	241,50	125,60	1844,40	2211,50	+46,45%
Volume de concreto (m ³)	2,72	0,83	32,09	35,64	+93,07%
Área de forma (m ²)	32,59	16,09	106,97	155,65	-21,37%
ÍNDICES DE PROJETO					
Taxa de armadura (kg/m ³)	62,05				-24,14%
Taxa de concreto (m ³ /m ²)	0,32				+93,07%
Taxa de forma (m ² /m ³)	4,37				-59,27%

Fonte: Autoria própria

A análise dos dados mostra que, apesar da redução no consumo de aço das vigas e pilares do caso 1 para o caso 2, este último demandou maior quantidade global, principalmente porque a retirada das vigas V2 e V5 e do pilar P5, exigiu o aumento da espessura da laje e, conseqüentemente, de seu peso próprio. Sem esses elementos de apoio, a laje precisa ser mais espessa para controlar as deformações, sobretudo no meio do vão, o que resulta em um volume significativamente maior de concreto. Por outro lado, observa-se uma redução no uso de formas devido à eliminação das vigas e pilares internos.

5 DIMENSIONAMENTO DA LAJE PROTENDIDA

Para o estudo do caso 3, consideremos um pavimento semelhante ao apresentado no caso 2: uma única laje apoiada em todo o contorno por vigas, com dimensões de 11x10m. Nesta laje serão posicionadas as cordoalhas de protensão do tipo CP-190 RB 12,7.

5.1 ESPESSURA DA LAJE

Seguindo os parâmetros da NBR 6118 (2023), a espessura mínima para a laje deste projeto, sendo biapoiada, deve ser equivalente à:

$$h_{min} = \frac{l}{42} = \frac{1100}{42} = 26cm \quad [5]$$

Todavia, Emerick (2005) orienta, para lajes cujos vãos entre apoios variam de 9 a 11cm, espessuras entre 22 e 24cm, podendo este valor reduzir mediante verificação das flechas máximas.

Para a laje analisada, fora escolhida inicialmente a espessura de **22cm**.

5.2 POSICIONAMENTO DAS CORDOALHAS

O correto posicionamento das cordoalhas em lajes protendidas é essencial para garantir o bom funcionamento da estrutura. A distribuição em planta deve acompanhar a disposição dos vãos e das cargas, permitindo que a força de protensão atue de forma equilibrada e eficiente. Já o posicionamento inteligente do perfil vertical dos cabos possibilita a compensação das cargas atuantes, contribuindo para a redução das flechas e das tensões no concreto.

5.2.1 Distribuição em planta

Ao contrário das lajes lisas, apoiadas por pilares em seu interior, a laje analisada apoia-se em vigas de bordo, permitindo que seu interior fique completamente livre de obstáculos como pilares ou vigas.

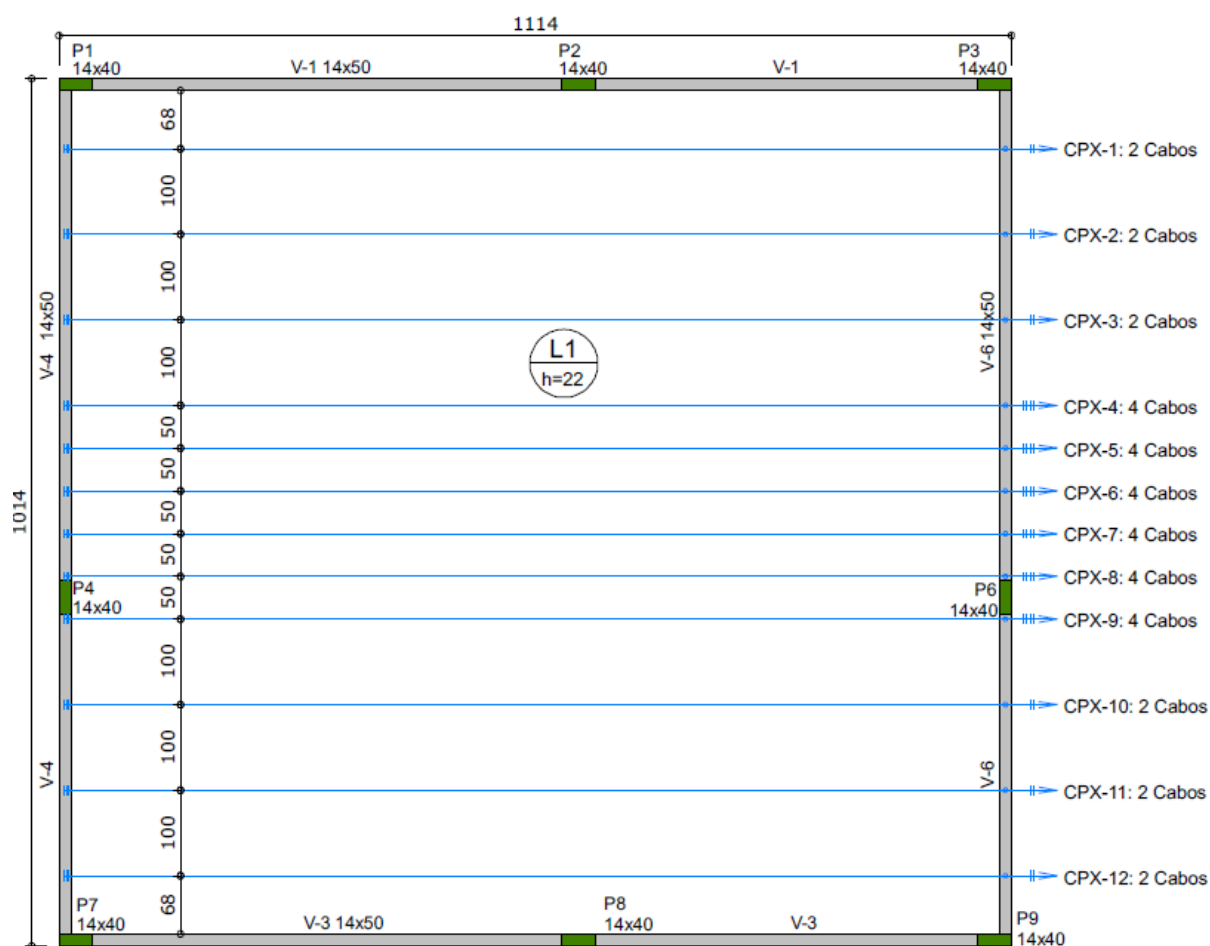
Sendo assim, os cabos serão organizados em feixes, e estes distribuídos ao longo da laje de modo a melhor cobrir a distribuição dos momentos fletores atuantes – cuja distribuição é muito semelhante à grelha mostrada no caso 2: uma alta concentração de cabos no meio vão, mas que diminui à medida que se aproximam das bordas.

Ademais, devem ser respeitados os critérios fornecidos pela NBR 6118 (2023) pertinentes a este projeto. São eles:

- a) Quantidade máxima de cordoalhas por feixe: 4 cabos;
- b) Espaçamento mínimo entre feixes: 5,00cm;
- c) Espaçamento máximo entre cabos: 120cm ou seis vezes a altura da laje;
- d) Distância mínima entre cabos nos apoios: 7,00cm.

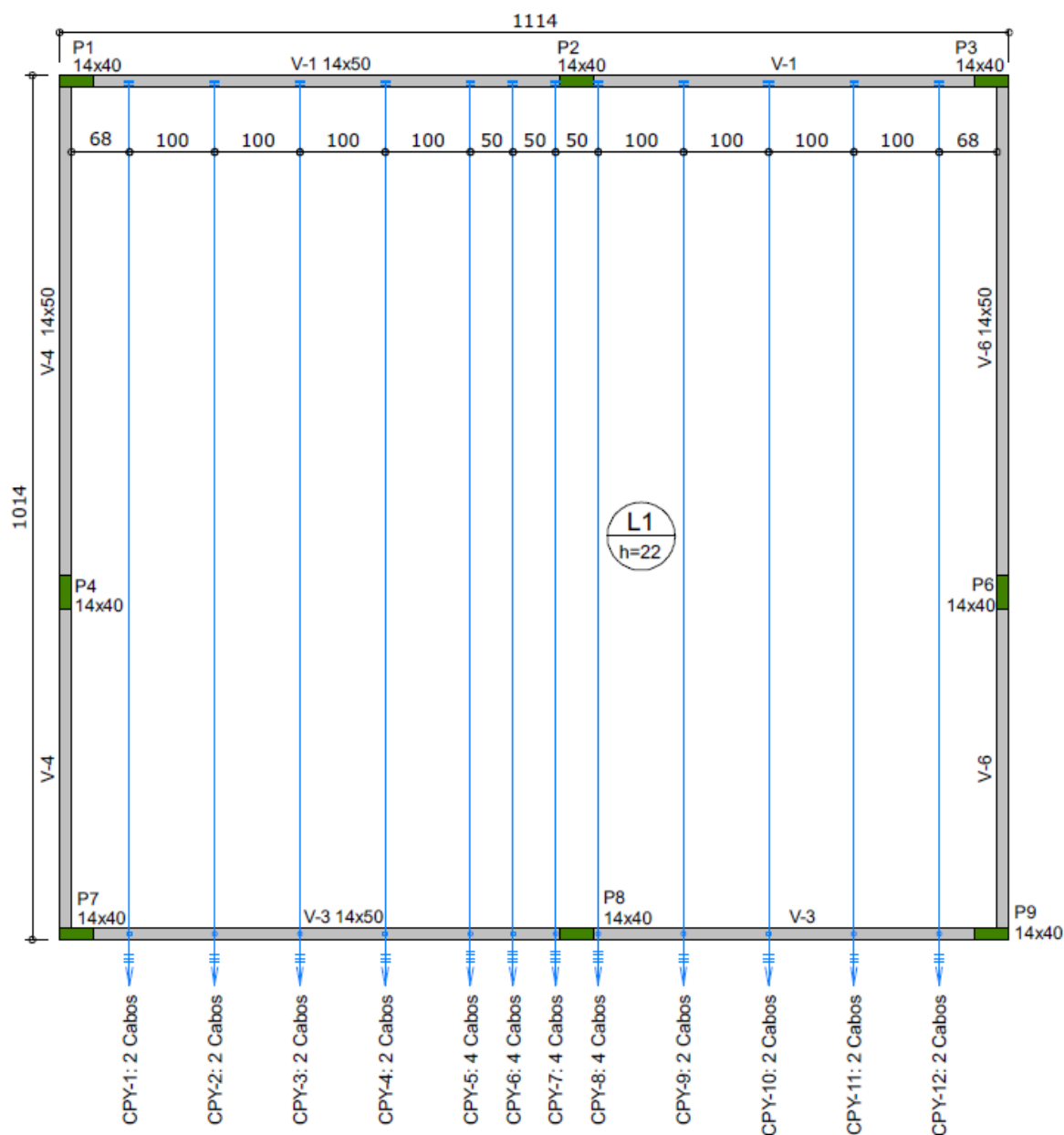
A disposição dos feixes, bem como a quantidade de cabos em cada um, nos sentidos X e Y, estão representados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21 – Distribuição dos feixes – Direção X



Fonte: Autoria própria

Figura 22 – Distribuição dos feixes – Direção Y



Fonte: Autoria própria

5.2.2 Perfil vertical dos cabos

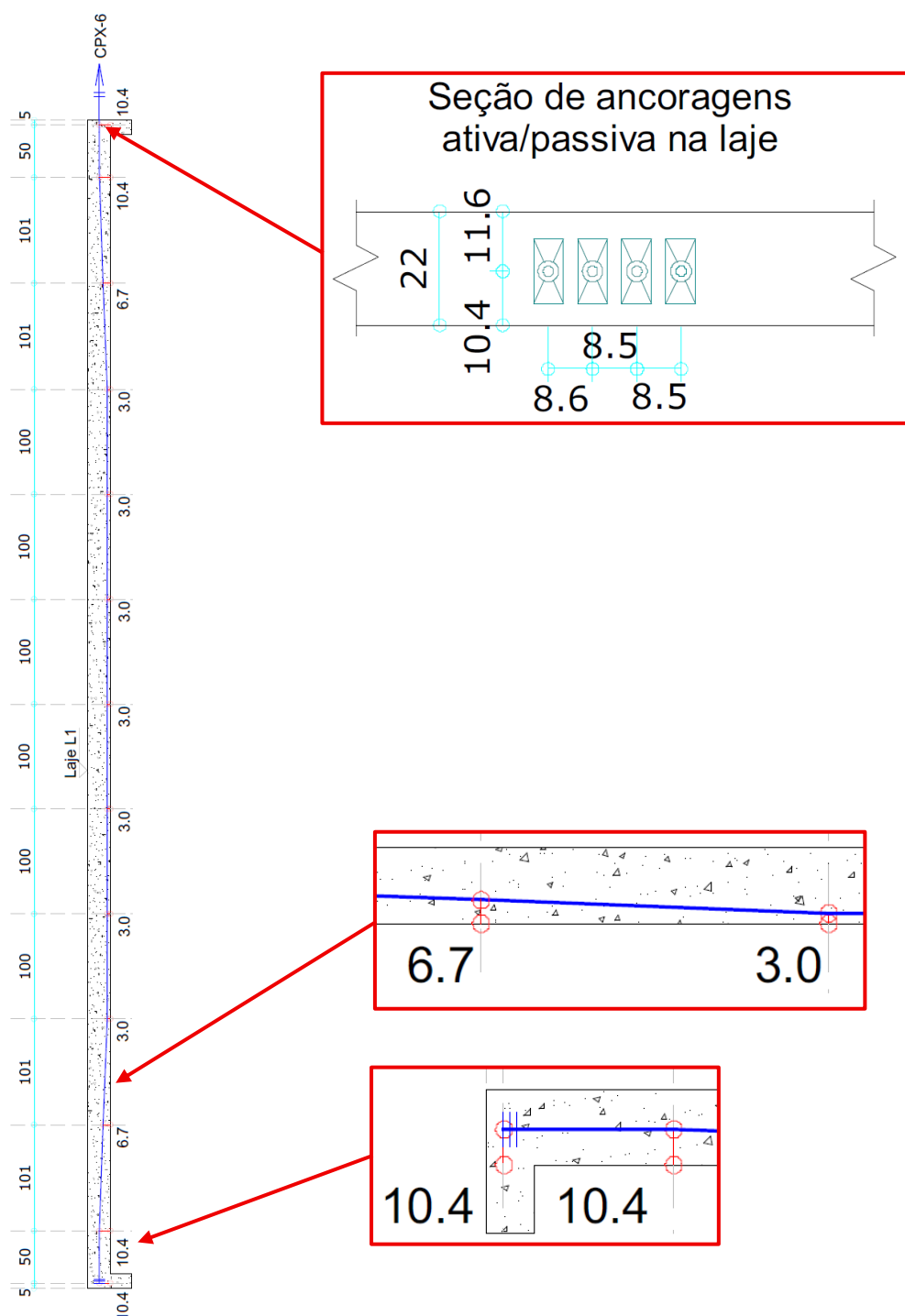
Para o posicionamento dos cabos no perfil longitudinal da laje, devem ser respeitados o cobrimento mínimo de 30mm das faces externas e um trecho reto de 50cm a partir do ponto de ancoragem das cordoalhas (NBR 6118, 2023).

Ademais, para melhor eficiência do projeto, a disposição de cada cordoalha segue o diagrama de momento fletor ao longo do comprimento da laje: as ancoragens

são posicionadas no centroide da laje e seguem em parábola até o ponto mais próximo da face inferior, no meio do vão.

Todos as cordoalhas seguem a mesma disposição vertical e são representadas, na direção X, pelo feixe CPX-6 indicado na Figura 23.

Figura 23 – Perfil vertical do feixe CPX-6 – Direção X (Sem escala)



Fonte: Autoria própria

5.3 FORÇA DE PROTENSÃO APLICADA

Para a cordoalha do tipo CP-190 RB 12,7 com sete fios, a NBR 7483 (2021) especifica uma carga mínima de ruptura equivalente a 18,37 tf/cm² e uma área de aço nominal de 1,01cm². Desse modo a tensão máxima de protensão é dada por:

$$\sigma_{pi} = 0,80 * 18,37 = 14,70 \text{ tf/cm}^2$$

Conhecendo a tensão máxima, pode-se calcular a força máxima a ser aplicada no ato de protensão:

$$P_0 = 14,70 * 1,01 = 14,85 \text{ tf} \approx 15 \text{ tf}$$

Vale ressaltar que esta força é aplicada pelo atuador hidráulico no ato de protensão. Para o modelo de cálculo, fora calculada pelo *software* uma perda inicial de 6% a 8% em cada cordoalha, e considerada uma perda progressiva de 12%, totalizando uma perda na ordem de 20%, reduzindo o módulo da força de protensão aplicada de 15tf → 12tf/cordoalha.

5.4 ARMADURA DE FRETAGEM

Ao aplicar a força de protensão, surgem tensões de tração no encontro ancoragem-concreto que podem ser combatidas com a chamada armadura de fretagem (EMERICK, 2005). Demarche (2024) recomenda que esta armadura pode seja calculada através da seguinte fórmula:

$$A_s = \frac{1,4 * \left[0,3 * P_0 * \left(1 - \frac{a}{h} \right) \right]}{f_{yd}} = 0,61 \text{ cm}^2 \quad [6]$$

Onde:

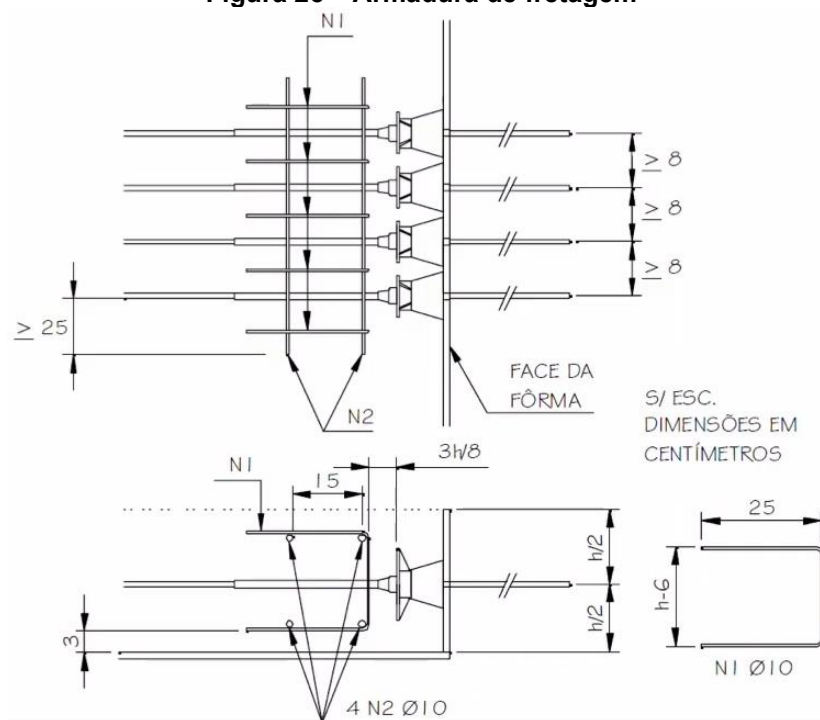
P_0 = força de protensão inicial (150kN);

a = altura da placa de ancoragem (12,7cm);

h = espessura da laje (22cm);

f_{yd} = resistência de cálculo ao escoamento do aço (43,48kN/cm²)

Emerick (2005) porém, indica uma armadura mínima a ser utilizada para fretagem, conforme representada na Figura 25:

Figura 25 – Armadura de fretagem

Fonte: Emerick (2005)

5.5 NÍVEL DE PROTENSÃO

Dos três níveis de protensão apresentados nos capítulos anteriores (parcial, limitada e completa), optou-se pela protensão limitada, onde se admite a presença de tensões de tração de baixa magnitude.

Considerando que, mesmo que não haja necessidade, a NBR 6118 (2023) ainda preconiza a adoção de armaduras passivas mínimas em elementos protendidos, esta opção apresenta-se como solução mais econômica que a protensão completa.

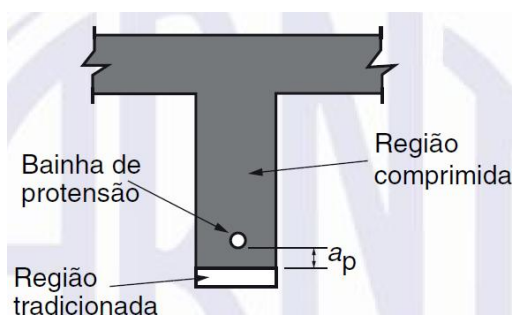
Na protensão limitada, o ELS-F é analisado nas combinações frequentes, e o ELS-D nas combinações quase permanentes.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Finalizado o lançamento dos cabos de protensão, a estrutura é calculada através do software e parte-se para a análise dos resultados.

A NBR 6118 (2023) permite ao projetista substituir a análise do ELS-D pelo ELS-DP, mais branda, desde que toda a região da seção transversal do elemento, com armadura ativa, esteja inteiramente comprimida. Esta região se estende à uma distância mínima de $a_p = 50\text{mm}$ da cordoalha de protensão, conforme evidenciado na Figura 26.

Figura 26 – Estado-limite de descompressão parcial



Fonte: ABNT NBR 6118 (2023)

O software *Eberick*® fornece esta distância que, no pior caso, resultou em 63,10mm. Portanto, para a análise desta laje será utilizado o ELS-DP.

De modo sucinto, a protensão será aprovada se o pior caso – feixes CPX-6 e CPY-6 – cumprir os limites apresentados na Tabela 10, compilados a partir da NBR 6118 (2023) e arredondados para coincidirem com os limites calculados, com maior precisão, pelo *Eberick*®.

Tabela 10 – Tensões limites para aprovação da protensão

ELS	Tensão máxima atuante no elemento protendido ($f_{ck} = 30\text{MPa}$)		
ELS-F	Compressão (+)	$\leq 0,60 * f_{ck}$	18,00MPa ou 180kgf/cm ²
	Tração (-)	$\leq \alpha * f_{ctk,inf}$	3,04MPa ou 30,41kgf/cm ²
ELS-DP	Compressão (+)	$\leq 0,45 * f_{ck}$	13,50MPa ou 135kgf/cm ²
	Tração (-)	$\leq \alpha * f_{ctk,inf}$	3,04MPa ou 30,41kgf/cm ²
ELU-AP	Compressão (+)	$\leq 0,70 * f_{ckj}$	14,36MPa ou 143,61kgf/cm ²
	Tração (-)	$\leq 1,20 * f_{ctmj}$	2,69MPa ou 26,98kgf/cm ²

Fonte: Autoria própria

Onde:

α = Fator de forma geométrica para seções retangulares. ($\alpha = 1,50$);

f_{ckj} = Resistência característica à compressão aos j dias;

$f_{ctmj} = 0,3 * (f_{ckj})^{\frac{2}{3}}$, resistência média a tração do concreto aos j dias.

$f_{ctk,inf} = 0,7 * f_{ctm}$, resistência característica inferior do concreto à tração direta;

O valor do $f_{ctk,inf}$ representa o fractil inferior à 5% dos resultados obtidos no ensaio de tração direta do concreto. Na falta destes ensaios, a norma permite seu cálculo através da expressão fornecida. Portanto, considerando um concreto C30:

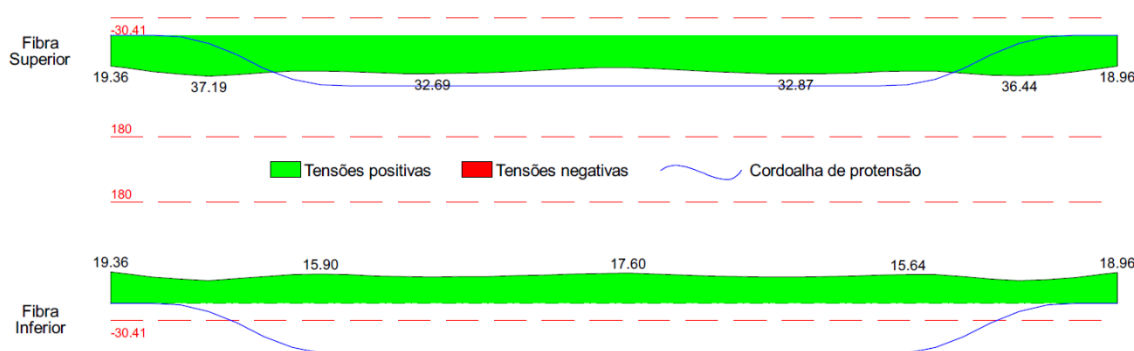
$$f_{ctk,inf} = 0,7 * 0,3 * (30)^{\frac{2}{3}} = 2,03MPa = 20,30kgf/cm^2 \quad [7]$$

O tensionamento das cordoalhas será em $j = 7$ dias. Para esta idade do concreto, fabricado com a utilização do cimento CP-IV, Helene (1996) conclui que é possível considerar uma resistência de 70% do f_{ck} . Tem-se então o f_{ckj} equivalente a cerca de 21MPa ou 210kgf/cm².

6.1 VERIFICAÇÃO ELS-F

A partir do *software Eberick®* é possível avaliar os diagramas de esforços solicitantes no ESL-F. Para suas respectivas combinações de cálculo, a Figura 27 apresenta as tensões ao longo da seção longitudinal da laje, no feixe CPX-6.

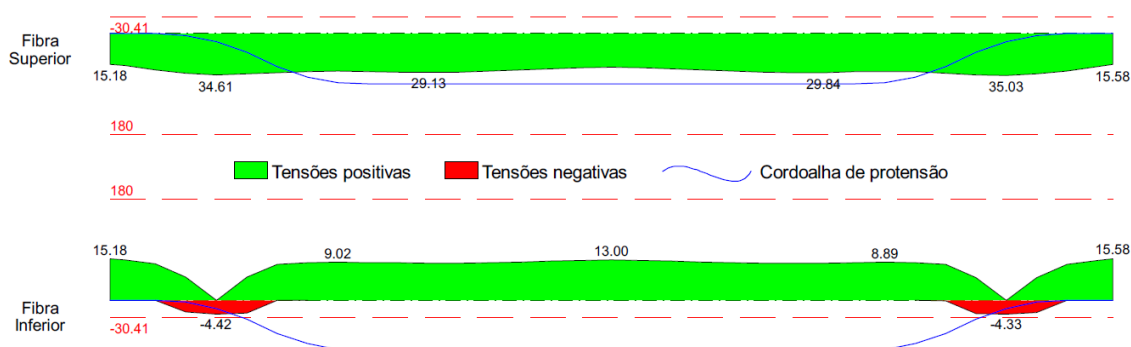
Figura 27 – Tensões ELS-F no CPX-6, em kgf/cm²



Fonte: Autoria própria

Na Figura 28, estão representadas as tensões no feixe CPY-6.

Figura 28 – Tensões ELS-F no CPY-6, em kgf/cm²



Fonte: Autoria própria

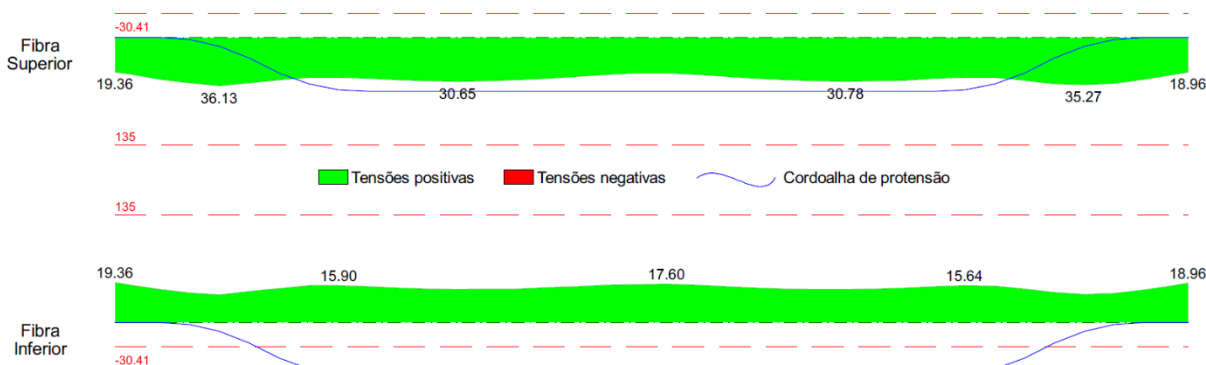
As linhas e os valores vermelhos representam as tensões limites de compressão e tração, previamente informadas na Tabela 10; a linha azul apresenta o traçado da cordoalha ao longo da seção longitudinal da laje. A região do diagrama preenchida em verde claro representa as tensões de compressão, enquanto a região preenchida com vermelho representa as tensões de tração.

A fibra superior indica as tensões na face superior da laje e, de mesmo modo, a fibra inferior indica as tensões na face inferior da laje. Nesta última, as tensões de tração foram completamente anuladas na direção X, e majoritariamente vencidas na direção Y. Dos diagramas expostos, conclui-se que a protensão da laje atende às condições do ELS-F.

6.2 VERIFICAÇÃO ELS-DP

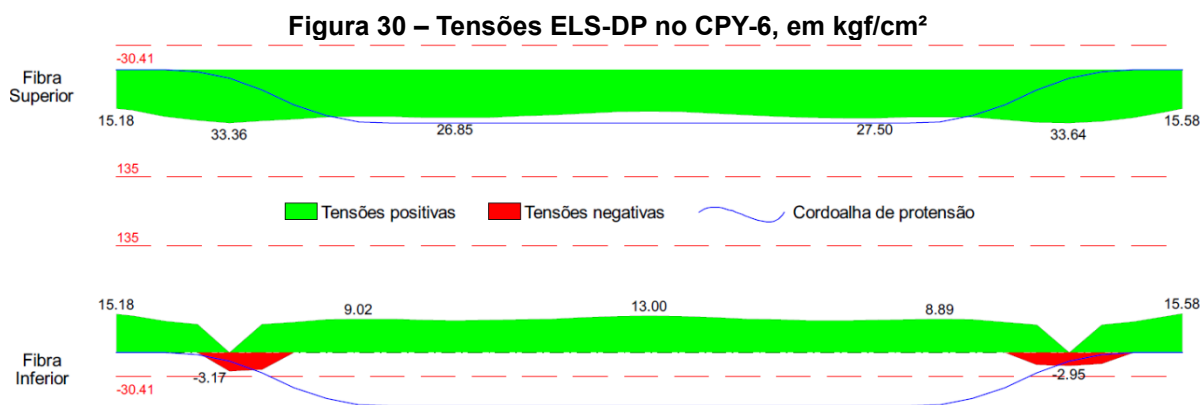
A partir do *software Eberick®* é possível avaliar os diagramas de esforços solicitantes no ESL-DP. Para suas respectivas combinações de cálculo, a Figura 29 apresenta as tensões ao longo da seção longitudinal da laje, no feixe CPX-6.

Figura 29 – Tensões ELS-DP no CPX-6, em kgf/cm²



Fonte: Autoria própria

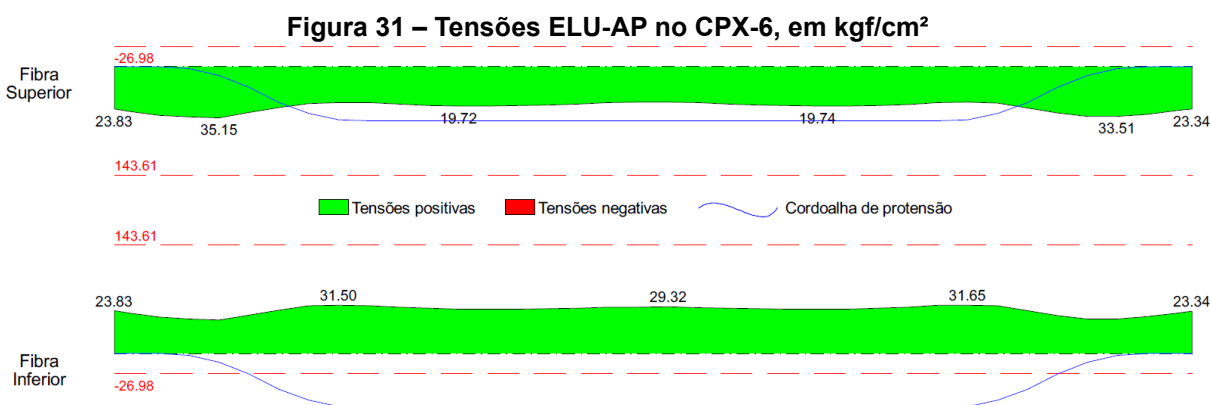
Na Figura 30, estão representadas as tensões no feixe CPY-6.



Também na análise do ELS-DP, as tensões resultantes estão dentro dos limites normativos, apesar da presença de pequenos esforços de tração na fibra inferior.

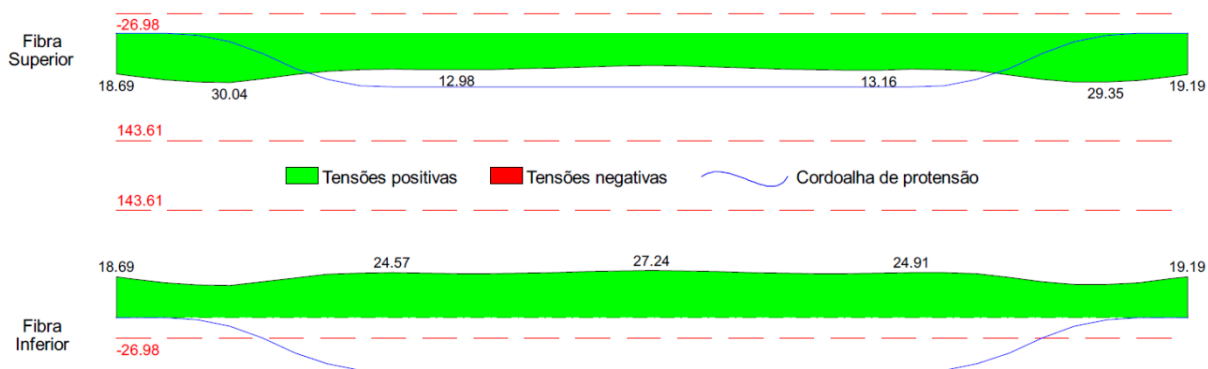
6.3 VERIFICAÇÃO ELU-AP

Do mesmo modo, para a análise do ELU-AP o *software* nos oferece os diagramas de tensões atuantes, reforçando que os limites de tensões neste estado são fornecidos a partir da resistência do concreto no ato da protensão, estimada por métodos da literatura, e confirmada *in loco* pelo relatório do ensaio de resistência à compressão do concreto. A Figura 31 representa as tensões no feixe CPX-6.



Na Figura 32 estão representadas as tensões no feixe CPY-6.

Figura 32 – Tensões ELU-AP no CPY-6, em kgf/cm²



Fonte: Autoria própria

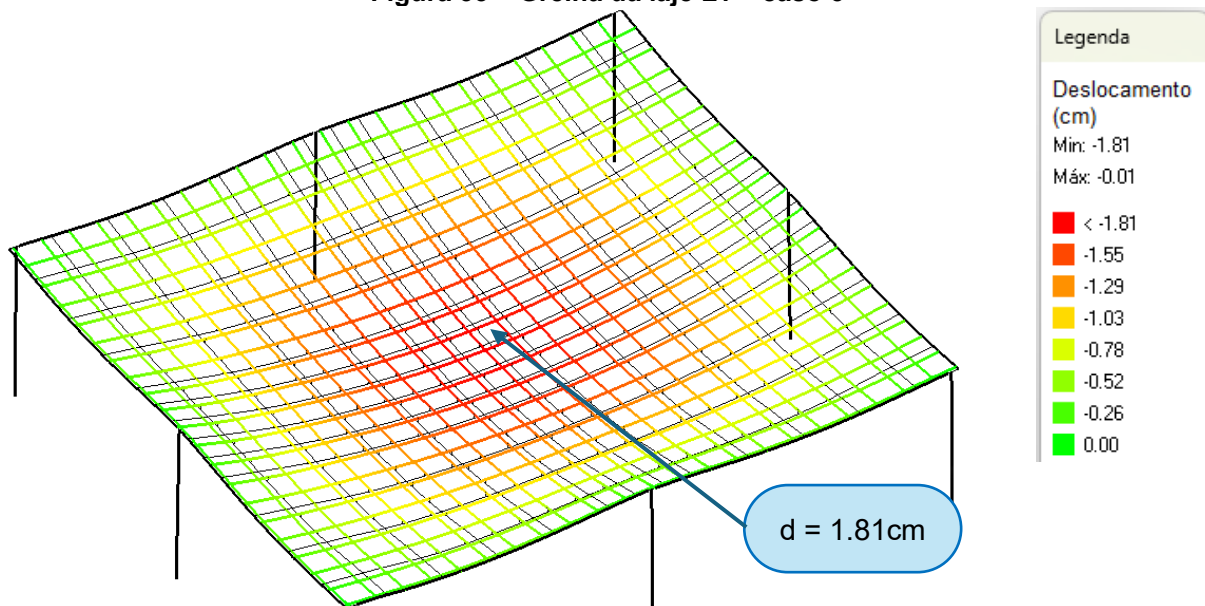
Verificando as tensões quanto ao ELU-AP, a protensão também se adequa aos limites normativos.

6.4 DESLOCAMENTO/FLECHA DA LAJE

Verificada as tensões resultantes da protensão, segue-se para a análise do deslocamento obtido na laje, devendo este ser limitado à $L/250$, equivalente à 4,00cm

A Figura 33 apresenta a grelha da laje L1 do caso 3, da qual se verifica sua flecha total, equivalente à 1,81cm na região central do vão.

Figura 33 – Grelha da laje L1 – caso 3



Fonte: Autoria própria

A Tabela 11 reúne as flechas totais dos três casos. A flecha do caso 3 apresentou uma redução de 12,98% em relação ao caso 2 e 12,56% em relação a maior flecha obtida no caso 1.

Tabela 11 - Flechas no tempo infinito para os casos 1, 2 e 3

Laje		Menor vão (cm)	Flecha limite (cm)	Flecha total (cm)
Caso 1	L1	600	2,40	2,07
	L2	400	1,60	0,74
	L3	500	2,00	1,92
Caso 2	L1	1000	4,00	2,08
Caso 3	L2	1000	4,00	1,81

Fonte: Autoria própria

6.5 ALONGAMENTO DOS CABOS

Com a estrutura processada, o *Eberick®* nos fornece o alongamento teórico Δl dos cabos, o qual ainda deve ser conferido após o tensionamento das cordoalhas, *in loco*. Na Tabela 12 estão indicados os alongamentos para o CPX-6 e CPY-6, que são similares aos demais cabos em suas respectivas direções.

Tabela 12 – Alongamento teórico dos cabos

Cordoalhas	Δl (cm)
CPX-6	7,12
CPY-6	6,47

Fonte: Autoria própria

6.6 ARMADURA PASSIVA DA LAJE

Analisando o resultado fornecido pelo *Eberick®*, a força de protensão utilizada já foi suficiente para dispensar o uso de armaduras passivas. Contudo, a NBR 6118 (2023) determina que, ainda neste caso, deve-se fazer a utilização de armaduras mínimas. A armadura negativa é calculada da mesma forma que no concreto armado. Para a armadura positiva, todavia, deve-se levar em conta a área de aço das cordoalhas, conforme exposto na Tabela 13.

Tabela 13 - Armadura passiva da laje L1 (Tabela 19.1 – NBR 6118:2023)

Armadura	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente	
Armadura negativa de bordas sem continuidade	$A_s \geq 0,67 * \rho_{\min} * b_w * h$	$A_s \geq 2,21 \text{ cm}^2/\text{m}$
Armadura positiva de lajes armadas em duas direções	$\frac{A_s}{b_w * h} \geq \rho_{\min} - 0,5 \left(\frac{A_p}{b_w * h} \right) \geq 0,5 * \rho_{\min}$	$A_s \geq 2,35 \text{ cm}^2/\text{m}$

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (2023)

Onde:

 A_s = área de aço da seção transversal (cm^2/m); $\rho_{\min}$ = taxa mínima de armadura de flexão (0,15% para $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$); b_w = base da seção transversal (100cm); h = espessura da seção transversal (22cm); A_p = área da seção transversal das cordoalhas ($2,02 \text{ cm}^2/\text{m}$ – pior caso)

Conforme as áreas de aço calculadas, a armadura negativa será composta por barras de $\emptyset 6,3 \text{ c}/14 \text{ cm}$, totalizando $2,23 \text{ cm}^2/\text{m}$, enquanto as armaduras positivas serão compostas por barras de $\emptyset 8,0 \text{ c}/20 \text{ cm}$, totalizando $2,52 \text{ cm}^2/\text{m}$.

O detalhamento das armaduras passivas pode ser conferido no Apêndice C.

6.7 INDICE DE MATERIAIS

Os índices de projeto do caso 3 são apresentados na Tabela 14 detalhados por elementos.

Tabela 14 – Consumo de materiais e índices de projeto – caso 3

CONSUMO DE MATERIAIS				
MATERIAIS	VIGAS	PILARES	LAJES	TOTAL
Peso de aço (kg)	280,00	273,80	581,09	1134,89
Volume de concreto (m^3)	2,72	1,34	23,53	27,59
Área de forma (m^2)	35,70	25,92	106,97	168,59
Peso cordoalha CP 190 RB (kg)	-	-	599,58	599,58
ÍNDICES DE PROJETO				
Taxa de armadura (kg/m^3)	41,13			
Taxa de concreto (m^3/m^2)	0,24			
Taxa de forma (m^2/m^3)	6,11			

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 15 é apresentado um resumo dos índices de projeto dos três casos, e uma comparação entre o caso 3 e os casos 1 e 2.

Tabela 15 - Consumo de materiais e índices de projeto - Resumo geral

CONSUMO DE MATERIAIS - RESUMO					
MATERIAIS - TOTAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3		
			CONSUMO	VAR. CASO 1 (%)	VAR. CASO 2 (%)
Peso de aço (kg)	1510,06	2211,50	1134,89	-24,84%	-48,68%
Volume de concreto (m ³)	18,46	35,64	27,59	+49,46%	-22,59%
Área de forma (m ²)	197,95	155,65	168,59	-14,83%	+8,31%
Peso cordoalha CP 190 RB (kg)	-	-	599,58	-	-
ÍNDICES DE PROJETO - TOTAL					
Taxa de armadura (kg/m ³)	81,80	62,05	41,13	-49,71%	-33,71%
Taxa de concreto (m ³ /m ²)	0,16	0,32	0,24	+49,46%	-22,59%
Taxa de forma (m ² /m ³)	10,72	4,37	6,11	-43,02%	+39,92%

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 16 é apresentado o custo, em reais, de cada caso apresentado neste trabalho. O custo unitário do aço da armadura passiva, do concreto C-30 e das formas de madeira foram extraídos da composição de custos desonerados do SINAPI-2026/01, enquanto o custo unitário da cordoalha CP-190 RB Ø12.7mm foi extraído da composição de preços da SEINFRA-CE devido a ausência deste dado nas planilhas SINAPI.

Tabela 16 - Custo de materiais dos pavimentos estudados

CUSTO DE MATERIAL - CASOS 1, 2 E 3					
ITENS	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO TOTAL			
		CASO 1	CASO 2	CASO 3	
Peso de aço (kg)	R\$ 8,00	R\$ 12.080,48	R\$ 17.692,00	R\$ 9.079,12	
Volume de concreto (m ³)	R\$ 816,64	R\$ 15.075,17	R\$ 29.105,05	R\$ 22.531,10	
Área de forma (m ²)	R\$ 132,66	R\$ 26.260,05	R\$ 20.648,53	R\$ 22.365,15	
Peso cordoalha CP 190 RB (kg)	R\$ 16,28	R\$ -	R\$ -	R\$ 9.761,16	
TOTAL		R\$ 53.415,70	R\$ 67.445,58	R\$ 63.736,53	

Fonte: Autoria própria

Dos índices resultantes é possível aferir que a utilização de laje em concreto protendido forneceu uma economia de aço, referente a armadura passiva, em relação ao caso 1 e sobretudo ao 02; ainda apresentou acréscimo no consumo de concreto em relação ao caso 1 – o que é esperado devido a retirada dos apoios internos – mas gerou economia em relação ao caso 2, pois a protensão possibilitou uma redução razoável de sua espessura ($30 \rightarrow 22\text{cm}$); quanto a utilização de formas, não houve mudança para a laje em relação ao caso 2 mas, devido à redução de sua espessura, os elementos estruturais, vigas e pilares, tornaram-se maiores, exigindo maior quantidade de forma.

Quanto ao custo total, o pavimento do caso 3 (laje, vigas e pilares) apresenta um acréscimo de 19,32% em relação ao pavimento do caso 1 – era esperado um aumento devido a retirada das vigas e pilar internos – e uma economia de 5,50% em relação ao caso 2 – economia também esperada devido, sobretudo, à redução de espessura da laje.

As pranchas com o detalhamento da planta de forma, traçado das cordoalhas e armaduras passivas das lajes encontram-se no Apêndice C.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou, dimensionou e comparou o desempenho estrutural de um pavimento com laje maciça em concreto protendido em relação a duas alternativas em concreto armado, considerando diferentes concepções estruturais. A metodologia adotada, baseada na ABNT NBR 6118:2023 e aplicada por meio do software Eberick®, permitiu a verificação dos Estados Limites de Serviço e Último, bem como a avaliação dos principais índices de consumo de materiais.

A análise dos casos 1 e 2 evidenciou que a eliminação de vigas e pilares internos, embora favorável do ponto de vista arquitetônico, resulta no aumento da espessura da laje, do volume de concreto e do peso próprio, refletindo em maiores deslocamentos e esforços solicitantes. Como consequência, observa-se maior consumo de materiais para o atendimento aos critérios normativos.

Em contrapartida, o caso 3, em concreto protendido, apresentou maior eficiência estrutural ao permitir a redução da espessura da laje em relação ao caso 2, mantendo os deslocamentos dentro dos limites normativos. A ação da protensão contribuiu para a redução dos momentos fletores e das flechas, promovendo melhor aproveitamento do material resistente e viabilizando vãos maiores com maior liberdade arquitetônica.

Os índices de projeto indicaram que, com o uso da protensão, é possível obter economia no uso de armaduras passivas - pois agora há um melhor aproveitamento da resistência da seção de concreto – e redução no consumo de concreto na adoção de um modelo arquitetônico com presença de vão maiores que o usualmente adotado no concreto armado.

Conclui-se, portanto, que a laje maciça protendida constitui uma solução estrutural eficiente e tecnicamente consistente, desde que atendidos os critérios normativos e adotado adequado controle de projeto e execução.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dando continuidade ao dimensionamento de lajes protendidas, segue-se sugestões de temas para trabalhos futuros que abordam a influência dos níveis de protensão e do sistema estrutural utilizado em projeto, bem como a diferença de resultados obtidos entre *softwares* comerciais concorrentes.

- Influência do nível de protensão (parcial, limitada e completa) no desempenho estrutural de lajes maciças protendidas;
- Comparação entre lajes maciças protendidas com e sem vigas de bordo;
- Estudo comparativo entre lajes maciças protendidas e lajes nervuradas protendidas para grandes vãos;
- Análise comparativa entre diferentes *softwares* comerciais no dimensionamento de lajes protendidas;

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. 5. ed. Rio Grande: Editora Dunas, 2023. 422 p. v. 2. ISBN 978-85-86717-23-9.

ARCELORMITTAL. **Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido** – Aços Longos. Catálogo, s/d, 12p. Disponível em: <https://www.belgo.com.br/wp-content/uploads/2019/02/Fios-e-cordoalhas-2019.pdf> . Acesso em 07/08/2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14931: **Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras** — Requisitos. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15200: **Projeto e estruturas de concreto em situação de incêndio**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto**: Procedimento. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120: **Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7482: **Fios de aço para estruturas de concreto protendido** - Especificação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7483: **Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido** - Especificação. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8681: **Ações e segurança nas estruturas** - Procedimento. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8953: **Concreto para fins estruturais** — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do concreto protendido**. Notas de aula (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. UNESP. São Paulo, p. 267. 2024.

BRISOLLA-ZARA, E. R. **Projeto executivo de uma viga biapoiada em concreto protendido com cordoalhas engraxadas**: estudo de caso. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2023.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil: Relatório de insumos e composições – Goiás – janeiro 2026. Goiânia, 2026. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br>. Acesso em: 07 fev. 2026.

CARLOS, T. B. **Análise e dimensionamento estrutural de uma laje lisa com protensão não aderente**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – UNIPAMPA, Alegrete, p. 138. 2013.

CARNEIRO, Anselmo Leal. **Análise e dimensionamento de lajes lisas protendidas sem aderência**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2015.

CARVALHO, R. C; FILHO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: Segundo a NBR 6118:2023. 5. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2024. 479 p. ISBN 978-85-7600-617-6.

CHOLFE, L; BONILHA, L. **Concreto Protendido**: Teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 2018. 345 p. ISBN 978-85-7266-454-7.

DEMARCHE. **Protensão Faixa-Preta**. Hotmart, 2024. Disponível em: <https://hotmart.com/pt-br/marketplace/produtos/protensao-faixa-preta/C87433645L>. Acesso em: 01/09/2025

EMERICK, A. A. **Projeto e execução de lajes protendidas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 191 p. ISBN 85-7193-117-8.

ENGENHARIA ATIVA. **O vídeo mais completo sobre protensão do youtube** - laje com 15m sem vigas. YouTube, 27/11/2021. Disponível em: <https://youtu.be/Ssckl8b-mUc?si=VuXITeA0jQbFF-D5>. Acesso em: 07/08/2025.

HANAI, J .B. **Fundamentos do Concreto Protendido**. São Carlos, SP: EESC-USP, 2005. E-book (116p.) P&B. Disponível em: <https://ecivilufes.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/11/fundamentos-do-concreto-protendido-hanai-j-b.pdf> . Acesso em: 05/08/2025.

HELENE, P. R. L. **Resistencia do concreto sob carga mantida e a idade de estimativa da resistência característica**. Revista Abesc, v. 2 , n. 8 , p. 16-26, 1996.

HUGO, B.; SOUZA, V. DE. **Estudo comparativo de lajes maciças de concreto armado e lajes lisas de concreto protendido não aderente**. Uniceplac.edu.br, 2022.

LINCK, B.R. **Lajes lisas protendidas por cordoalhas engraxadas: avaliação do processo executivo em comparação ao do concreto armado convencional em edificações residenciais**. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

MELLO, Ana Lucia Vargas de. **Cálculo de lajes lisas com protensão parcial e limitada**. 2005. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

PTE. **Acessórios para protensão não aderente**. Pós-Tensão Engenharia, 2018. Disponível em: <https://www.ptec.com.br/informacao/acessorios-para-protensao-nao-aderente>. Acesso em: 07 ago. 2025.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO CEARÁ. Tabela de custos – versões anteriores. SEINFRA CE. Disponível em: <https://www.seinfra.ce.gov.br/tabela-de-custos-2/anteriores>. Acesso em: 17 fev. 2026.

SOUZA, F. A. **Dimensionamento de vigas e lajes protendidas: Teoria e exemplos práticos** – NBR 6118:2023. Curso, Goiânia , INAE, 2024.

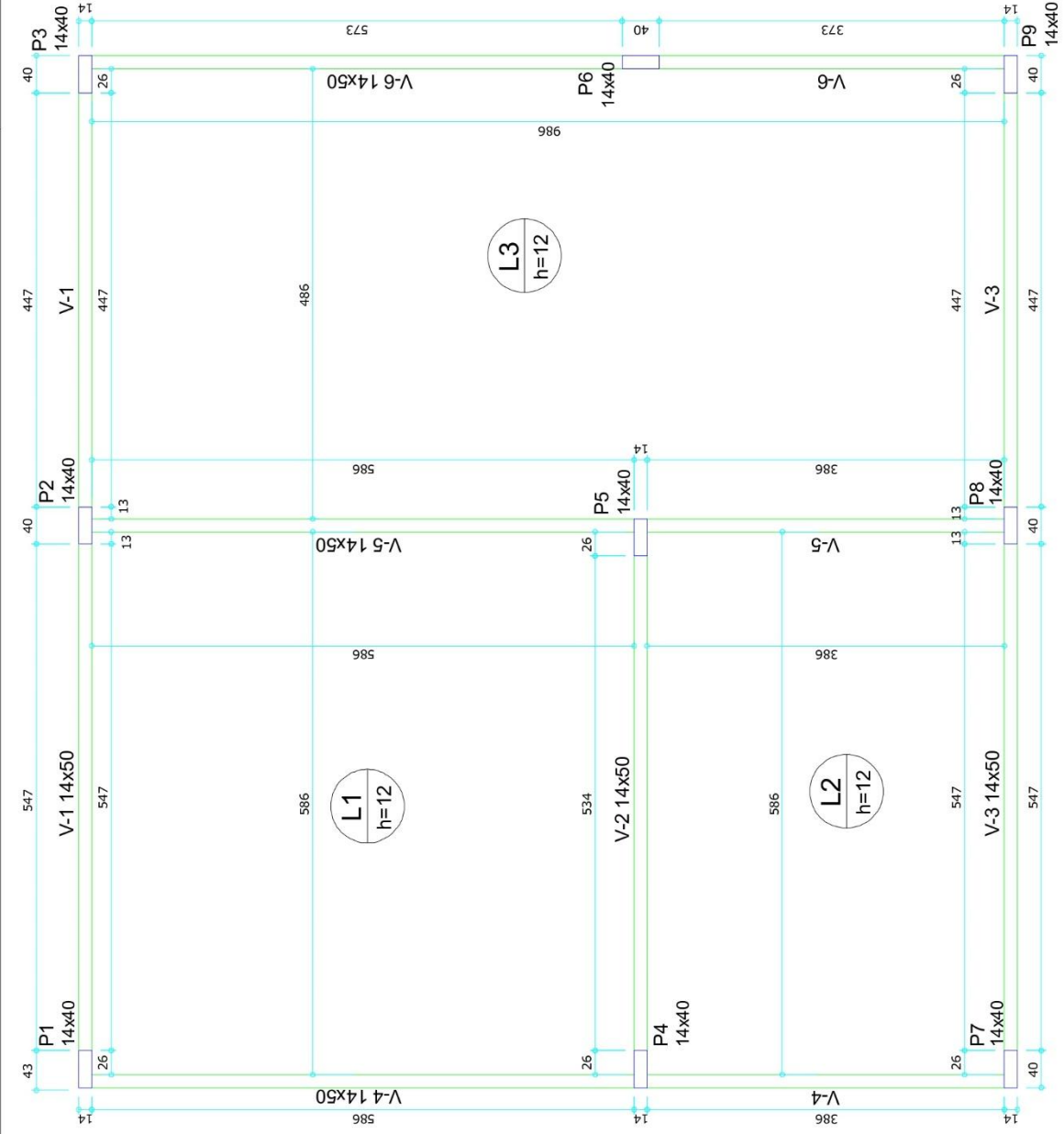
THOMAZ, E. C. S. **Notas de aula**. IME, 2011. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/lobocarneiro/ponte_galeao.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

TOSCANO, C.G. **Otimização de pavimentos de lajes lisas maciças protendidas**. 107 f. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil: Recortes - Realizações - História**. 2. ed. São Paulo: Pini Editora, 1992. 280 p. v. 1. ISBN 8572660089.

VERÍSSIMO, G. S; CÉSAR JR, K. M. L. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos**. 4. ed. Viçosa: UFV, 1998. 78 p.

APÊNDICE A – PRANCHAS EXECUTIVAS DO CASO 1

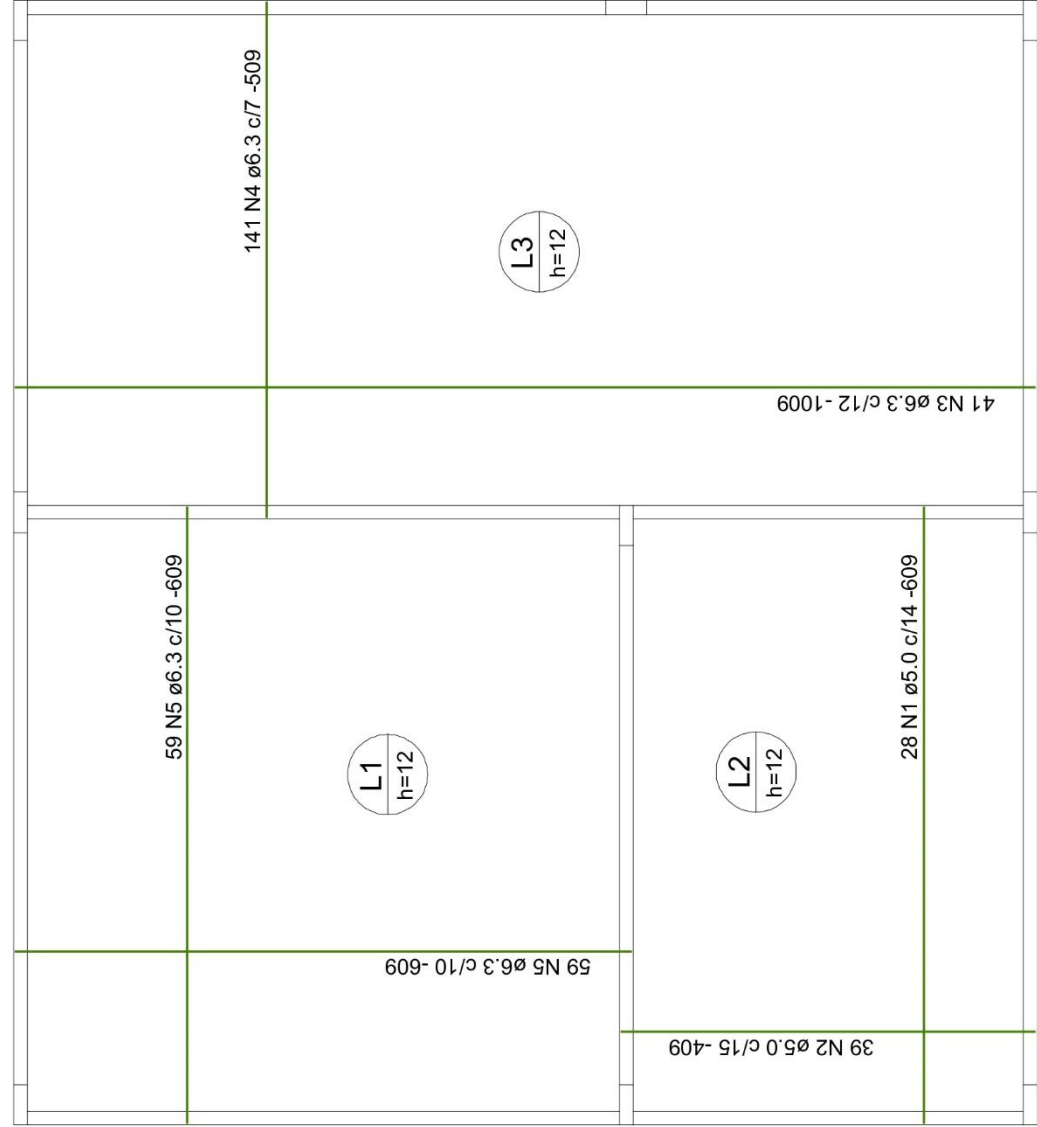


OBSERVAÇÕES

- NÍVEL DO PAVIMENTO: +310
- NORMA REFERÊNCIA: NBR 6118/2023
- CONSIDERADO ADEQUADO CONTROLE DE QUALIDADE E RÍGIDOS LIMITES DE TOLERÂNCIA DE VARIABILIDADE DAS MEDIDAS DURANTE A EXECUÇÃO DA ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO
- APÓS A CONFERÊNCIA DA FORMA E FERRAGEM, ASSIM COMO DA LIMPEZA CRITERIOSA DA FORMA, VERIFICAR SE EXISTE SUJEIRA ACUMULADA NOS PILARES (SERRAGEM, TERRA, PAPÉIS, FOLHAS, CIGARROS, ARAME, PLÁSTICO E ETC.). LIMPAR BEM A FORMA DOS PILARES ANTES DA CONCRETAGEM
- MOLHAR BEM AS FORMAS ANTES DA CONCRETAGEM
- A CURA DO CONCRETO ACONTECE, COM MAIOR INTENSIDADE NOS PRIMEIROS SETE DIAS À PARTIR DO LANÇAMENTO.
- PORTANTO, MANTER A SUPERFÍCIE DO CONCRETO UMIDECIDA E/OU PROTEGÊ-LA COM PELÍCULA IMPERMEÁVEL
- A RETIRADA DAS FORMAS E ESCORAMENTOS DEVERÁ SER REALIZADA 21 DIAS APÓS A CONCRETAGEM
- NÃO SÃO PERMITIDAS ALTERAÇÕES NO PROJETO SEM PRÉVIA CONSULTA E AUTORIZAÇÃO FORMAL DOS AUTORES DO PROJETO

Forma do Pavimento (Nível 310)
Escala 1:75

REVISÕES				ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS:				 INSTITUTO FEDERAL Goiás Câmpus Goiânia		BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL			
Nº	Comentário	Data	Autor	Concreto: C-30									
0	Emissão inicial	28/08/2025		Ecs >= 32206 MPa	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO				GUSTAVO FERNANDES MENEZES				
				Slump: 12 ± 2									
				Aço: CA50 / CA60	GOIÂNIA - GO R. 75, 46 - SETOR CENTRAL PAVIMENTO				ORIENTADOR: Profº Me. CLÁUDIO MARRALVES				
				Fator A/C <= 0,60									
					</								



- OBSERVAÇÕES
- NORMA REFERÊNCIA: NBR 6118/2023
 - COBRIMENTO DA ARMADURA = 2.5cm
 - A FERRAGEM NEGATIVA PASSA DENTRO DOS PILARES
 - USAR ESPAÇADORES E POSICIONADORES ENTRE A FORMA E A FERRAGEM

LEGENDA:

L

LAJE MACIÇA

ARMADURA POSITIVA

Relação do aço

Positivos

AÇO	N	DIAM (mm)	QUANT	C.UNIT (cm)	C.TOTAL (cm)
CA60	1	5.0	28	609	17052
	2	5.0	39	409	15951
CA50	3	6.3	41	1009	41369
	4	6.3	141	509	71769
	5	6.3	118	609	71862

Resumo do aço

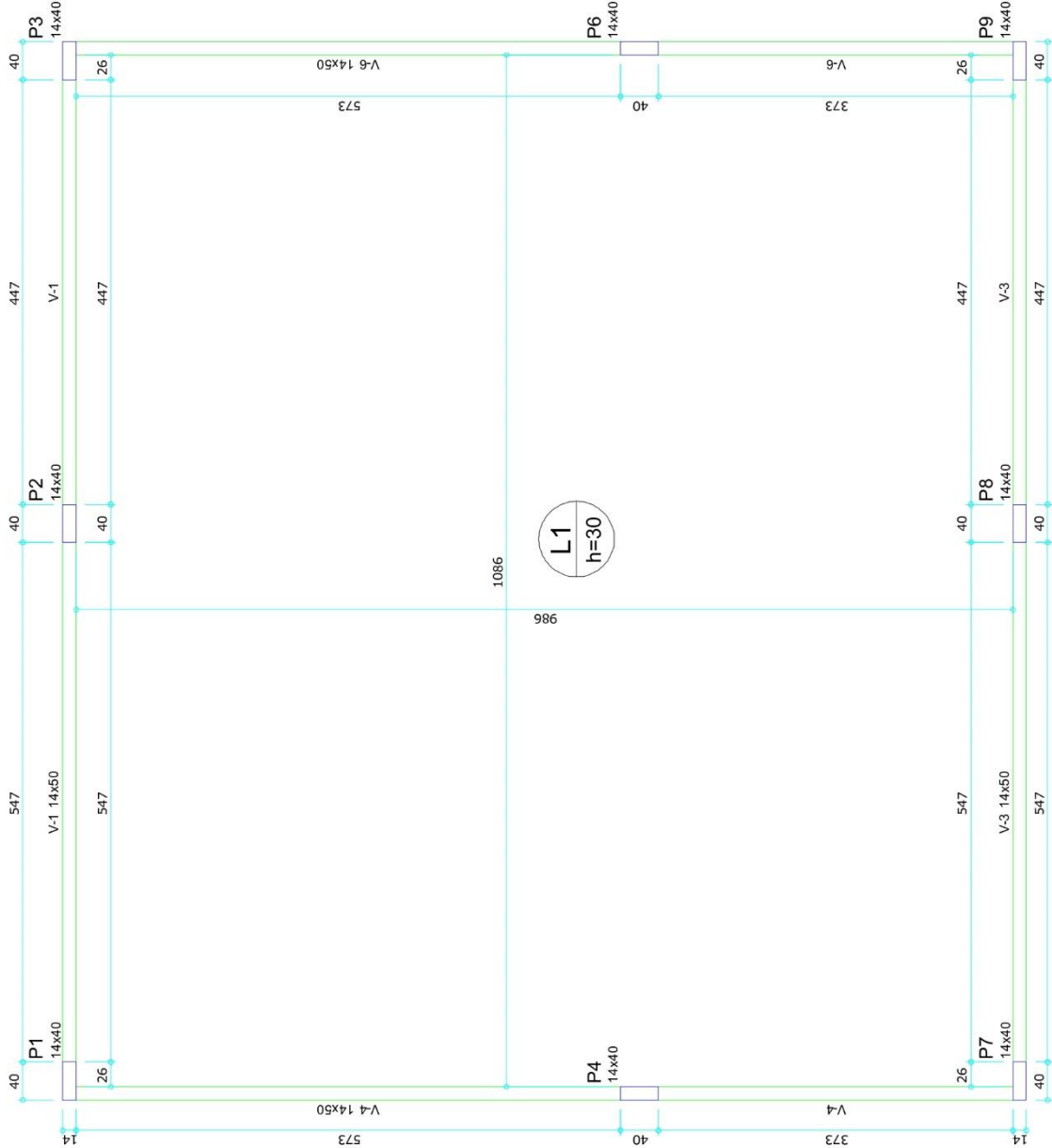
AÇO	DIAM (mm)	C. TOTAL (m)	PESO (kg)
CA50	6.3	1850	452.7
CA60	5.0	330.1	50.9
PESO TOTAL (kg)			
CA50		452.7	
CA60		50.9	

Volume de concreto (C-30) = 12.6 m³
Área de forma = 104.7 m²

Armação positiva das lajes do Pavimento
Escala 1:75

REVISÕES			ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS:				BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
Nº	Comentário	Data	Autor	Concreto: C-30			
0	Emissão inicial	28/08/2025		Ecs >= 32206 MPa		GOIÂNIA - GO R. 75, 46 - SETOR CENTRAL PAVIMENTO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
				Slump: 12 ± 2			
				Aço: CA50 / CA60			GUSTAVO FERNANDES MENEZES
				Fator A/C <= 0,60			ORIENTADOR: Profº Me. CLÁUDIO MARRA ALVES
							Desenho Projeto Responsável Data Folha
							2025-1 CASO 01 Gustavo F. 28/08/2025 02 / 03

APÊNDICE B – PRANCHAS EXECUTIVAS DO CASO 2

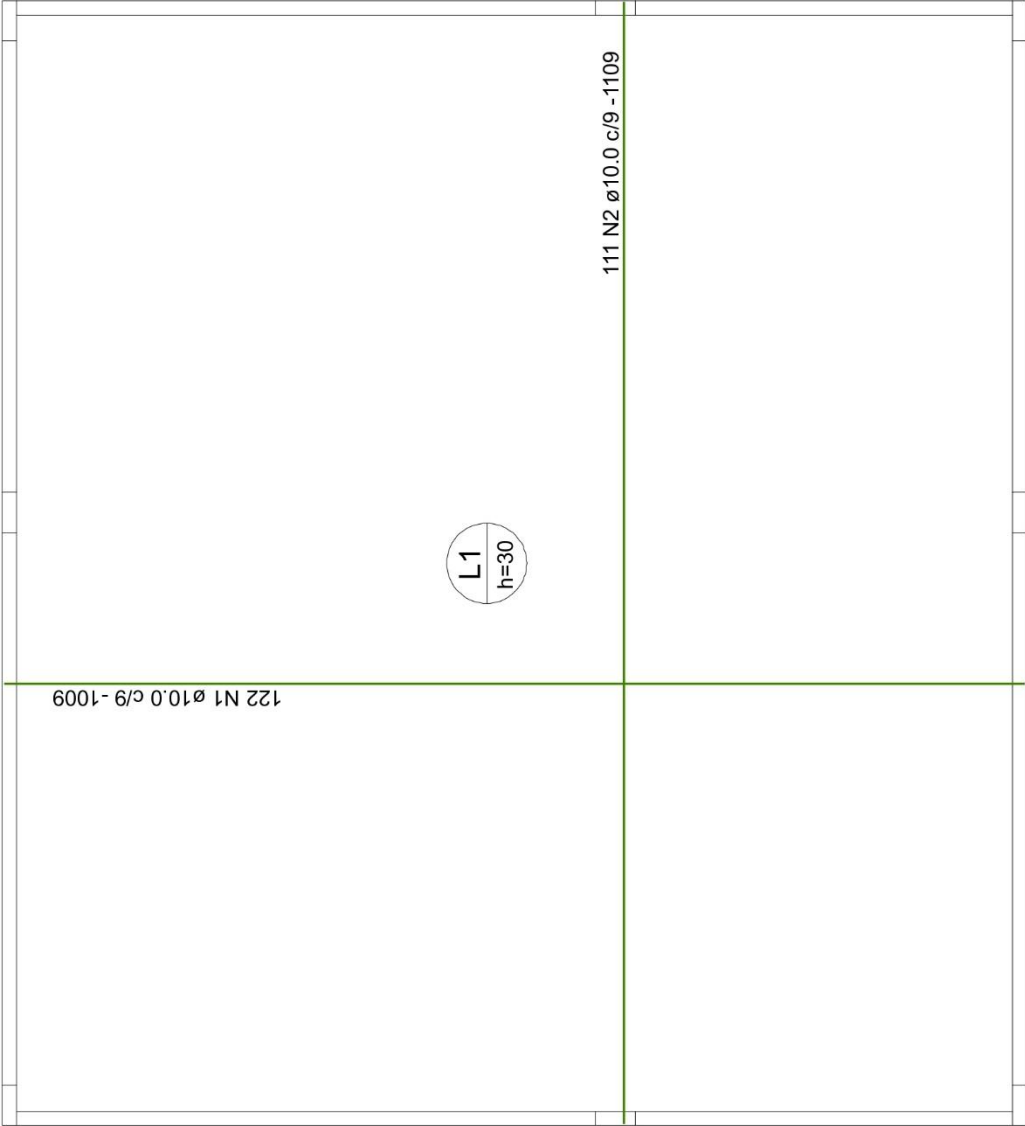


OBSERVAÇÕES

- NÍVEL DO PAVIMENTO: +310
- NORMA REFERÊNCIA: NBR 6118/2023
- CONSIDERADO ADEQUADO CONTROLE DE QUALIDADE E RÍGIDOS LIMITES DE TOLERÂNCIA DE VARIABILIDADE DAS MEDIDAS DURANTE A EXECUÇÃO DA ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO
- APÓS A CONFERÊNCIA DA FORMA E FERRAGEM, ASSIM COMO DA LIMPEZA CRITERIOSA DA FORMA, VERIFICAR SE EXISTE SUJEIRA ACUMULADA NOS PILARES (SERRAGEM, TERRA, PAPÉIS, FOLHAS, CIGARROS, ARAME, PLÁSTICO E ETC.). LIMPAR BEM A FORMA DOS PILARES ANTES DA CONCRETAGEM
- MOLHAR BEM AS FORMAS ANTES DA CONCRETAGEM
- A CURA DO CONCRETO ACONTECE, COM MAIOR INTENSIDADE NOS PRIMEIROS SETE DIAS À PARTIR DO LANÇAMENTO. PORTANTO, MANTER A SUPERFÍCIE DO CONCRETO UMIDECIDA E/OU PROTEGÊ-LA COM PELÍCULA IMPERMEÁVEL
- A RETIRADA DAS FORMAS E ESCORAMENTOS DEVERÁ SER REALIZADA 21 DIAS APÓS A CONCRETAGEM
- NÃO SÃO PERMITIDAS ALTERAÇÕES NO PROJETO SEM PRÉVIA CONSULTA E AUTORIZAÇÃO FORMAL DOS AUTORES DO PROJETO

Forma do Pavimento (Nível 310)
Escala 1:75

REVISÕES				ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS:				 INSTITUTO FEDERAL Goiás Campus Goiânia	BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL				
Nº	Comentário	Data	Autor	Concreto: C-30	Ecs >= 32206 MPa	Slump: 12 ± 2	Aço: CA50 / CA60		Fator A/C <= 0,60	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			
0	Emissão inicial	28/08/2025								GUSTAVO FERNANDES MENEZES			
GOIÂNIA - GO									ORIENTADOR: Profº Me. CLÁUDIO MARRALVES				
R. 75, 46 - SETOR CENTRAL									Desenho	Projeto	Responsável	Data	Folha
PAVIMENTO									2025-1	CASO 02	Gustavo F.	28/08/2025	01 / 03



- NORMA REFERÊNCIA: NBR 6118/2023
- COBRIMENTO DA ARMADURA = 2.5cm
- A FERRAGEM NEGATIVA PASSA DENTRO DOS PILARES
- USAR ESPAÇADORES E POSICIONADORES ENTRE A FORMA E A FERRAGEM

LEGENDA:



LAJE MACIÇA

ARMADURA POSITIVA

Relação do aço

Positivo

AÇO	N	DIAM (mm)	QUANT	C.UNIT (cm)	C.TOTAL (cm)
CA50	1	10.0	122	1009	123098
	2	10.0	111	1109	123099

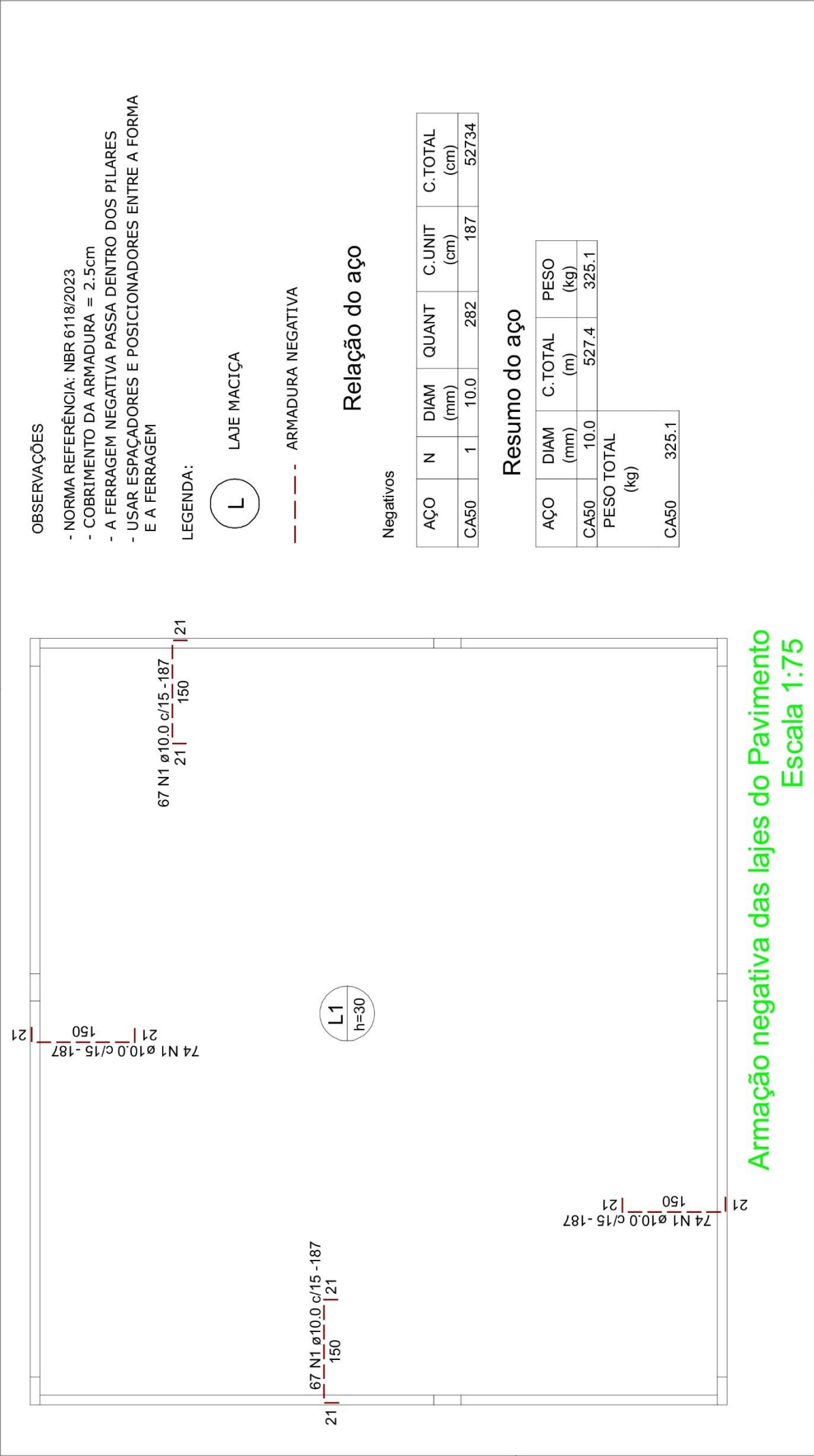
Resumo do aço

AÇO	DIAM (mm)	C.TOTAL (m)	PESO (kg)
CA50	10.0	2462	1517.9
PESO TOTAL (kg)			
CA50		1517.9	

Volume de concreto (C-30) = 27.8 m³
Área de forma = 107 m²

Armação positiva das lajes do Pavimento
Escala 1:75

REVISÕES				ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS:		 INSTITUTO FEDERAL Goiás Câmpus Goiânia	BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL				
Nº	Comentário	Data	Autor	Concreto: C-30							
0	Emissão inicial	28/08/2025		Ecs >= 32206 MPa			TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO				
				Slump: 12 ± 2							
				Aço: CA50 / CA60			GUSTAVO FERNANDES MENEZES				
				Fator A/C <= 0,60							
							ORIENTADOR: Profº Me. CLÁUDIO MARRAALVES				
							Desenho	Projeto	Responsável	Data	Folha
							2025-1	CASO 02	Gustavo F.	28/08/2025	02 / 03



Armação negativa das lajes do Pavimento
Escala 1:75

OBSERVAÇÕES

- NORMA REFERÊNCIA: NBR 6118/2023
- COBRIMENTO DA ARMADURA = 2.5cm
- A FERRAGEM NEGATIVA PASSA DENTRO DOS PILARES
- USAR ESPAÇADORES E POSICIONADORES ENTRE A FORMA E A FERRAGEM

LEGENDA:

 LAJE MACIÇA

 ARMADURA NEGATIVA

Relação do aço

Negativos

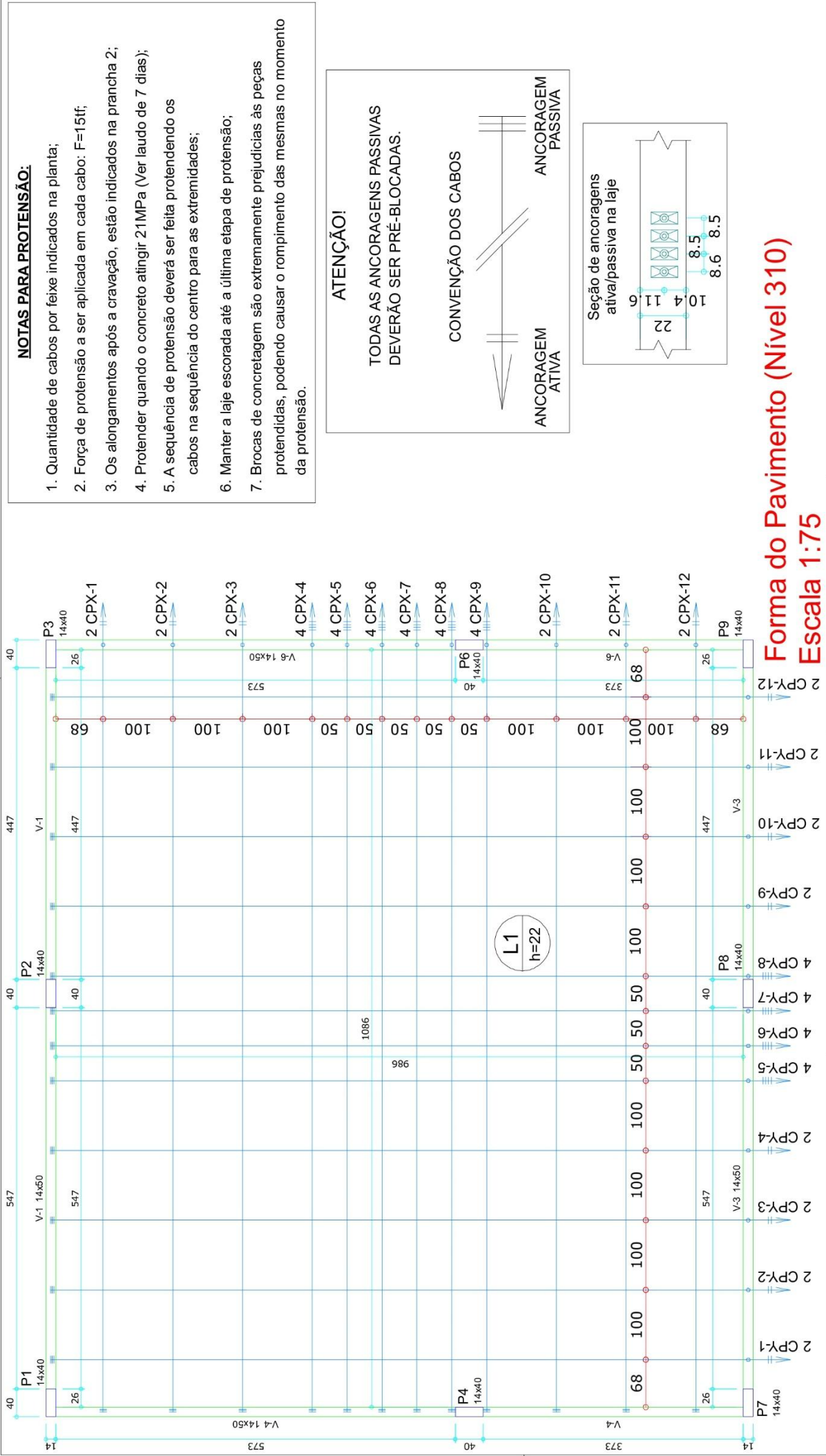
AÇO	N	DIAM (mm)	QUANT	C.UNIT (cm)	C.TOTAL (cm)
CA50	1	10.0	282	187	52734

Resumo do aço

AÇO	DIAM (mm)	C.TOTAL (m)	PESO (kg)
CA50	10.0	527.4	325.1
PESO TOTAL (kg)			
CA50	325.1		

REVISÕES			ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS:				BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
Nº	Comentário	Data	Autor	Concreto: C-30			
0	Emissão inicial	28/08/2025		Ecs >= 32206 MPa		GOIÂNIA - GO R. 75, 46 - SETOR CENTRAL PAVIMENTO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
				Slump: 12 ± 2			
				Aço: CA50 / CA60			GUSTAVO FERNANDES MENEZES
				Fator A/C <= 0,60			ORIENTADOR: Profº Me. CLÁUDIO MARRA ALVES
							Desenho 2025-1 Projeto CASO 02 Responsável Gustavo F. Data 28/08/2025 Folha 03 / 03

APÊNDICE C – PRANCHAS EXECUTIVAS DO CASO 3



NOTAS PARA PROTEÇÃO:

- 1. Quantidade de cabos por feixe indicados na planta;
- 2. Força de protensão a ser aplicada em cada cabo: F=15tf;
- 3. Os alongamentos após a cravação, estão indicados na prancha 2;
- 4. Protender quando o concreto atingir 21MPa (Ver laudo de 7 dias);
- 5. A sequência de protensão deverá ser feita protendendo os cabos na sequência do centro para as extremidades;
- 6. Manter a laje escorada até a última etapa de protensão;
- 7. Brocas de concretagem são extremamente prejudiciais às peças protendidas, podendo causar o rompimento das mesmas no momento da protensão.

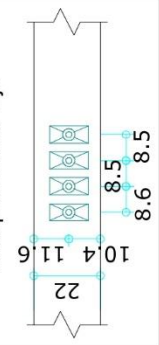
ATENÇÃO!

TODAS AS ANCORAGENS PASSIVAS DEVERÃO SER PRÉ-BLOCADAS.

CONVENÇÃO DOS CABOS



Seção de ancoragens ativa/passiva na laje



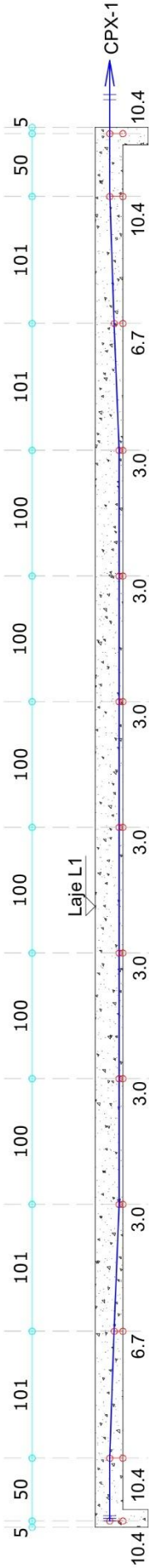
Forma do Pavimento (Nível 310)
Escala 1:75

REVISÕES		ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS:		BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL	
Nº	Comentário	Data	Autor	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	
0	Emissão inicial	01/12/2025		GUSTAVO FERNANDES MENEZES	
				ORIENTADOR: Profº Me. CLÁUDIO MARRAALVES	
				Desenho	Folha
				2025-1	1 / 5
				Projeto	Data
				Caso 03	01/12/2025
				Responsável	
				Gustavo F.	

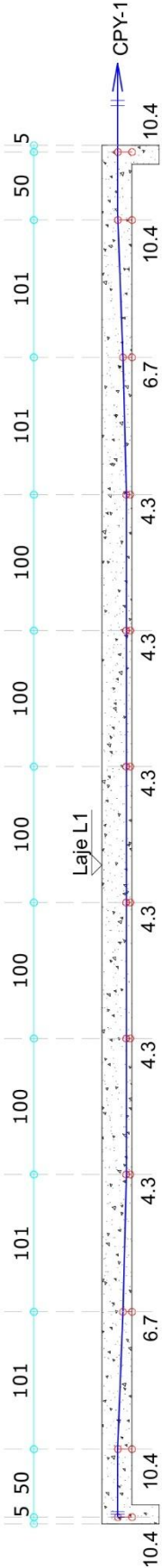


GOIÂNIA - GO
R. 75, 46 - SETOR CENTRAL
PAVIMENTO

CPX-1 ao CPX-12
ESC 1:50

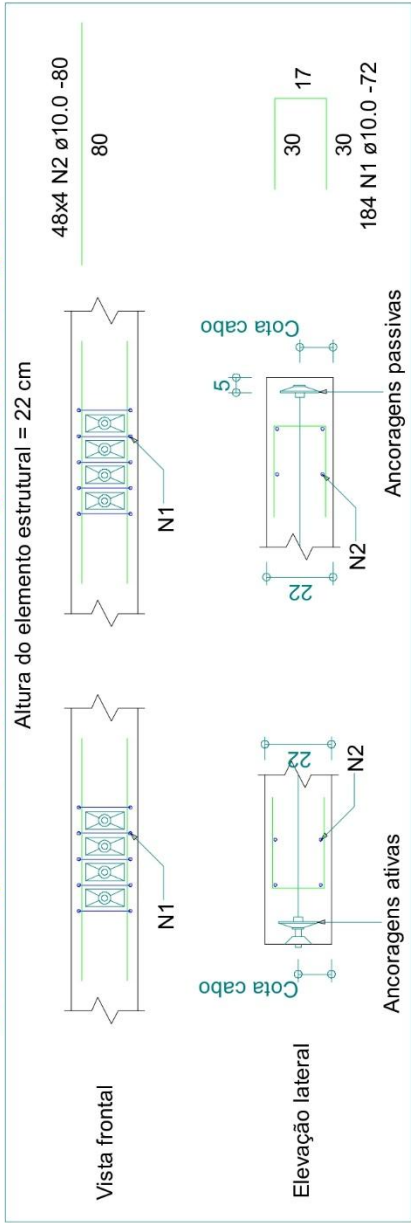


CPY-1 ao CPY-12
ESC 1:50

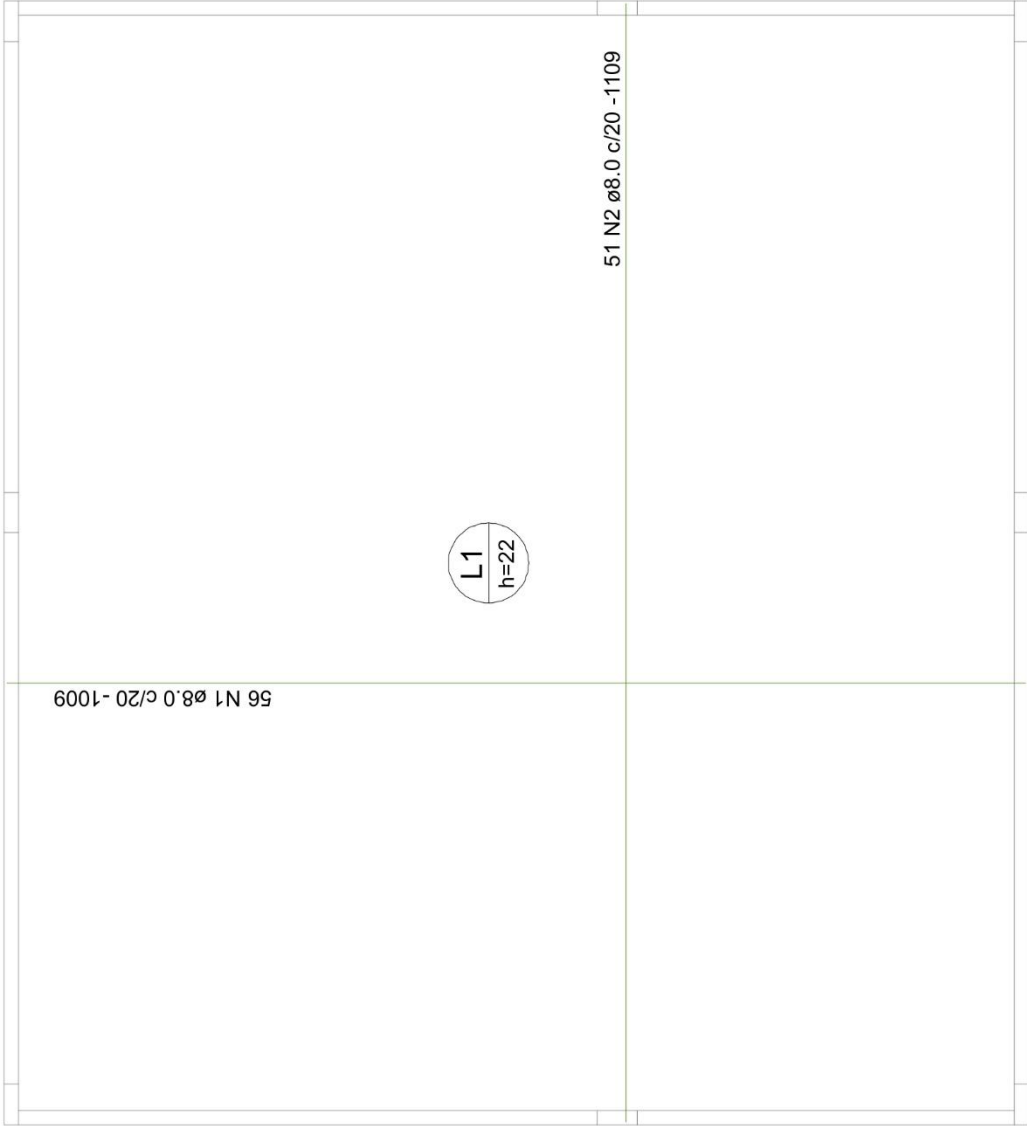


Perfil vertical dos cabos do pavimento Pav 01
Escala 1:75

Detalhe típico da armadura de fretagem nas ancoragens



REVISÕES		ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS:		INSTITUTO FEDERAL Goiás Campus Goiânia		BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL	
Nº	Comentário	Data	Autor				
0	Emissão inicial	01/12/2025				TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	
						GUSTAVO FERNANDES MENEZES	
						ORIENTADOR: Profº Me. CLÁUDIO MARRAALVES	
						Desenho	Projeto
						2025-1	Caso 03
						Responsável	Data
						Gustavo F.	01/12/2025
						Folha	2 / 5



- NORMA REFERÊNCIA: NBR 6118/2023
- COBRIMENTO DA ARMADURA = 2.5cm
- A FERRAGEM NEGATIVA PASSA DENTRO DOS PILARES
- USAR ESPAÇADORES E POSICIONADORES ENTRE A FORMA E A FERRAGEM

LEGENDA:



LAJE MACIÇA

ARMADURA POSITIVA

Relação do aço

Positivo

AÇO	N	DIAM (mm)	QUANT	C.UNIT (cm)	C.TOTAL (cm)
CA50	1	8.0	56	1009	56504
	2	8.0	51	1109	56559

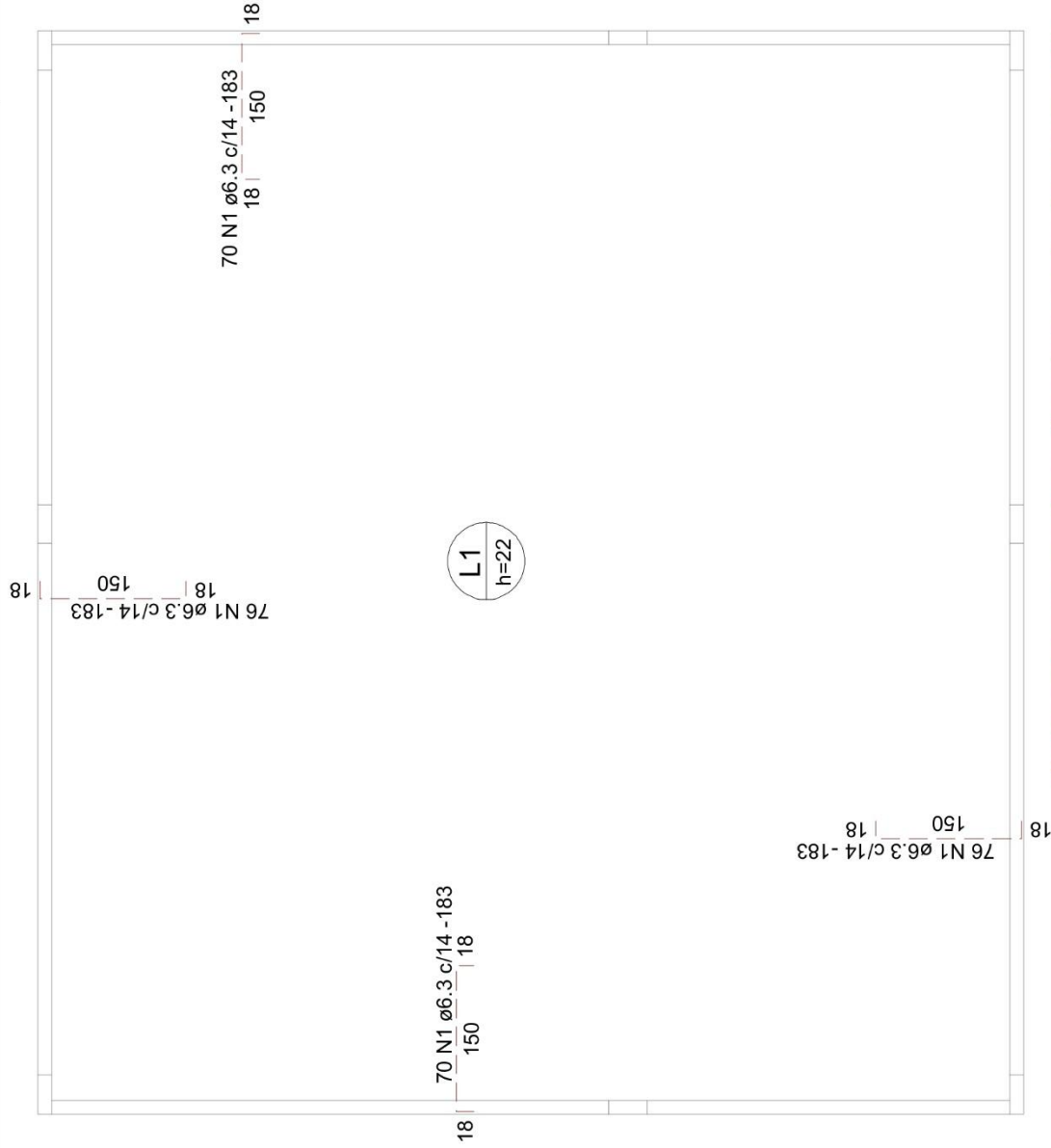
Resumo do aço

AÇO	DIAM (mm)	C.TOTAL (m)	PESO (kg)
CA50	8.0	1130.7	446.1
PESO TOTAL (kg)			
CA50	446.1		

Volume de concreto (C-30) = 23.53 m³
Área de forma = 107 m²

Armação positiva das lajes do Pavimento
Escala 1:75

REVISÕES		ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS:		BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL	
Nº	Comentário	Data	Autor	Concreto: C-30	
0	Emissão inicial	01/12/2025		Ecs >= 32206 MPa	
				Slump: 12 ± 2	
				Aço: CA50 / CA60	
				Fator A/C <= 0,60	
GOIÂNIA - GO R. 75, 46 - SETOR CENTRAL PAVIMENTO				GUSTAVO FERNANDES MENEZES	
				TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	
				ORIENTADOR: Profº Me. CLÁUDIO MARRAALVES	
		Desenho	Projeto	Responsável	Folha
		2025-1	Caso 03	Gustavo F.	01/12/2025 4 / 5



Armação negativa das lajes do Pavimento
Escala 1:75

[illegible]