



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ROTINA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE LAJES
ALVEOLARES PROTENDIDAS**

Fernando Araújo Neto

Uberlândia, 2024.

Fernando Araújo Neto

**ROTINA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE LAJES
ALVEOLARES PROTENDIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia Civil (FECIV), da
Universidade Federal de
Uberlândia como requisito exigido
para a conclusão do curso de
Engenharia Civil. Orientador

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo
Gustavo Delalibera

Uberlândia, 2024.

Resumo: Este estudo analisa o uso de pré-fabricados na indústria da construção civil, focando especificamente em lajes alveolares protendidas. A partir de análises das demandas quanto ao uso do concreto nas sociedades moderna, as quais clamam por eficiência e economia, os pré-fabricados apresentam vantagens significativas, como a minimização de desperdícios e a otimização do espaço de construção. As lajes alveolares protendidas oferecem benefícios como a capacidade de suportar grandes cargas e a viabilidade de uso em vãos extensos, em detrimento de outras soluções estruturais. A abordagem do trabalho quanto à essas demandas é ampliar o conhecimento desse mercado, de modo a reafirmar o concreto protendido como uma opção viável e atraente no processo de concepção estrutural. Acredita-se que isso pode ser feito pelo desenvolvimento de uma rotina computacional para o dimensionamento de lajes alveolares protendidas, de acordo com as normas técnicas brasileiras, que oferece de maneira prática, tanto um referencial teórico do assunto, quanto uma rápida análise de resultados.

Palavra-Chave: Lajes Alveolares, Rotina de Cálculo, Concreto Protendido.

Abstract: This study examines the use of precast concrete in the construction industry, focusing specifically on hollow-core slabs. Based on the demands for concrete use in modern societies, which call for efficiency and economy, precast concrete offers significant advantages, such as waste minimization and construction space optimization. Hollow-core slabs offer benefits such as the ability to support large loads and the feasibility of use in extensive spans, in detriment to other structural solutions. The approach of this work towards these demands is to expand the knowledge of this market, in order to reaffirm prestressed concrete as a viable and attractive option in the structural design process. It is believed that this can be achieved by developing a computational routine for the design of hollow-core slabs, according to Brazilian technical standards, which offers in a practical way, both as a theoretical reference on the subject, as well as a quick analysis of results.

Keywords: Hollow-core slabs, Application, Pre-stressed Concrete.

Lista de Figuras

Figura 1.Exemplo de uso de Pré-Fabricados de Concreto	9
Figura 2. Produção Anual de Painéis alveolares	
Figura 3. Içamento de laje alveolar protendida pré-moldada.....	11
Figura 4. Viga de Elementos pré-moldado de concreto	14
Figura 5. Exemplo de Laje Alveolar Sugerido pela NBR 14861:2022.....	18
Figura 6. Esquema de uma pista de Protensão típica	19
Figura 7.Produção de Lajes Alveolares em Pistas de Protensão.....	20
Figura 8. Diagrama tensão vs. deformação para os aços de armadura ativas.....	23
Figura 9.Diagrama tensão vs. deformação para os aços de armadura passivas.....	24
Figura 10.Catálogo ArcelorMittal:Fios para Concreto Protendido	25
Figura 11.Seção prevista para a lajes alveolar	26
Figura 12. Combinação Quase Permanente.....	28
Figura 13.Coefficiente β_a	32
Figura 14. Gráfico de Tensões.....	34
Figura 15.Esquemas relativos às hipóteses básicas de cálculo	35
Figura 16. Estádios de deformações	37
Figura 17.Macaco hidráulico de Protensão para Mono Cabo de aço diâmetros de 3/8" a 5/8"	41
Figura 18. Pré-dimensionamento de Lajes Cassol	43
Figura 19. Pré-dimensionamento de Lajes Cassol	44

Lista de Tabelas

Tabela 1. Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118:2023	22
Tabela 2. Fases de Protensão.....	31
Tabela 3. Combinações de Serviço.....	40

SUMÁRIO

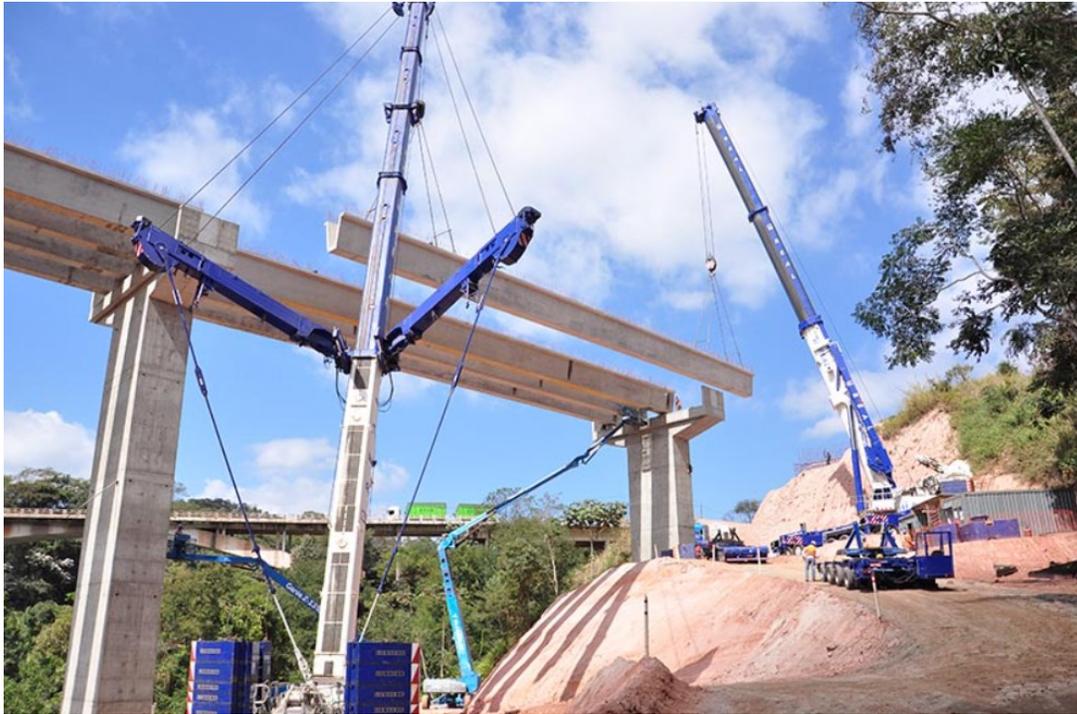
1.	INTRODUÇÃO	
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Concreto Pré-Moldado	13
2.2	Concreto Protendido.....	14
2.2.1	Tipos de Protensão	16
2.3	Lajes Alveolares.....	17
2.4	Parametros de Projeto.....	20
3	TIPO DE PROTENSÃO UTILIZADA NO PROGRAMA	21
4	ITENS DO DIMENSIONAMENTO	22
4.1.1	Materiais para Concreto Protendido.....	23
4.1.2	Dados Geométricos da Seção	25
4.1.3	Esforços Solicitantes e Combinação de Ações.....	27
4.1.4	Estimativas das Forças de Protensão P_{∞}	28
4.1.5	Estimativa da Área da Armadura de Protensão	30
4.1.6	Verificação de Tensões Normais no Concreto nas Fases de Protensão	31
4.1.7	Estado Limite Último – Verificação das Solicitações Normais	33
4.1.8	Estado Limite Último -Verificação da Força Cortante.....	39
4.1.9	Estado Limite de Serviço – Verificação de Flecha	39
4.1.10	Alongamento de Protensão e Preassão Manométrica.....	41
5	DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO	42
6	VALIDAÇÃO TEÓRICA DA APLICAÇÃO	42
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
	Anexo A-Página Resumo do Programa	48
	Anexo B- Memorial	50

1. INTRODUÇÃO

A indústria de pré-fabricados tem seu surgimento intrinsecamente relacionados a solucionar às demandas da sociedade contemporânea, baseando-se em produtos que promovem economia, eficiência, desempenho técnico, segurança e condições favoráveis de trabalho no canteiro de obras. Desse modo, a utilização de estruturas pré-fabricadas permite obter eficiência estrutural significativa, com o uso de peças mais esbeltas, além de reduzir o desperdício de recursos através do uso otimizado dos materiais.

Dessa forma, o uso desse sistema possibilita a construção de edifícios com vãos livres superiores aos convencionais, um melhor isolamento acústico, maior leveza estrutural, maior aproveitamento do espaço da edificação e até mesmo facilidades para instalação de sistemas elétricos, hidráulicos e lógicos. Outrossim, o emprego de peças pré-fabricadas de concreto na construção civil representa um avanço em termos construtivos, visto que permite a racionalização e o aperfeiçoamento técnico das obras, de modo a tornar o processo mais comparável aos modelos de produções idealizados no século XX. No qual, os elementos pré-fabricados apresentam uma extensa gama de utilização nos diversos setores da construção civil, contemplando desde edificações industriais, comerciais e residenciais, até mesmo nos setores de construção pesada e infraestrutura urbana, rodoviária e ferroviária.

Figura 1. Exemplo de uso de Pré-Fabricados de Concreto



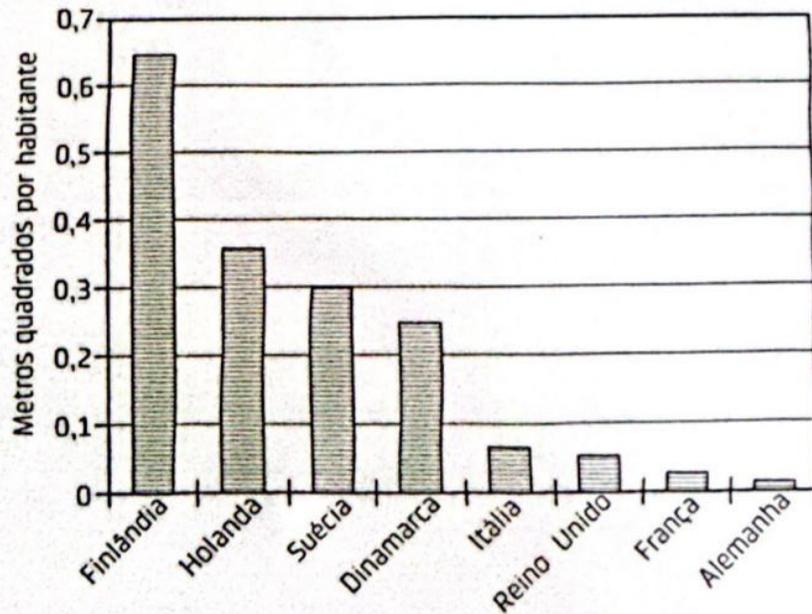
Fonte: Precon Pré-Fabricados

(Disponível em: <https://preconprefabricados.com.br/comercial/ponte-pre-fabricada-de-concreto/>)

Os elementos para pisos estão entre os produtos pré-moldados mais antigos. As primeiras lajes alveolares surgiram na década de 1950, com o avanço das técnicas de protensão em longas pistas. Durante mais de 30 anos, os tipos de unidades produzidas pouco mudaram. Nos Estados Unidos, as peças típicas tinham uma espessura de 300 mm. Na década de 1980, houve um aumento das pesquisas realizadas na Europa relacionadas às unidades de laje alveolar, resultando em um avanço tecnológico que permitiu a produção econômica de unidades com espessuras maiores que 300 mm. A produção desses tipos de lajes também se expandiu nos Estados Unidos.

As lajes alveolares são consideradas um dos tipos mais avançados de unidades pré-moldadas. milhões de metros quadrados de lajes são fabricados todos os anos ao redor do mundo, com uso predominante na América do Norte e na Europa Ocidental. A tecnologia de fabricação dessas lajes é bem desenvolvida em países como Alemanha e Estados Unidos.

Figura 2. Produção Anual de Painéis alveolares



Fonte: El Debs(2022)

As lajes alveolares são estruturas inovadoras que podem ser utilizadas em diversos sistemas construtivos, como lajes de piso ou painéis de fechamento. Sua aplicação é mais comum em edifícios, pois sua facilidade de manuseio, transporte e armazenagem, além da possibilidade de serem utilizadas em grandes vãos, reduz a espessura média da estrutura, resultando em economia nas fundações. Além disso, as lajes alveolares possuem uma capacidade de carga muito superior às lajes convencionais de concreto armado com a mesma espessura.

Tratando-se especificamente das lajes alveolares, de acordo com o FIP (1992), esses elementos podem suportar cargas superiores a 30 kN/m² e são frequentemente utilizadas para vencer vãos entre 4 m e 20 m. Sua espessura varia de 100 mm a mais de 400 mm, sendo a largura padrão de 1,2 m, o qual é limitada pelo tamanho do tabuleiro, todavia, também podem ser utilizadas larguras maiores ou menores dependendo da unicidade do empreendimento em questão. Tais atribuições, favoreceram esse tipo de laje tem sido amplamente adotado no mercado da construção civil devido à sua fácil instalação e capacidade de atender a grandes vãos, o que contribui para um layout mais flexível e uma estrutura otimizada, seja ela moldada no local, metálica ou composta por elementos reticulados pré-fabricados.

Figura 3. Içamento de laje alveolar protendida pré-moldada



Fonte: Protensul, <http://www.protensul.com.br>

As lajes alveolares protendidas apresentam diversas vantagens, entre as quais podemos citar: desde uma ampla gama de aplicações, baixos custos de produção, processo de fabricação altamente mecanizado e automatizado, eliminação da necessidade de forros falsos, capacidade de suportar grandes cargas devido ao baixo peso próprio resultante do uso de concreto de alta resistência e alta taxa de protensão, além de proporcionar o isolamento acústico adequado.

Todavia, apesar das inúmeras vantagens oferecidas pela opção ao uso de lajes alveolares protendidas em detrimento às lajes maciças convencionais e lajes nervuradas, deve-se ao fato da pouca abrangência das ferramentas computacionais quanto ao dimensionamento desses elementos estruturais, sendo um resultado direto da falta de uma literatura técnica já consolidada, exemplos práticos e automatizados de dimensionamento para fins educacionais e a pouca abordagem do assunto em cursos de graduação. Diante desse contexto, a elaboração de uma rotina computacional para o cálculo de lajes alveolares protendidas se mostra como uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento e aprimoramento do setor da construção civil. Essa rotina computacional permitirá dimensionar de forma precisa e

eficiente essas estruturas, levando em consideração as normas técnicas vigentes e proporcionando uma solução otimizada em relação ao desempenho estrutural.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral proporcionar uma expansão dos horizontes para engenheiros civis, estudantes e pesquisadores na área da engenharia civil. Portanto, pretende-se abordar e aprofundar a utilização do concreto protendido na execução de lajes, uma técnica que pode ser vista como inovadora e eficiente no campo da construção civil.

Para além de uma simples exposição do tema, este estudo visa facilitar a etapa de dimensionamento dos elementos estruturais, um passo fundamental e muitas vezes complexo no processo de engenharia. Ao fornecer diretrizes claras e eficientes, procura-se tornar o dimensionamento menos árduo e mais preciso, contribuindo para uma construção mais eficiente e segura. Ainda nesse estudo visamos, através da leitura e compreensão deste trabalho, o concreto protendido seja considerado como uma opção viável e atraente no processo de concepção estrutural. Espera-se assim contribuir para a inovação e melhoria contínua na área da engenharia civil, capacitando profissionais e estudantes a explorar novas possibilidades e aprimorar seus projetos e construções.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

A especificidade desse trabalho é explorar a metodologia de dimensionamento de lajes alveolares protendidas conforme a normalização nacional – conforme a norma brasileira ABNT NBR 14681:2022 e a ABNT NBR 6118:2023. Pretende-se desenvolver uma aplicação de fácil uso que seja capaz de executar o dimensionamento de lajes alveolares a partir da entrada de dados do usuário; espera-se com isso contribuir para o desenvolvimento da construção de estruturas pré-moldadas. A principal justificativa desta pesquisa é a elaboração de uma ferramenta computacional que norteie o dimensionamento de lajes alveolares protendidas, de modo a contribuir com cenário da construção de pré-fabricados no interior do território brasileiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto Pré-Moldado

A indústria da construção civil é percebida como atrasada em comparação com outros setores industriais. Esta visão é baseada em sua baixa produtividade, alto desperdício de materiais, lentidão e controles de qualidade insuficientes.

Uma das maneiras de reduzir esse atraso é através do uso de técnicas associadas ao emprego de elementos pré-moldados e pré-fabricados de concreto. Estas técnicas são diferenciadas quanto a seu local de produção, enquanto o pré-moldado se refere a uma peça produzida fora de seu local de uso, a especificidade do pré-fabricado é que estes elementos são produzidos em ambientes fabris especializados nesse sistema, assegurando maior controle de qualidade das peças produzidas. O concreto pré-moldado e pré-fabricado traz benefícios significativos para a construção, tais como: redução do tempo de construção, melhor controle dos componentes pré-moldados e diminuição do desperdício de materiais. Em geral, sua utilização aumenta com o grau de desenvolvimento tecnológico e social do país, pois resulta em condições favoráveis, como valorização da mão de obra e maior oferta de equipamentos.

Este fato é evidente ao comparar o custo da mão de obra em regiões mais e menos desenvolvidas. Por exemplo, na Europa, o custo da mão de obra pode ser até cinco vezes maior que no Brasil.

Além disso, com o concreto pré-fabricado, as condições de trabalho na construção civil melhoram, um aspecto particularmente relevante em países mais socialmente desenvolvidos. Esta melhoria está associada à chamada síndrome dos três Ds: dirty (sujo), difficult (difícil) e dangerous (perigoso).

Outrossim, o desenvolvimento tecnológico e social aumenta as exigências da sociedade em relação à qualidade dos produtos e à sustentabilidade. As melhores condições para a fabricação de elementos pré-moldados resultam em produtos de melhor qualidade. O uso do concreto pré-moldado também permite atender melhor aos aspectos de sustentabilidade, como a minimização do desperdício de materiais, a redução do consumo de materiais através

do uso de seções resistentes mais eficientes e a possibilidade de reutilização de partes da construção.

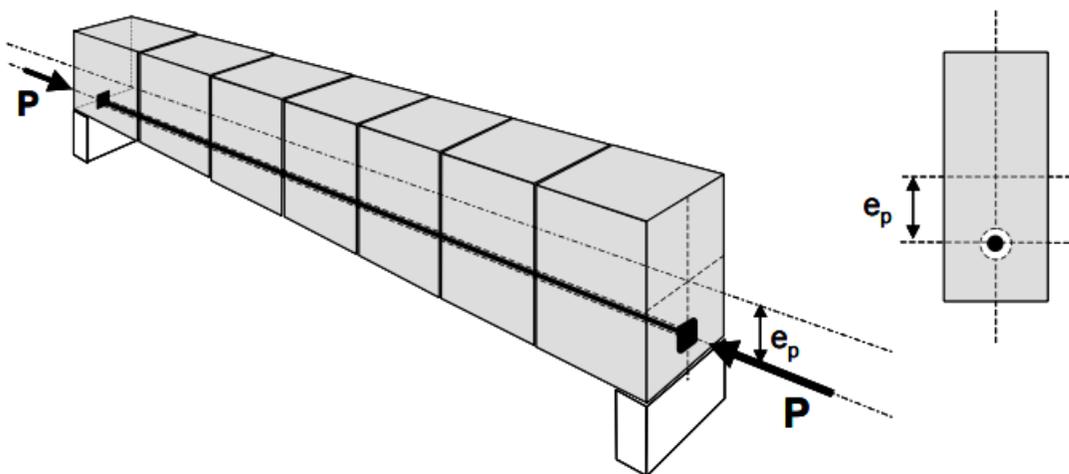
Portanto, é esperado que o uso do concreto pré-moldado no Brasil e em outros países aumente progressivamente com o avanço do desenvolvimento tecnológico e social.

2.2 Concreto Protendido

A concepção de protensão no concreto surge a partir da constatação de que a resistência deste material à tração é significativamente menor do que a sua resistência à compressão. Assim, ao aplicar forças normais de compressão e de tração em uma barra prismática de concreto simples, é possível determinar as forças máximas de compressão e de tração que o concreto é capaz de resistir. Observa-se que a força resistente de tração é aproximadamente 1/10 da força de compressão.

A protensão é uma operação que envolve o estiramento da armadura contra a peça de concreto em si, com o objetivo de comprimir a área que será submetida à tração pela carga. Dessa forma, é possível aumentar a resistência da peça e garantir uma maior durabilidade e segurança na sua utilização.

Figura 4. Viga de Elementos pré-moldado de concreto



Fonte: Fundamentos do Concreto Protendido

A armadura de protensão, também conhecida como armadura ativa, deve possuir uma resistência elevada, em torno de 2 a 4 vezes a resistência da armadura comum, também chamada de armadura passiva ou frouxa. Isso se deve principalmente às perdas de protensão que ocorrem ao longo do tempo, causadas por fatores como a fluência e a retração do concreto e a fluência do aço de protensão. Estes fenômenos podem comprometer a integridade da estrutura e reduzir a sua vida útil, sendo, portanto, um aspecto crucial a ser considerado no projeto e na execução de estruturas de concreto protendido.

Para elucidar melhor as características desse sistema estrutural, será estruturado um pouco sobre as vantagens e desvantagens da utilização da protensão em peças de concreto armado. Assim, a começar pelas vantagens, é válido citar:

Maior esbeltez ou vãos maiores para mesma altura, devido à participação da zona pré-comprimida na rigidez à flexão.

- a. Limitação ou eliminação de fissuras; estanqueidade das estruturas de reservatórios e menor porosidade a gases.
- b. Redução ou eliminação da corrosão da armadura.
- c. Maior resistência à fadiga do aço devido à pouca fissuração do concreto, mesmo para grandes oscilações da carga.
- d. Melhor disposição da armadura na seção transversal; aço de alta resistência requer menor área de armadura.
- e. Estruturas mais leves, custo menor de pilares e fundações, desforma mais rápida.
- f. Possibilidade de eliminar quase completamente a variação da curvatura devido à fluência do concreto sob cargas permanentes.
- g. A protensão aumenta a resistência a tensões tangenciais, reduzindo esforços na seção de concreto e o alongamento principal.

Todavia, mediante aos ganhos obtidos com a utilização desse sistema estrutural, deve-se ter em mente que ele traz consigo algumas características contraproducentes, dentre elas:

- h. Riscos de vibração por cargas móveis são elevados em estruturas esbeltas como pontes e lajes de garagens;
- i. O projeto estrutural requer entendimento claro da ação da protensão, enfatizando Estados Limites de Utilização;
- j. A protensão requer mão-de-obra especializada e domínio das técnicas.

2.2.1 Tipos de Protensão

Apesar de o processo de protender as estruturas de concreto se basear nos mesmos princípios, existem diferentes tipos de protensão, os quais se diferenciam pela maneira, na qual é obtida essa força, bem como pela existência ou não da aderência.

A protensão com aderência inicial, ou aderência direta, Este processo, também conhecido como protensão com aderência direta, ocorre durante a fabricação de peças pré-moldadas em pistas de protensão. A armadura é esticada antes da concretagem, sendo ancorada em apoios independentes da peça, os contrafortes. Após o concreto endurecer, a ligação da armadura com os contrafortes é desfeita. A força de protensão é então transmitida à peça exclusivamente pela aderência entre a armadura e o concreto, uma vez que o encurtamento da armadura é impedido. Neste cenário, a aderência manifesta-se apenas nas extremidades da peça, em um comprimento de transferência da força de protensão, que varia aproximadamente entre 50 ϕ e 100 ϕ para cordoalhas e entre 100 ϕ e 150 ϕ para fios.

No caso da protensão com aderência posterior, o procedimento de protensão é realizado após o concreto ter endurecido. Para isso, bainhas metálicas corrugadas são colocadas nas peças que serão concretadas e, dentro delas, os cabos para protensão são inseridos, seja antes ou depois da concretagem. A protensão é executada com o auxílio de macacos hidráulicos, que esticam a armadura até o alongamento e a força planejados, apoiando-se diretamente na peça de concreto. Ao final da protensão, o cabo é ancorado nos dispositivos de ancoragem e, em seguida, a bainha é preenchida com nata de cimento. Isso serve para remover o ar de dentro da bainha e garantir a aderência entre o cabo e a bainha, que por sua vez, já está aderente ao concreto ao redor.

Neste contexto, a diferença de deformação entre os dois materiais que compõem o pré-alongamento, em contraste com o caso anterior, é composta por duas parcelas não nulas: o alongamento do aço e o encurtamento do concreto (que seria nulo no caso anterior).

Por fim, a protensão sem aderência, que é um caso é semelhante ao anterior, mas a etapa final de injeção de nata de cimento é excluída. Como resultado, devido à ausência de aderência, o cabo pode deslizar dentro da bainha sob a influência de outras cargas. As monocordoalhas engraxadas e alojadas em bainhas plásticas estão sendo amplamente utilizadas hoje em dia. Essas medidas proporcionam proteção contra corrosão da armadura e reduzem o atrito entre o cabo e a bainha. Existem vantagens econômicas e técnicas em usar esse tipo de cabo em lajes lisas e lajes de fundação do tipo radier. Essas vantagens incluem facilidade de disposição dos cabos (por serem leves), facilidade nas operações de protensão e ancoragem. Esses tipos de lajes são mais esbeltas, permitem maiores vãos para a mesma espessura, reduzem os deslocamentos permanentes, impedem ou reduzem a fissuração em serviço e não apresentam problemas de fadiga, devido à pequena oscilação de tensão resultante da pequena oscilação da carga útil. No entanto, existem algumas desvantagens estruturais, como a perda total de um cabo em caso de ruptura local e a possibilidade de a armadura não aderente ao concreto não escoar em caso de colapso da laje. Vale ressaltar que a protensão sem aderência é uma fase transitória (em vazio) do caso anterior, que é objeto de verificações no projeto. Além disso, a protensão sem aderência também é usada no reforço de estruturas existentes, onde os cabos são externos à peça.

2.3 Lajes Alveolares

A NBR 14861:2022 define lajes alveolares como:

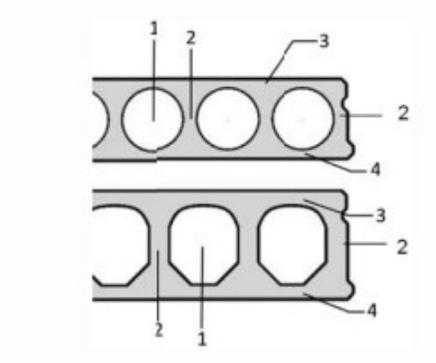
elemento com seção transversal vazada, com a presença de nervuras de concreto e alvéolos, de geometria variada, conforme representada na Figura 5, caracterizada por conter armaduras principais longitudinais ativas por pré-tensionamento e pela não obrigatoriedade de armadura transversal de cisalhamento.

As lajes, que são componentes estruturais críticos em qualquer construção, possuem uma seção típica que é caracterizada por elementos distintos: os alvéolos, a alma de concreto e as cordoalhas na borda inferior.

Estes elementos trabalham em conjunto para fornecer a resistência e a durabilidade necessárias à laje. De acordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 14861:2022, a geometria dos alvéolos deve ser definida de forma cuidadosa e precisa durante a fase de projeto. Isso é importante porque a forma e o tamanho dos alvéolos podem variar significativamente, dependendo do equipamento utilizado pelos fabricantes durante o processo de produção.

A Figura 5, apresenta uma visualização clara das seções típicas de lajes alveolares, bem como uma representação da geometria dos alvéolos típica,

Figura 5. Exemplo de Laje Alveolar Sugerido pela NBR 14861:2022



Fonte: NBR 14861:2022

Os itens presentes na figura 5, podem ser definidos como:

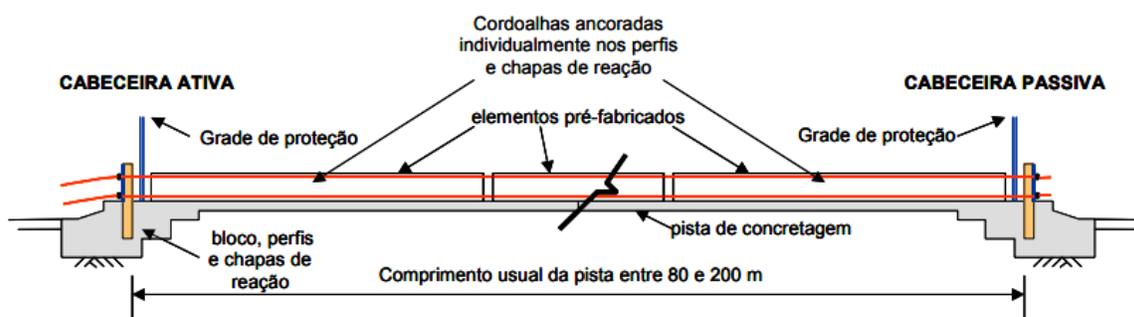
1. *Alvéolo*
2. *Nervura interna e externa*
3. *Mesa Superior*
4. *Mesa inferior*

Para melhor exemplificar a respeito das características geométricas dos painéis alveolares, utiliza-se das palavras de Van Acker (2002), citado por Ferreira (2003), afirma que as lajes alveolares são caracterizadas por uma largura nominal de 1200 mm, e têm a capacidade de

chegar a um comprimento de até 20 m. A seção transversal desses elementos apresenta uma altura que pode variar entre 15 cm e 50 cm, e essa variação depende do catálogo específico do fabricante, donde os recortes ou chavetas de cisalhamento encontrados nas bordas dos elementos, conforme descrito por Van Acker (2002) e apoiado por Ferreira (2003), desempenham um papel crucial na garantia da transferência do cisalhamento vertical entre os objetos interligados. Isso é obtido por meio do grauteamento das juntas.

No que diz respeito ao processo de produção, a fabricação das lajes alveolares podem ser realizadas utilizando-se máquinas extrusoras ou formas deslizantes. Consoante ao que argumenta Petrucelli (2009, p.20) o processo de fabricação de lajes alveolares é contínuo e pode ser caracterizado como um sistema de produção linear. A concretagem é realizada em pistas de protensão que podem chegar a ter até 180 metros de comprimento.

Figura 6. Esquema de uma pista de Protensão típica



Fonte: Steel Techne (disponível em: <https://steeltechne.com.br/protensao/>)

Figura 7. Produção de Lajes Alveolares em Pistas de Protensão



Fonte: WCH Formas

(disponível em: <https://wch.com.br/formas-para-lajes-alveolares/>)

O comprimento das peças é definido em projeto, sendo marcados na pista de protensão, e após o processo de cura do concreto, o corte da peça é realizado. Seguindo o processo de montagem do piso e grauteamento das chavetas de cisalhamento, torna-se necessário adicionar uma capa estrutural de concreto. Esta capa é composta por uma tela de aço soldada, que será usada para a posterior paginação do piso, donde a capa desempenha um papel significativo no aumento da resistência ao cisalhamento. A NBR 9062:2017 recomenda uma espessura mínima nominal de 5 cm para esta capa de concreto, demonstrando a importância de seguir as especificações corretas para garantir a resistência e durabilidade da laje alveolar.

2.4 Parametros de Projeto

Para que a rotina computacional seja executada, é necessário que o usuário antes levante alguns dados de entrada:

- Resistência Característica do Concreto (f_{ck}) em mPa;
- Resistência Característica do Concreto no ato da protensão (f_{cj}) em mPa;
- A cordoalha utilizada, por padrão o programa está configurado com o catálogo da empresa Arcelor Mittal que se encontra anexado;
- Características Geométricas da seção, tais como largura, vão Livre, espessura, espessura da capa, número de septos e diâmetro dos furos;
- Cobrimento Nominal;
- Esforços sobre a lajes, tais como a sobrecarga e ações variáveis;
- Perdas de protensão;

3 Tipo de Protensão utilizada no programa

O software de engenharia em questão foi meticulosamente programado para levar em consideração a situação de protensão limitada; que é um cenário comum em projetos que empregam Concreto Protendido de Nível 2. Esta configuração se baseia na Tabela 13.4 da NBR 6118:2023. A aderência a esse padrão permite que o software estabeleça alguns parâmetros cruciais para o dimensionamento e análise de estruturas de concreto. Entre esses parâmetros estão as classes de agressividade ambiental previstas, as exigências relativas à fissuração e por a combinação de ações a serem utilizadas em cada projeto.

Tabela 1. Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118:2023

Tipo de concreto estrutural	Tipo de protensão	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	–	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	–	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	–	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	–	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
	Pós-tração	CAA I e CAA II		
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração	CAA I e CAA II	Verificar as duas condições abaixo ELS-F	Combinação frequente
	Pós-tração	CAA I a CAA IV	ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração	CAA I a CAA IV	Verificar as duas condições abaixo ELS-F	Combinação rara
	Pós-tração	CAA I a CAA IV	ELS-D ^a	Combinação frequente
<p>Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.</p> <p>No caso de pré-tração em estruturas de concreto pré-fabricado, devem ser atendidos os requisitos da ABNT NBR 9062.</p> <p>NOTA 1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.</p> <p>NOTA 2 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.</p>				
<p>^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (ver Figura 3.1).</p>				

Fonte: ABNT NBR 6118:2023

4 Itens do dimensionamento

A rotina de cálculo proposta para este trabalho foi baseado na rotina de cálculo desenvolvida por João Bento Hanal, professor titular da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, no livro “Fundamentos do Concreto Protendido”.

A consideração estrutural desse modelo é um elemento bi-apoiado sob a ação de um carregamento uniformemente distribuído, de modo a garantir que não haja continuidade dos

esforços nos apoios, tampouco nos elementos de ligação.

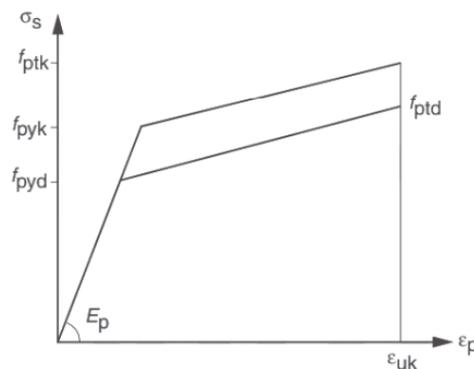
4.1.1 Materiais para Concreto Protendido

A primeira etapa de dimensionamento se refere a escolha do material, nesse momento o usuário precisa definir a resistência a compressão característica do concreto f_{ck} , a a resistência a compressão característica do concreto no ato da protensão, do concreto e as cordoalhas a serem utilizadas, tanto na armadura inferior quanto na armadura superior.

Todavia, mediante a exigência de técnicas mais sofisticadas e controle de qualidade eficiente, demandadas pela protensão, resultaram no uso de concretos de melhor qualidade com resistência à compressão de no mínimo de 30 a 40MPa. De modo a propiciar resistência a altas solicitações prévias, na redução de dimensões e peso, o que é essencial para elementos pré-moldados, bem como menores deformações imediatas e ao longo do tempo, diminuindo perda de protensão causada pela retração e fluência do concreto.

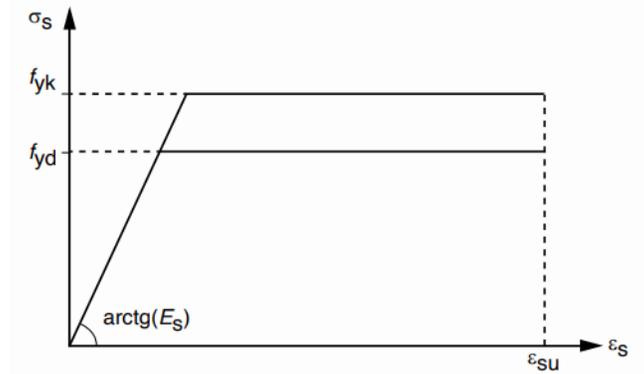
O aço utilizado nas estruturas protendidas, também apresentam propriedades diferentes das encontradas em ações estruturais para concreto armado, estes são marcados principalmente, pela sua elevada resistência, assim como a ausência de um patamar de escoamento. Como pode ser observado nas figuras abaixo.

Figura 8. Diagrama tensão vs. deformação para os aços de armadura ativos



Fonte: ABNT:NBR:6118-2023

Figura 9. Diagrama tensão vs. deformação para os aços de armadura passivas



Fonte: ABNT:NBR:6118-2023

Outro ponto notável, é sua disposição em cordoalhas e fios, mediante a baixa solicitação usuais em lajes alveolares, foram adotados os fios para dimensionamento.

Para facilitar a escolha dos fios, a configuração padrão do aplicativo é baseada no catálogo da ArcelorMittal. Isso é feito para proporcionar maior agilidade ao usuário durante o processo de seleção da cordoalha adequada para as necessidades de projeto. Com todas as propriedades da cordoalha vinculadas no aplicativo, os usuários podem fazer escolhas informadas rapidamente e com confiança, de maneira a economizar tempo e esforço.

O catálogo da ArcelorMittal pode ser encontrado na figura abaixo:

Figura 10. Catálogo ArcelorMittal: Fios para Concreto Protendido

Fios para Concreto Protendido

Fornecidos de acordo com as normas ABNT NBR 7482:2020, ASTM A 421, ASTM A 881, prEN 10138-2 e BS 5896

Características

- Perdas máximas por relaxação após 1.000 horas a 20°C para carga inicial de 80% da carga de ruptura: 3,0%.
- Valor médio do módulo de elasticidade: 205kN/mm² +/- 5%.
- Correspondência adotada pela NBR 7482 (revisão 01/2020): 1kgf/mm² = 9,81MPa.



ESPECIFICAÇÕES DOS PRODUTOS - FIOS PARA PROTENSÃO

Produto	Diâmetro nominal (mm)	Área aprox. (mm ²)	Massa aprox. (kg/1.000m)	Carga mínima de ruptura (kN)	Carga mínima a 1% de deformação (kN)	Alongamento após ruptura (%)
Fio CP RB (Relaxação Baixa)						
CP 145 RB	9,0	63,6	499	89,5	80,5	3,0
CP 150 RB	8,0	50,3	395	73,0	65,7	3,0
CP 170 RB	7,0	38,5	302	63,3	56,9	3,0
CP 175 RB	4,0	12,6	98	21,0	18,9	3,0
	5,0	19,6	154	33,0	29,7	3,0
	6,0	28,3	222	47,7	43,0	3,0
*CP 190 RB	4,0	12,6	98	22,8	20,5	3,0
	5,0	19,6	154	35,9	32,3	3,0
	6,0	28,3	222	51,8	46,6	3,0

- * Os fios podem ser fabricados sob consulta.
 1 - Todos os fios especificados acima podem ser fabricados lisos ou entalhados.
 2 - A profundidade do entalhe pode ser especificada pelo cliente.
 3 - Os fios lisos são fabricados sob consulta.

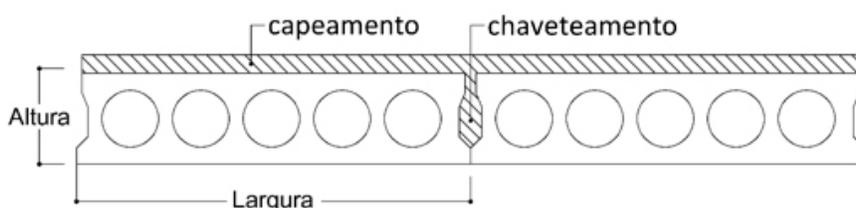
Fonte: ArcelorMittal

Como pode ser observado na figura acima, a nomenclatura dos aços para concreto protendido se difere do convencional, como exemplificação, o “CP 175 RB” se refere a um aço para concreto protendido, com resistência mínima de ruptura a tração de 175 kN/mm², o que equivale à 1750 mPa.

4.1.2 Dados Geométricos da Seção

A aplicação está configurada para realizar os cálculos baseando-se na seção transversal considerando septos circulares e de mesmas dimensões. Tal como é ilustrado na figura abaixo:

Figura 11. Seção prevista para a lajes alveolar



Fonte: Catálogo PREFOR: Estruturas e Pré-Moldados

Esta seção foi selecionada por duas razões principais. Primeiramente, ela é amplamente empregada no mercado, o que indica sua preferência entre os profissionais do setor. Isso pode ser atribuído a uma série de fatores, incluindo sua eficácia e confiabilidade. Em segundo lugar, esta seção permite um cálculo fácil de componentes geométricos críticos. Isso inclui o momento de inércia, que é uma quantidade física que descreve a distribuição de massa de um corpo ou sistema de partículas em relação a um eixo de rotação, e a área de concreto, que é um fator crucial na determinação da quantidade de matéria-prima necessária e na previsão da resistência estrutural.

Posto isso, a segunda etapa do dimensionamento, consiste na definição das propriedades da seção transversal, para isto é necessário que o usuário especifique valores dimensionais para a laje alveolar.

Os dados de entrada nesse item se referem a largura da seção transversal, o vão a ser vencido, a espessura da laje alveolar, a espessura da capa de compressão, cobertura nominal, as dimensões do alvéolo e a quantidade de alvéolos.

A partir dessas informações a aplicação irá realizar o cálculo do espaçamento entre os septos (1), a área de concreto (2), momento de inércia (3) e Módulo de Resistência Elástico da seção (4).

$$b_{w,int} = (b_w - 2 * Cn) - \frac{(b_{alv} * n)}{(n + 1)} \quad (1)$$

$$A_c = (h * bw) - (b_{alv}^2 * \pi * 0,25) * n \quad (2)$$

$$I_c = \frac{h^3 * bw}{12} - \left(\frac{b_{alv}^4 * \pi}{64} \right) * n \quad (3)$$

$$W_x = \frac{I_c}{h/2} \quad (4)$$

Onde:

$b_{w,int}$ é a distância entre os septos;

b_w é a largura da seção transversal;

Cn é o cobrimento nominal;

b_{alv} é o diâmetro do alvéolo;

n é a quantidade de alvéolos

A_c é a área de concreto;

h é a espessura da laje alveolar;

I_c é o momento de inércia em relação à x ;

W_c é o Módulo de Resistência Elástico da seção;

4.1.3 Esforços Solicitantes e Combinação de Ações

Os esforços solicitantes são obtidos, por meio do peso próprio, da sobrecarga, conforme previsto em projeto e ações acidentais que são definidas de acordo com utilização da edificação, esses valores de ações acidentais podem ser encontrados na tabela 10 da norma NBR 6120:2019, Ações para o cálculo de estruturas de edificações.

$$pp = (A_c * \gamma_c) + (h_t * b_w * \gamma_c) \quad (5)$$

$$g = pp + g_2 \quad (6)$$

Onde:

γ_c é o peso específico do concreto;

h_c é a espessura da capa de concreto;

g são as ações permanentes

g_2 é a sobrecarga na estrutura

Para realizar a combinação de ações quase permanentes, conforme propostos no item 2.3.1.1, utilizou-se o que está proposto na NBR 8681:2003, Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. A equação proposta por essa norma, no item 5.1.5.1, pode ser encontrada abaixo.

Figura 12. Combinação Quase Permanente

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,k}$$

Fonte: ABNT NBR 8681:2003

O parâmetro ψ_2 obtido na tabela 6 da norma NBR8681:2003, e sua função é minorar os efeitos das ações variáveis.

Para que seja calculado o momento máximo que ocorrerá em cada laje alveolar, se faz necessário multiplicar o valor da combinação de serviço pela largura bw da laje alveolar, este procedimento pode ser observado no equacionamento abaixo.

$$F_{d,serv,laje} = F_{d,serv} * bw \quad (7)$$

$$M_{max} = \frac{F_{d,serv,laje} * l^2}{8} \quad (8)$$

M_{max} é o momento máximo encontrado na laje,

situado no meio do vão;

l é o vão livre;

4.1.4 Estimativas das Forças de Protensão P_∞

A força de protensão no tempo infinito, também conhecida como P_∞ , é o valor que permanece após as perdas de protensão terem sido completamente descontadas. Neste contexto, uma das alternativas possíveis para o dimensionamento de estruturas de concreto protendido baseia-se na estimativa inicial da força de protensão final.

Este cálculo é realizado a partir das verificações dos estados limites de serviço, que são determinados de acordo com cada tipo e nível de protensão específico. Assim, é importante destacar que essa estimativa requer o conhecimento minucioso de algumas particularidades. dentre elas, podemos citar:

- a. as propriedades geométricas da seção transversal da estrutura;
- b. as propriedades mecânicas dos materiais que serão utilizados na construção
- c. os esforços solicitantes devido às cargas permanentes e variáveis que a estrutura será submetida;
- d. o nível de protensão selecionado para uso na estrutura e o tipo específico de protensão aplicado.

Além dos parâmetros mencionados anteriormente, ainda é necessário realizar uma estimativa inicial para as perdas de protensão que podem ocorrer durante o processo. Esse fator, que é definido como r_{∞} , fica geralmente na ordem de 0,75 a 0,85. Por outro lado, as perdas de protensão tendem a girar em torno de 15% a 25%, de acordo com informações obtidas a partir de experiências de projetos anteriores.

Para esta etapa, é requerido ao usuário a inserção do valor esperado para as perdas de protensão, o qual deve ser posteriormente verificado e caso o valor real exceda o calculado, recomenda-se a repetição do cálculo.

Abaixo, encontra-se o processo de cálculos realizados e os parâmetros a serem obtidos nessa etapa do dimensionamento.

$$\sigma_{(g+q),serv} = \frac{F_{d,serv,laje}}{W_x} \quad (9)$$

$$e = \left(\frac{h}{2}\right) - Cn - \frac{\Phi_{inf}}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_{p\infty,1} = \frac{-P_{\infty}}{A_c} + \left(\frac{e * -P_{\infty}}{W_{x1}}\right) \quad (11)$$

$\sigma_{(g+q),serv}$ é a tensão de serviço;
 e é a excentricidade da capa de concreto;
 P_{∞} é a força de proteção infinita;
 Φ_{inf} é o diâmetro da armadura inferior

Para o estado de protensão limitada, tem-se:

$$\sigma_{(g+q),serv} + \sigma_{p\infty} \leq f_{ct} \quad (12)$$

$$f_{ct} = f_{ctk,inf} = 0,21 * f_{ck}^{2/3} \quad (13)$$

$$P_i = \frac{P_{\infty}}{1 - \Delta P} \quad (14)$$

f_{ct} é a resistência do concreto à tração;
 $f_{ctk,inf}$ é o resistência característica inferior à tração do concreto;
 P_i é a força de protensão inicial
 ΔP São as perdas de protensão

4.1.5 Estimativa da Área da Armadura de Protensão

Em conformidade com o item 9.6.1.2.1 da ABNT NBR 6118:2023, por ocasião da aplicação da força P_i , a tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho de tração deve respeitar o limite de 74% da resistência mínima de ruptura a tração do fio, no caso de armadura pré-tracionadas.

Desse modo, para se obter a quantidade de aço necessário, utiliza-se o equacionamento abaixo:

$$\sigma_{pi} = 0,74 * f_{ptk} \quad (15)$$

$$A_p = \frac{P_i}{\sigma_{pi}} \quad (16)$$

σ_{pi} é a tensão referente a protensão inicial
 f_{ptk} é a resistência usual de ruptura
 A_p é a área de armadura ativa

4.1.6 Verificação de Tensões Normais no Concreto nas Fases de Protensão

Após determinar os valores representativos da força de protensão (P_i e P_∞), se faz necessário verificar completa de tensões normais no concreto.

Para isto, é imperativo analisar as diversas situações, as quais contemplem toda a vida útil do elemento estrutural, desse modo foi organizado na Tabela 2 os principais cenários e algumas peculiaridades referentes à seu cálculo.

Tabela 2. Fases de Protensão

Fases de Protensão	Tensões	Seção 1	Seção 6	Observação
Ato de Protensão	$\sigma_{pp} + \sigma_{pi}$	$\sigma_{pp} = 0$	-	Utilizar F_{cj}
Transporte e Montagem	$\sigma_{pp} + \sigma_{pi}$	$\sigma_{pp} = 0$	-	Ponderação com β_a
Estado em Vazio	$\sigma_g + \sigma_{pi}$	$\sigma_g = 0$	-	-
Estado em Serviço	$\sigma_g + \sigma_q + \sigma_{pi}$	$\sigma_{g+q} = 0$	-	-

Fonte: O Autor

Para cada uma dessas etapas, deve-se ser calculado o momento máximo atuante e as tensões resultantes em cada fibra do concreto, a fim de se definir os esforços de tração e compressão em cada um dos cenários propostos.

Quanto as observações, para o ato de protensão, o projetista deve adicionar a resistência característica do concreto no momento em que ocorrerá o estiramento dos cabos, recomenda-se liberar a força de protensão quando o concreto atingir pelo menos 25 mPa. Do mesmo modo, a majoração pelo coeficiente β_a se refere a uma recomendação da norma NBR 9062:2017, no item 5.3.2.2. O trecho retirado da norma pode ser encontrado na figura 14:

Figura 13. Coeficiente β_a

5.3.2.2 O coeficiente mínimo de amplificação dinâmica a ser utilizado para determinar a carga estática equivalente na verificação dos elementos deve ser dado por:

$\beta_a = 1,30$, na ocasião do transporte, com carga permanente em situação desfavorável;

$\beta_a = 0,8$, na ocasião do transporte, com carga permanente em situação favorável, ou outro valor definido em verificação experimental comprovada;

$\beta_a = 1,3$, na ocasião do saque da fôrma, manuseio no canteiro e montagem do elemento;

$\beta_a = 1,4$, na ocasião do saque da fôrma, manuseio no canteiro e montagem do elemento sob circunstâncias desfavoráveis, como o formato do elemento ou detalhes que dificultem a sua extração da fôrma ou superfície de contato com a fôrma maior que 50 m²;

$\beta_a < 1,3$, na ocasião do saque da fôrma, manuseio no canteiro e montagem quando os elementos forem de peso superior a 300 kN. O valor de β_a deve ser estabelecido conforme experiência local, bem como formas e equipamentos de içamentos adotados;

$\beta_a = 3$, para projetos dos dispositivos de içamento, para saque, manuseio e montagem, em contato com a superfície do elemento ou ancorado no concreto;

$\beta_a = 1,3$, para o caso de transporte e içamento de pilares, sendo obrigatória a limitação da tensão da armadura longitudinal do elemento a 0,50 f_{yk} .

Fonte: ABNT NBR 9062:2017

Assim, o utilizador terá de definir a situação contemplada em seu projeto e adicionar o coeficiente β_a mediante a sua necessidade. O Coeficiente β_a é um parametro de entrada da aplicação.

Na fase final do processo, realiza-se uma análise detalhada das tensões coletadas em comparação com os limites de tração e compressão do concreto. Essa análise é essencial para garantir a integridade estrutural do projeto. No caso das tensões de compressão ultrapassarem o limite estabelecido, o procedimento recomendado é a listada à seguir:

- a) Colocar armadura na face superior da laje;
- b) Retirar aderência de alguns fios, nas seções que apresentem problemas;

Caso seja necessário colocar armaduras na face superior, o equacionamento abaixo contempla as etapas a serem seguidas:

$$\sigma_{lim,t} = 1,2 * f_{ctm} = 1,2 * 0,3 * f_{ck}^{2/3} \quad (17)$$

$$\sigma_t = \sigma_{t,max} - \sigma_{t,lim} \quad (18)$$

$$F_t = \frac{\sigma_t * y}{2} * b_w \quad (19)$$

É válido destacar que, a depender das fases de protensão se utiliza-se o valor de f_{ck} na equação (14) será f_{cj} , altura y é obtida geometricamente e se refere a distância do bordo tracionado até a linha neutra, de modo que a força de tração da equação (16) é numericamente igual o triângulo de tensões.

4.1.7 Estado Limite Último – Verificação das Solicitações Normais

Os estados limites últimos são conceitos profundamente ligados à segurança e integridade de qualquer estrutura que seja submetida às combinações mais desfavoráveis de ações durante toda a sua vida útil. Estes estados são pontos críticos que, se ultrapassados, podem resultar em falhas catastróficas, levando as estruturas à ruína total. Esses estados são extremamente importantes para serem levados em consideração durante o processo de design e construção, pois o não cumprimento desses limites pode levar a consequências graves, desde danos materiais a perda de vidas.

Ao analisar o estado limite último em seções de concreto protendido se assemelha ao procedimento estabelecido pela norma NBR:6118,2023, para estruturas de concreto armado, entretanto, se faz necessário fazer a consideração das forças de protensão atuantes na seção transversal, para isso foi utilizado o equacionamento que se encontra abaixo.

$$A_p = n * A_{cordoalha} \quad (20)$$

$$F_{p,yk} = \frac{C_{min,1\%}}{A_{cordoalha}} \quad (21)$$

$$F_{p,yd} = \frac{F_{p,yk}}{\gamma_s} \quad (22)$$

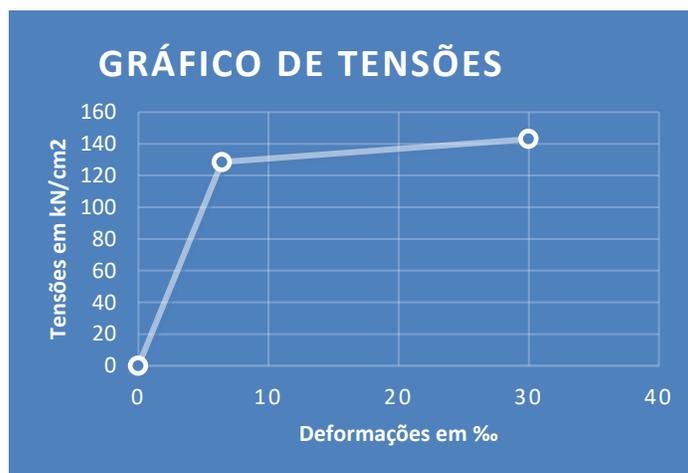
$$F_{p,tk} = \frac{C_{min,r}}{A_{cordoalha}} \quad (23)$$

$$F_{p,td} = \frac{F_{p,tk}}{\gamma_s} \quad (24)$$

Os valores de força de protensão são obtidos, por meio da consulta ao catálogo do fornecedor, para o exemplo em questão, utiliza-se o catálogo da Arcelor Mittal, presente neste trabalho.

Posteriormente, é preciso analisar as deformações presentes, esse procedimento se encontra abaixo.

Figura 14. Gráfico de Tensões



Fonte: O autor

Isso é realizado levando em consideração o equacionamento abaixo:

$$E_{p,yd} = \frac{F_{pyd}}{E_p} \quad (25)$$

$$P_d = \gamma_p * P_\infty \quad (26)$$

$$E_{cs} = \alpha_i * \alpha_e * 5600 * f_{ck}^{1/2} \quad (27)$$

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{cs}} \quad (28)$$

$$\sigma_{c,pd} = 0,9 * P_\infty * \left(\frac{1}{A_c}\right) * \left(\frac{e^2}{I_c}\right) \quad (29)$$

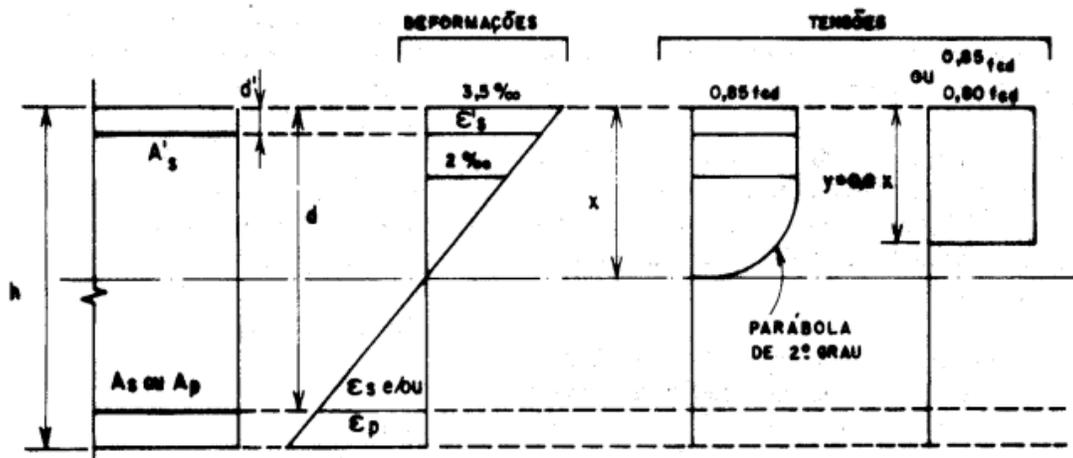
$$P_{n,d} = P_d - \alpha_p * A_p * \sigma_{c,pd} \quad (30)$$

A execução do cálculo dos itens e deve seguir estritamente as recomendações estabelecidas pela norma NBR:6118;2023. É importante notar que todas as equações

mencionadas acima foram diretamente extraídas dessa norma específica, que serve como um guia confiável para esses cálculos.

Quando se trata de determinar as áreas de aço necessárias, é recomendável utilizar o modelo parábola retângulo. Este modelo é uma proposta sugerida pela NBR:6118, devido à sua eficácia comprovada. Uma ilustração desse modelo pode ser vista na figura 15, que está localizada na seção seguinte, fornecendo uma visualização clara e compreensível desse conceito.

Figura 15. Esquemas relativos às hipóteses básicas de cálculo



Fonte: Fundamentos do Concreto Prontendido

Considerando algumas hipóteses básicas

Conforme a NBR 6118, na análise dos esforços resistentes de uma seção de viga ou pilar, devem ser consideradas as seguintes hipóteses básicas:

- as seções transversais se mantêm planas após deformação;
- a deformação das barras passivas aderentes ou o acréscimo de deformação das barras ativas aderentes em tração ou compressão, deve ser o mesmo do concreto em seu entorno;
- para armaduras ativas não aderentes, na falta de valores experimentais e de análises não lineares adequadas, os valores do acréscimo das tensões para estruturas usuais

de edifícios estão apresentados a seguir, devendo ainda ser divididos pelos devidos coeficientes de ponderação:

- d) as tensões de tração no concreto, normais à seção transversal, podem ser desprezadas;
- e) a distribuição de tensões no concreto se faz de acordo com o diagrama parábola retângulo definido no item 8.2.10 (da NBR 6118) com tensão de pico igual a $0,85 f_{cd}$, com f_{cd} definido conforme item 12.3.3. Esse diagrama pode ser substituído pelo retângulo de altura $0,8 x$ (onde x é a profundidade da linha neutra), com a seguinte tensão:
 - $0,85 f_{cd}$ no caso da largura da seção, medida paralelamente à linha neutra, não diminuir a partir desta para a borda comprimida;
 - $0,80 f_{cd}$ no caso contrário;

As diferenças de resultados obtidos com esses dois diagramas são pequenas e aceitáveis, sem necessidade de coeficiente de correção adicional.

- f) a tensão nas armaduras deve ser obtida a partir dos diagramas tensão-deformação, com valores de cálculo, definidos nos itens 8.3.6 e 8.4.5 (da NBR 6118).
- g) o estado limite último é caracterizado quando a distribuição das deformações na seção transversal pertencer a um dos domínios definidos na figura a seguir (Figura 15).

- b) No caso de flexão composta, é importante que as forças internas estejam em equilíbrio com a força normal externa. Essa é uma condição fundamental para garantir que a estrutura possa resistir a forças externas sem falhar ou deformar excessivamente.
- c) Equilíbrio de momentos fletores: o momento fletor atuante é igual ao momento fletor resistente, que pode ser calculado multiplicando-se as forças normais resultantes pelos respectivos braços em relação a um ponto. No caso de flexão composta, pode ser interessante estabelecer a equação de equilíbrio de momentos sempre com relação ao centro de gravidade da armadura tracionada (ou menos comprimida). Isso permite resolver esse problema como se fosse de flexão simples, efetuando-se a devida transformação de variáveis.
- d) Compatibilidade de deformações: ela é dada pelo diagrama de deformações, estabelecido de acordo com o domínio onde se enquadra a situação específica. Portanto, o cálculo das deformações é efetuado exatamente como se faz no caso de c. Isso é essencial para garantir que as deformações resultantes estejam dentro de limites aceitáveis, mantendo a segurança e a funcionalidade da estrutura.

Finalmente, obtém-se as áreas das armaduras de tração e compressão, necessária para que o atendimento do estado limite último, quanto a solicitações normais seja respeitado, a partir do equacionamento abaixo.

$$A_p = \frac{R_{ptd}}{\sigma_{pd}} \quad (32)$$

$$A_{sc} = \frac{R_{sc}}{\sigma_{pd}} \quad (33)$$

Portanto, se faz necessário que o procedimento de verificação se assemelha ao realizado para estruturas de concreto armado, maiores detalhes sobre esse procedimento de cálculo podem ser encontrados na NBR:6118,2023.

4.1.8 Estado Limite Último -Verificação da Força Cortante

Analogamente ao caso de solicitações normais, o estado limite último de solicitações quanto a força cortante se assemelha aos casos de concreto armado, todavia sua principal diferença está presença das forças introduzidas pelas armaduras ativas.

O procedimento de cálculo realizado pode ser encontrado abaixo:

$$b_{w,ef} = b_w - n * b_{atv} \quad (34)$$

$$V_{sk} = \frac{(g + q) * l}{2} \quad (35)$$

$$V_{sd} = \gamma_c * V_{sk} \quad (36)$$

$$\tau_{rd1} = [\tau_{rd,k} * (1,2 + 40 * \varphi_1) + 0,15 * \sigma_{cpd}] * b_w * d \quad (37)$$

Para que seja calculado, se faz necessário calcular alguns parâmetros intermediários, os quais também são fornecidos pela NBR:6118, 2023, e estes podem ser encontrados a seguir:

$$\tau_{rd} = 0,25 * f_{ctd} \quad (38)$$

Deste modo, compara-se o valor da tensão cisalhante resistente e o valor da tensão cisalhante solicitado, para que seja realizada a verificação quanto ao cisalhamento no estado limite último.

4.1.9 Estado Limite de Serviço – Verificação de Flecha

A partir do que é proposto pela NBR:6118:2023, para que seja verificado o estado limite de

serviço, é necessário realizar a combinações de esforços, conforme é demonstrado na tabela 11.4 desse texto normativo.

Tabela 3. Combinações de Serviço

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 $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \Sigma F_{gi,k} + \Sigma \psi_2 F_{qj,k}$
Combinações frequentes de serviço (CF)	Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor frequente $\psi_1 F_{q1k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + \psi_1 F_{q1k} + \Sigma \psi_2 F_{qjk}$
Combinações raras de serviço (CR)	Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor característico F_{q1k} e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes $\psi_1 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + F_{q1k} + \Sigma \psi_1 F_{qjk}$
<p>onde</p> <p>$F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço;</p> <p>F_{q1k} é o valor característico das ações variáveis principais diretas;</p> <p>ψ_1 é o fator de redução de combinação frequente para ELS;</p> <p>ψ_2 é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.</p>		

Fonte:NBR:6118,2023

Para o caso proposto nesse trabalho, a combinação quase-permanente será utilizada.

A partir da consideração estrutural feita no item 3, tem-se a equação da flecha máxima para uma viga bi-apoiada com carregamento uniformemente distribuído:

$$a_i = \frac{5}{384} * \frac{F_{d, serv} * l^4}{E_{cs} * I_c} \quad (39)$$

$$a_f = a_i * (1 + \alpha_f) \quad (40)$$

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + \rho'} \quad (41)$$

$$\rho' = \frac{As'}{b * d} \quad (42)$$

No caso do concreto protendido, é imperativo considerar o efeito favorável da protensão, nessa situação, é gerado um binário que ocorre devido a força de protensão infinita em relação a excentricidade, em decorrência disso é gerado uma flecha inicial negativa a qual será responsável por minorar a flecha atuante calculada no item anterior, de acordo com o equacionamento abaixo.

$$M_{p\infty} = P_{\infty} * e \quad (43)$$

$$a_{pi} = \frac{M_{p\infty} * l^2 * \alpha}{2 * E_{cs} * I_c} * (1 - \alpha) \quad (44)$$

$$a = a_i - a_{pi} \quad (45)$$

4.1.10 Alongamento de Protensão e Pressão Manométrica

A última etapa presente na rotina de cálculo, se refere a parte de execução das lajes alveolares, visto que nessa etapa é dimensionado, de maneira prática a força que será aplicada nos cabos de protensão, afim de gerar o resultado esperado.

Destaca-se, que mediante a vigência da lei de Hooke, a qual garante a proporcionalidade entre tensões e deformações no aço, é possível determinar esses esforços de duas maneiras distintas, sendo a primeira através da leitura do manômetro macaco hidráulico e segundo pelo estiramento do fio.

Figura 17. Macaco hidráulico de Protensão para Mono Cabo de aço diâmetros de 3/8" a 5/8"



Fonte: Usiwal (disponível em: <https://www.usiwal.com.br/macaco-protensao-page>)

Essa dupla validação é indispensável, de modo a assegurar o maior rigor tecnológico demandado pelas estruturas de concreto protendido, abaixo é encontrado as equações utilizadas para chegar a tais valores:

$$P_i/f_{io} = \frac{P_i}{n_{fios}} \quad (46)$$

$$\Delta L = \frac{P_i/f_{io} * l_{pista}}{A_{\emptyset} * E_p} \quad (47)$$

$$P_{man} = 145,038 * \frac{P_i/f_{io}}{A_{pistão}} \quad (48)$$

Ressalta-se que, é necessário que o usuário adicione alguns parâmetros de entrada, mediante as características de seus equipamentos de protensão, sendo eles a área de cada pistão e também o comprimento da pista de protensão. Quanto a pressão manométrica, é utilizado um fator de conversão para que o resultado seja expresso PSI, que é a unidade mais utilizada em macacos hidráulicos.

5 DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO

O projeto iniciou-se a partir da adaptação de uma rotina de cálculo já existente, desenvolvida por João Bento Hanal. Este processo envolveu realizar as devidas adaptações para o caso específico de lajes alveolares. Além disso, se fez necessário atualizar o modelo para as versões mais recentes das Normas, NBR:6118:2023, NBR:6120:2019 e NBR:9062:2017.

Ao empregar uma abordagem metódica e centrada no detalhe, conseguimos desenvolver uma aplicação robusta baseada no Microsoft Excel e no Visual Basic for Applications. Esta aplicação é extremamente abrangente e contempla todas as verificações necessárias para o dimensionamento, como previsto no tópico 2.4. Destaca-se, a escolha de desenvolver essa rotina de cálculo no Microsoft Excel, pois o mesmo é uma ferramenta de fácil utilização e grande familiaridade ao público alvo desse trabalho

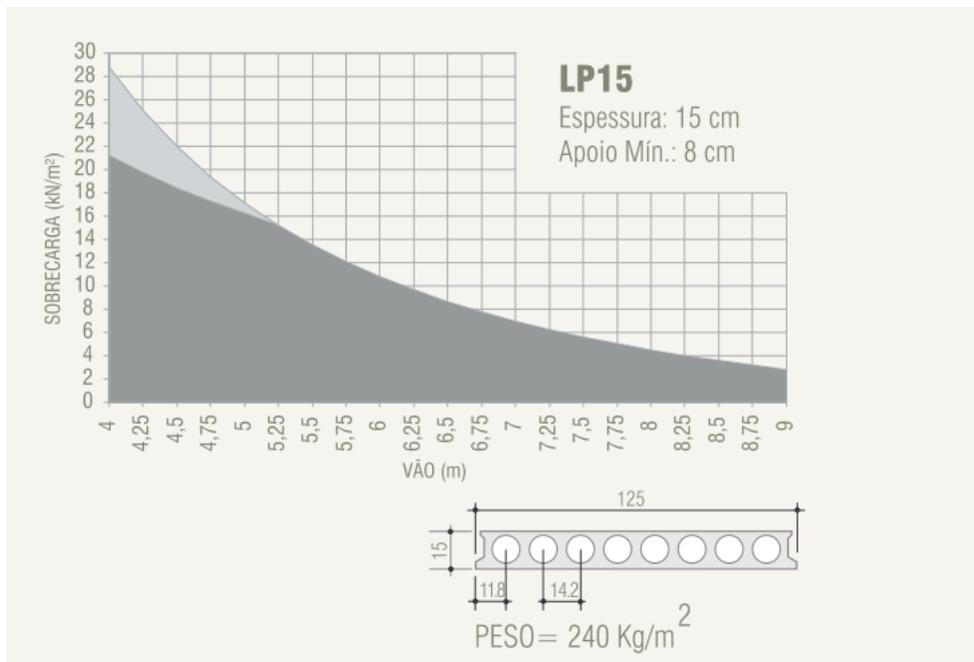
6 VALIDAÇÃO TEÓRICA DA APLICAÇÃO

Em decorrência da falta de bibliografia, a qual exemplifique o detalhamento das lajes alveolares compreendidas na aplicação, utilizou-se de dois métodos principais para validação do modelo de cálculo.

Primeiramente, junto ao professor orientador desse trabalho, foi desenvolvida um memorial de cálculo manual a qual contemplasse todos os valores intermediário a serem obtidos, bem os dados de saída do programa. Assim, foi possível colocar a rotina computacional para executar um memorial verificado por pares.

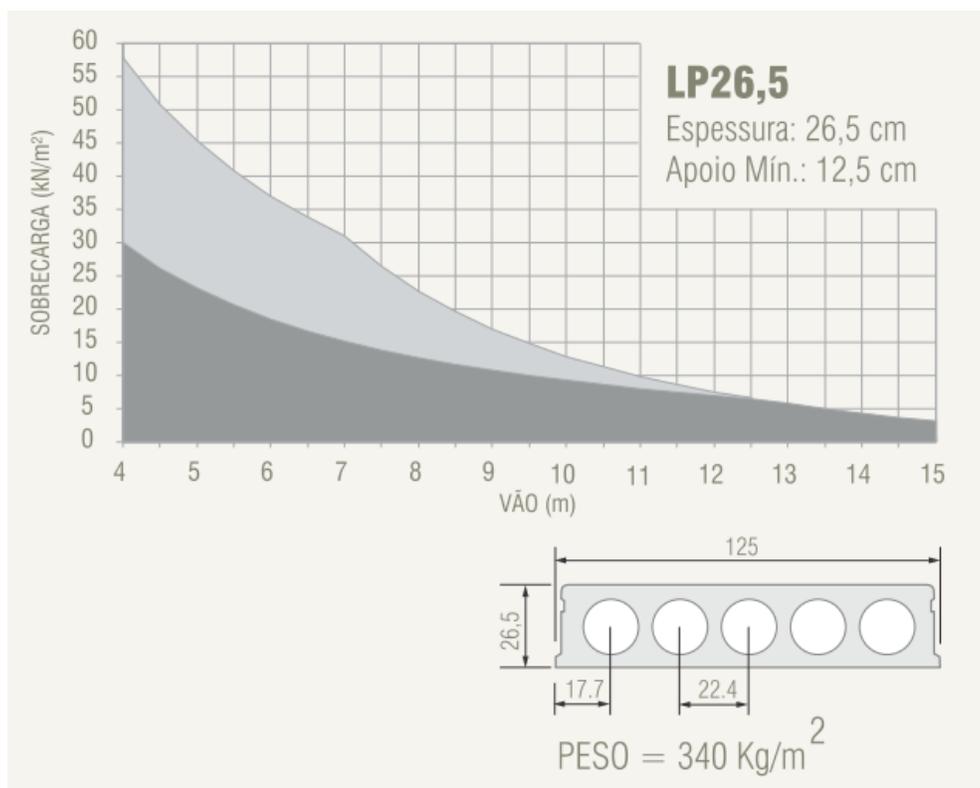
Já em um segundo momento, foi utilizado as tabelas de pré-dimensionamento disponibilizadas pela fabricante de peças pré moldadas Cassol, que está disponível na figura 18, que se encontra abaixo

Figura 18. Pré-dimensionamento de Lajes Cassol



Fonte: Catalogo Cassol Pré-Fabricados

Figura 19. Pré-dimensionamento de Lajes Cassol



Fonte: Catálogo Cassol Pré-Fabricados

A partir das informações presentes no abaco de pré-dimensionamento do fornecedor verificou se para os 37 valores distintos de vão, obtidos dos abacos acima, juntamente a um par de valor de sobrecarga compreendido nos limites do abaco. Os critérios de análise para verificar que o programa atendeu o especificado pela fabricante foram:

- a) A seção de concreto comprimido foi suficiente;
- b) A quantidade de armadura necessária na face inferior respeitadas os limites de taxa de armaduras máximas;
- c) A quantidade de armaduras na face superior respeitadas os limites de taxa de armadura máximas;

As devidas correções foram aplicadas, resultando assim, na diminuição dos eventuais erros de cálculo e programação fossem eliminados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que, portanto, que a indústria dos pré-fabricados de concreto protendido é uma tendência para construção civil e industrial em território nacional e a divulgação acadêmica da mesma cria um cenário favorável para o desenvolvimento desse mercado.

Especificamente, a rotina computacional para dimensionamento de lajes alveolares protendidas elaborada nesse trabalho, se apresenta como uma excelente ferramenta para o engenheiro projetista durante o processo de concepção estrutural e podendo se estender até o dimensionamento. De maneira que, a mesma pode ser utilizada como ferramenta auxiliar para a primeira iteração em softwares de cálculos estruturais, como Cypecad, TQS e Eberick, resultando em um menor número de iterações de cálculo.

Diante disso, esse trabalho foi uma excelente oportunidade para adentrar no mundo do concreto protendido e estruturas pré-fabricadas de concreto, o que reforça um dos objetivos ,propostos na grade curricular do curso de engenharia civil da Universidade Federal de Uberlândia, sintetizar os conteúdos adquiridos ao longo

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas- Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14681**: Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido — Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2022.
- Buchaim, R. (2007). **Concreto Protendido: Tração Axial, Flexão Simples e Força Cortante** (2o ed). Oficina de Textos.
- Castro ,S.V (2011). **Concreto Protendido - Vantagens e desvantagens dos diferentes processos de protensão do concreto nas estruturas**. Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
- CHUST, R.C. **Estruturas em Concreto Protendido**: Pré-Tração, Pós-tração, Cálculo de Detalhamento. 2°. ed. [S. l.]: PINI, 2017.
- El Debs, M. K. (2017). **Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações** (2o ed). Oficina de Textos.
- Ferro, K. B. (2020). DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE LAJES ALVEOLARES. Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.
- Kimura, A. (2018). Informática aplicada a estruturas de concreto armado (2o ed). Oficina de Textos.
- MELO, C. E. M. **Manual Munte**: de projetos em pré-fabricados de concreto. 2°. ed. [S. l.: s. n.], 2007.
- PETRUCCELLI, N. S. Considerações sobre Projeto e Fabricação de Lajes Alveolares Protendidas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- Prado, T. B. (2013). PRINCIPIOS PARA PROJETO EM LAJE ALVEOLAR E LAJE MISTA AÇOCONCRETO BIAPOIADAS. Faculdade de Engenharia Civil

Universidade Federal do Mato Grosso.

Ramalho, R. G. (2013). DIMENSIONAMENTO DE LAJES ALVEOLARES. Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará.

3. Resumo de Tensões (Conforme Item 5)

β_a	1,3	Fases	Seção 1		Seção 6	
			σ_{sup}	σ_{inf}	σ_{sup}	σ_{inf}
		Ato de Protensão	0,4	-1,7	-0,1	-1,2
		Transporte e Montagem	0,5	-2,1	-0,1	-1,5
		Seção em Vazio	0,3	-1,2	-0,9	0,0
Estado em Serviço	-1,2	0,3	-1,1	0,2		

4. Armaduras Necessárias

Nº de Barras Necessárias	
Armadura Positiva Necessária	18
Armadura Negativa Necessária	6
Coloque Abaixo a quantidade de barras desejadas	
Armadura Positiva	20
Armadura Negativa	8

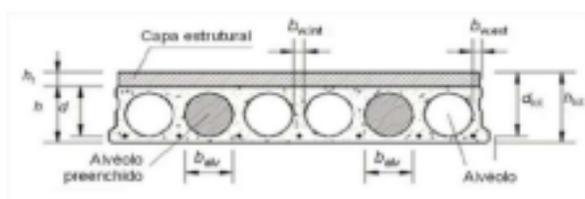
5. Verificações

Tempo (meses)	70	Verificações		
		Cortante	Vrd (kN)	88,36
			Vsd (kN)	57,09
		Flecha	Final (cm)	2,70
			Limite (cm)	2,84

6. Alongamento de Protensão e Pressão Manométrica

$D_{pistão}$ (cm)	2,54
L_{pista} (cm)	4800
ΔL (cm)	21,77
P_{man} (PSI)	4966,25

Anexo B- Memorial

Cálculo de Lajes Alveolares																							
	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Projeto:</td> <td style="background-color: #1a3d54; color: white; padding: 2px;">Exemplo</td> </tr> <tr> <td>Responsável:</td> <td style="background-color: #1a3d54; color: white; padding: 2px;">Exemplo</td> </tr> <tr> <td>Data:</td> <td style="background-color: #1a3d54; color: white; padding: 2px;"></td> </tr> </table>	Projeto:	Exemplo	Responsável:	Exemplo	Data:																	
Projeto:	Exemplo																						
Responsável:	Exemplo																						
Data:																							
1. Materiais																							
<p><u>Propriedades do Concreto</u></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Resistência Característica do Concreto (f_{ck}) (MPa)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center; width: 20%;">35</td> </tr> <tr> <td>Resistência Característica do Concreto (f_c) (MPa)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center;">25</td> </tr> </table>	Resistência Característica do Concreto (f_{ck}) (MPa)	35	Resistência Característica do Concreto (f_c) (MPa)	25	<p><u>Propriedades da Cordoalha</u></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Tipo de Cabo_{sup}</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center; width: 20%;">CP 170 R-7 mm</td> </tr> <tr> <td>Tipo de Cabo_{inf}</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center;">CP 170 R-7 mm</td> </tr> </table>	Tipo de Cabo _{sup}	CP 170 R-7 mm	Tipo de Cabo _{inf}	CP 170 R-7 mm														
Resistência Característica do Concreto (f_{ck}) (MPa)	35																						
Resistência Característica do Concreto (f_c) (MPa)	25																						
Tipo de Cabo _{sup}	CP 170 R-7 mm																						
Tipo de Cabo _{inf}	CP 170 R-7 mm																						
2. Dados Geométricos da Seção																							
<p><u>Seção da Laje (cm)</u></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Largura (cm)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center; width: 20%;">125</td> </tr> <tr> <td>Vão (cm)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center;">710</td> </tr> <tr> <td>Espessura (h)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center;">15</td> </tr> <tr> <td>Espessura da capa (cm)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Cobrimento Nominal (cm)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center;">1,5</td> </tr> </table> <p><u>Dimensões do Furo</u></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Diâmetro (cm)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center; width: 20%;">10</td> </tr> <tr> <td>Largura do Entre Septos (b_{alv}) (cm)</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center;">4,20</td> </tr> <tr> <td>Número de Septos</td> <td style="background-color: #008000; color: white; text-align: center;">8</td> </tr> </table> <p><u>Propriedade Geométricas</u></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Área de concreto (cm²)</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20%; text-align: center;">1172</td> </tr> <tr> <td>Momento de Inércia (cm⁴)</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">29823</td> </tr> <tr> <td>Módulo de Resistência Elástico da seção (cm³)</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">3976</td> </tr> </table>	Largura (cm)	125	Vão (cm)	710	Espessura (h)	15	Espessura da capa (cm)	0	Cobrimento Nominal (cm)	1,5	Diâmetro (cm)	10	Largura do Entre Septos (b_{alv}) (cm)	4,20	Número de Septos	8	Área de concreto (cm ²)	1172	Momento de Inércia (cm ⁴)	29823	Módulo de Resistência Elástico da seção (cm ³)	3976	
Largura (cm)	125																						
Vão (cm)	710																						
Espessura (h)	15																						
Espessura da capa (cm)	0																						
Cobrimento Nominal (cm)	1,5																						
Diâmetro (cm)	10																						
Largura do Entre Septos (b_{alv}) (cm)	4,20																						
Número de Septos	8																						
Área de concreto (cm ²)	1172																						
Momento de Inércia (cm ⁴)	29823																						
Módulo de Resistência Elástico da seção (cm ³)	3976																						

3. Esforços Solicitantes e Combinações de Ações

Esforços	
Peso Própria (kN/m ²)	2,93
Sobrecarga (kN/m ²)	3,26
Ações Permanentes	6,19
Ações acidentais	3,00

Combinação Quase Permanente	
$F_{d,urv}$ (kN/m ²)	7,39
$F_{d,urv,aje}$ (kN/m)	9,24
M_{max} (kN.m/laje)	58,20

4. Estimativa da Força de Protensão

$\sigma_{(g+q)_{urv}}$ (kN/cm ²)	1,46
$\sigma_{Prc}(kN) \cdot P_{rc}$	0,0023
e (cm)	5,65
f_{ct} (MPa)	2,25
P_{00} (kN)	544,76
Δp	2,2%
P_i (kN)	698,41
F_{ptk} (kN/cm ²)	164,42

5. Área da Armadura de Protensão

σ_{pi} (kN/cm ²)	121,67
A_p (cm ²)	6

Serão Utilizadas 6 barras de diametro 4

6 Verificação das Fases de Protensão

$\sigma_{lim,c}$ (MPa)	17,5
$\sigma_{lim,t}$ (MPa)	3,08
γ_{pp}	1,1

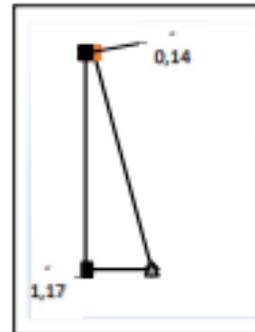
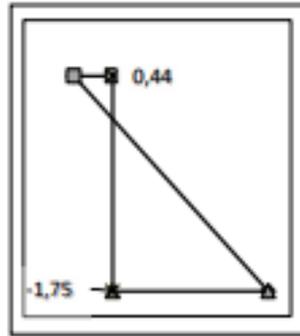
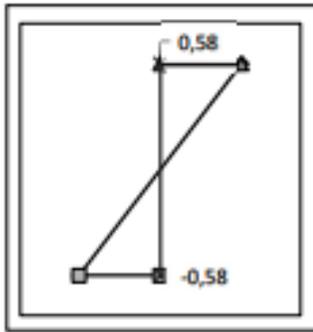
6.1 Ato de Protensão



6.1.1 Seção 6

PP (kN/m) 3,66
 Mpp (kN/m) 23,07
 σ_{pp1} (kN/m²) -0,58
 σ_{pp2} (kN/m²) 0,58
 σ_{pi1} (kN/m²) 0,40
 σ_{pi2} (kN/m²) -1,59

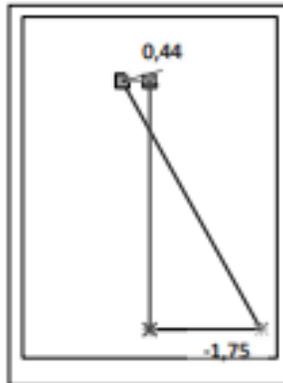
Seção R1 (kN/m²) -0,14
 Seção R2 (kN/m²) -1,17



6.1.2 Seção 1

σ_{pp1} (kN/m²) 0,00
 σ_{pp2} (kN/m²) 0,00
 σ_{pi1} (kN/m²) 0,40
 σ_{pi2} (kN/m²) -1,59

Seção R1 (kN/m²) 0,44
 Seção R2 (kN/m²) -1,75

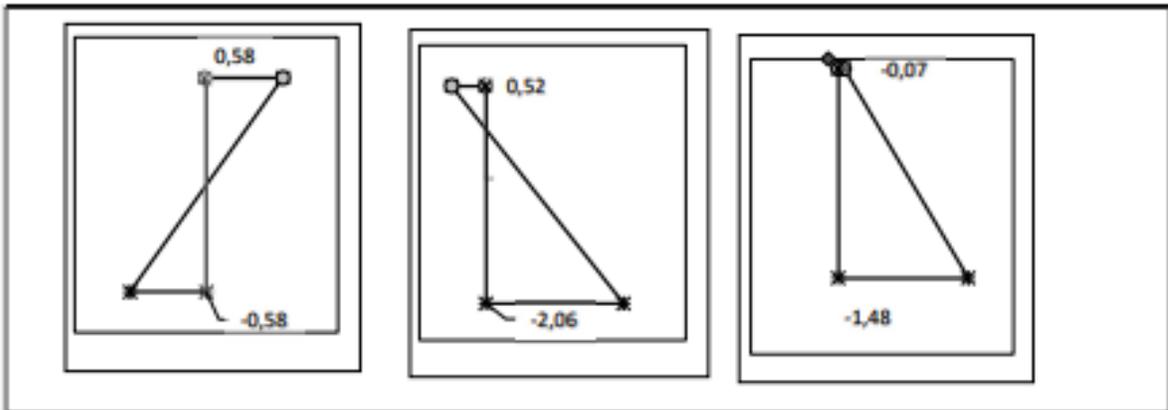


6.2 Transporte e Montagem

6.2.1 Transporte e Montagem: Seção S6

σ_{pp1} (kN/m²) -0,58
 σ_{pp2} (kN/m²) 0,58
 σ_{pi1} (kN/m²) 0,52
 σ_{pi2} (kN/m²) -2,06

Seção R1 (kN/m²) -0,07
 Seção R2 (kN/m²) -1,48



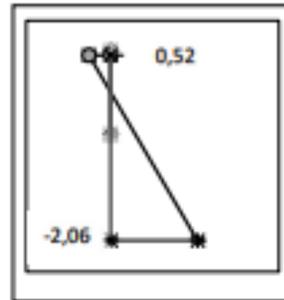
6.2.2 Transporte e Montagem: Seção S1

σ_{pp1} (kN/m²)
 σ_{pp2} (kN/m²)
 σ_{pi1} (kN/m²)
 σ_{pi2} (kN/m²)

0,00
 0,00
 0,52
 -2,06

Seção R1 (kN/m²)
 Seção R2 (kN/m²)

0,52
 -2,06



6.3 Estado em Vazio g e poo

g (kN/m²)
 P_{∞} (kN)

7,74
 544,76

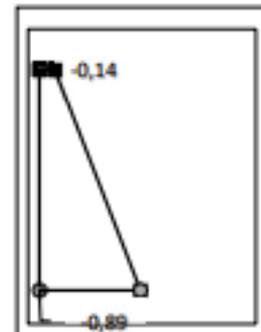
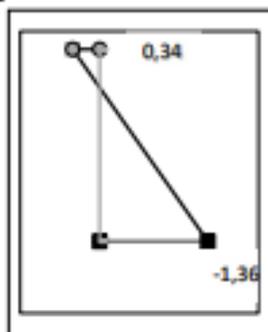
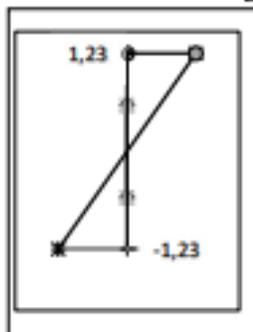
6.3.1 Estado em Vazio g e poo: Seção 6

Mg (kN/m)
 σ_{g1} (kN/m²)
 σ_{g2} (kN/m²)
 σ_{poo1} (kN/m²)
 σ_{poo2} (kN/m²)

48,7
 -1,2
 1,2
 0,3
 -1,2

Seção R1 (kN/m²)
 Seção R2 (kN/m²)

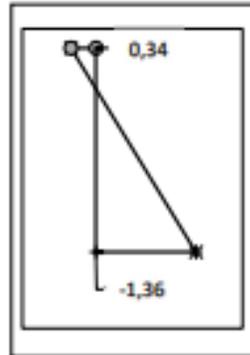
-0,92
 -0,01



6.3.2 Estado em Vazio g e poo:Seção 1

Mg (kN/m) 0,0
 σ_{g1} (kN/m²) 0,0
 σ_{g2} (kN/m²) 0,0
 σ_{poo1} (kN/m²) 0,3
 σ_{poo2} (kN/m²) -1,2

Seção R1 (kN/m²) 0,31
 Seção R2 (kN/m²) -1,24

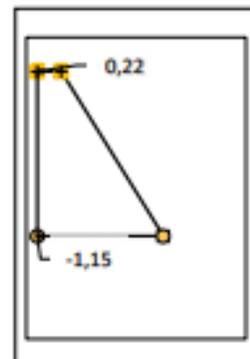
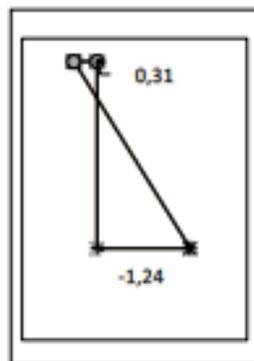
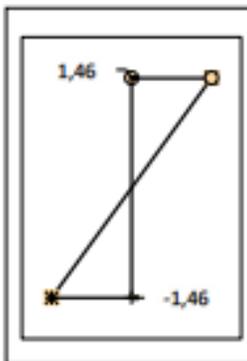


6.4 Estado em Serviço g,q e poo (Quase-Permanente)

5.4.1 Estado em Serviço g,q e poo (Quase-Permanente): Seção 6

Mg+q (kN/m) 57,9
 $\sigma_{(g+q)1}$ (kN/m²) -1,5
 $\sigma_{(g+q)2}$ (kN/m²) 1,5
 σ_{poo1} (kN/m²) 0,3
 σ_{poo2} (kN/m²) -1,2

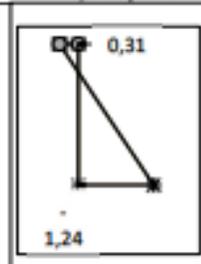
Seção R1 (kN/m²) -1,15
 Seção R2 (kN/m²) 0,22



6.4.2 Estado em Serviço g,q e poo (Quase-Permanente): Seção 1

$\sigma_{(g+q)1}$ 0,0
 σ_{poo1} 0,3
 σ_{poo2} -1,2

Seção R1 -1,24
 Seção R2 #REF!



6.5 Verificação das tensões de tração no ato da protensão e no transporte e montagem

Tensão Calculada

σ_{p1} (kN/m ²)	0,52
σ_{p2} (kN/m ²)	-2,1
σ_t (kN/m ²)	0,26
γ_1 (cm)	3,00
γ (cm)	1,50
Ft (kN)	24,3
As,sup (cm ²)	2,27
N min	6

Parâmetros Limites

Tração (kN/m ²)	0,256
Compressão (kN/m ²)	-2,500

Armadura mínima

Serão Utilizadas 6 barras de diâmetro de 7 mm

7. ELU Solicitações Normais

Ap (cm ²)	2,31
Modulo de Elasticidade (kN/cm ²)	20000
Fpyk (kN/cm ²)	148
Fpyd (kN/cm ²)	129
Fptk (kN/cm ²)	164
Fptd (kN/cm ²)	143
Epyd %	6
P _{co} (kN)	545
Pd (kN)	490
ECS (mPa)	35283
α_e	1,2
α_i	0,888
α_p	5,668
σ_{cpd} (kN/cm ²)	1
Pnd	478
E _{pd} %	10,34
σ_{pd} (kN/m ²)	134,9
Ap (cm ²)	6,74
N _{positiva}	18
Rsc (kN/m ²)	0,88
N _{negativa}	3



7. Verificação de Força cortante

bw (cm)	40
(g+q) (kN/m ²)	11,49
Vsk	40,78
Poo (kN)	544,76
Vsd	57,09
ρ_1	0,01
τ_{rd}	0,40
k	1,4685
Nsd	490,28
σ_{cpd} (mPa)	4,18
Vrd1	88,36

OK

8. Verificação de flecha

Fd,serv (kN/m ²)	9,24
Ecs (kN/cm ²)	3528,35
IC (cm ⁴)	29823,01
ai (cm)	2,90
ρ'	0,01
Mp _o (kN.cm)	3077,89
Ap _i (cm ²)	1,84
a (cm)	1,06
af (cm)	2,70
alim (cm)	2,84

$\Delta\zeta$
 α_f

2
1,55

9 Alongamento de Protensão pressão manométrica

Pi (kN)	698,41	TP	4800
Ap (cm ²)	0,39		
Pi/fio (kN/fio)	34,92		
ΔL (cm)	21,77		
Pman (mPa)	68,92		
D _{pistão} (cm)	2,54		
A _{pistão} (cm ²)	10,13		
Pman PSI	4966		