



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO COMPARATIVO DE LAJES NERVURADAS EM CONCRETO  
ARMADO E PROTENDIDO**

**ALLEF HOSTONE MORAIS DIAS**

**POMBAL – PB**

**2023**

ALLEF HOSTONE MORAIS DIAS

ESTUDO COMPARATIVO DE LAJES NERVURADAS EM CONCRETO  
ARMADO E PROTENDIDO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Unidade Acadêmica de  
Ciências e Tecnologia Ambiental da  
Universidade Federal de Campina  
Grande, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do título de  
Engenheiro Civil.

Orientador: Dr. Leovegildo Douglas  
Pereira de Souza

POMBAL – PB

2023

D541e Dias, Allef Hostone Morais.

Estudo comparativo de lajes nervuradas em concreto armado e protendido / Allef Hostone Morais Dias. – Pombal, 2023.  
39 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza”.  
Referências.

1. Laje nervurada unidirecional. 2. Laje nervurada bidirecional. 3. Concreto protendido. 4. Concreto armado. I. Souza, Leovegildo Douglas Pereira de. II. Título.

CDU 69.056.53 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

ALLEF HOSTONE MORAIS DIAS

**ESTUDO COMPARATIVO DE LAJES NERVURADAS EM CONCRETO  
ARMADO E PROTENDIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente (ALLEF HOSTONE MORAIS DIAS) **APROVADO** em 25 de junho de 2023 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande

Registre-se e publique-se.



Assinado digitalmente por LEOVEGILDO DOUGLAS  
PEREIRA DE SOUZA:08419377457  
CN=LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA:  
08419377457, OU=UFCG - Universidade Federal de Campina  
Grande, O=ICPEdu, C=BR  
Razão: Eu revisei este documento  
Localização: Pombal - PB  
Data: 2023.06.19 09:02:54 -03'00'  
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.1

Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza  
(Orientador – UFCG)

Prof<sup>ª</sup>. Me. Luiz Ricardo da Silva Linhares  
(Membro Interno – UFCG)

Prof. Daniel Torres Filho  
(Membro Externo – IFPB)

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho resulta de uma longa e árdua batalha na universidade, que ao longo de anos tem sido travada dia após dia com muito suor entre dias de estudo e conciliação com o trabalho dentre inúmeras renúncias feitas, mas sempre com apoio daqueles que sempre estiveram ali orando por meu sucesso e apoiando de todas as formas, direta ou indiretamente.

À Deus que me segura em todos os momentos e dá forças e discernimento para que eu siga adiante, onde caminho diuturnamente pelo vale da sombra e não temo nada, pois sei que ali está olhando por mim, sempre.

Em especial aos meus pais, Jezualdo e Solange que sem eles eu se quer estaria aqui, os quais me proporcionaram educação e me conduziram a um caminho correto de respeito, dignidade e fé em Deus.

À minha noiva, Ana Karine, por toda compreensão e carinho, onde estive sempre ao meu lado me ouvindo, aconselhando e incentivando a seguir tentando até conseguir conquistar o que creio ser uma valiosa etapa para o nosso futuro.

Aos inúmeros amigos que conquistei nesse período acadêmico, em especial a Widnes Robert, João Batista, Emmily Roberta, João Mateus, Joaquim Thiago, Vinícius Sousa, Ray Ramalho, Pedro Guilherme, e tantos outros que por mais que eu queira dedicar um agradecimento individual não caberiam aqui.

Aos meus mestres da graduação que me proporcionaram uma base acadêmica para eu me tornar um excelente profissional, em especial ao meu orientador Dr. Leovegildo Douglas, ao Me. Eric Mateus e ao Me. Yuri Cesarino, que me auxiliaram neste trabalho de conclusão, dedico meus sinceros agradecimentos.

Por fim, fico muito agradecido aos convidados da banca pela vontade e dedicação em contribuir com este trabalho.

*“Onde houver tração que se leve a armadura. [...] Onde houver tração que se leve a compressão ou a protensão. ”*  
*(Roberto Chust Carvalho)*

## Estudo Comparativo de Lajes Nervuradas em Concreto Protendido

*Comparative Study of Striped Concrete Slabs in Prestressed Concrete*

Allef Hostone Morais Dias, e-mail: allefmoraisdias@gmail.com

Leovegildo Douglas Pereira de Souza, e-mail: leovegildo.douglas@professor.ufcg.edu.br

---

### RESUMO

O uso de lajes maciças é algo comum no sertão da Paraíba, em especial na região de Pombal. A busca pela utilização de lajes nervuradas, isto é, sem o uso de vigotas treliçadas, apresenta uma tendência de crescimento para esta região. São sistemas de lajes a princípio maciças, mas que possuem vazios em sua paginação reduzindo o peso próprio da estrutura e criando as nervuras em uma ou duas direções. Este trabalho trata de um estudo comparativo entre o sistema estrutural de lajes nervuradas bidirecional e unidirecional em concreto armado, bem como em concreto protendido, realizando suas análises estruturais com o *software* TQS e um estudo orçamentário para efeito de comparação. Pelas análises feitas, constatou-se que, para o projeto em questão, é mais viável o sistema de laje nervurada bidirecional em concreto protendido, pois apresenta uma economia de 4,33% em relação à laje nervurada unidirecional em concreto armado, 9,31% em relação à laje nervurada unidirecional em concreto protendido e 1,61% em relação à laje nervurada bidirecional em concreto armado, além de satisfazer os critérios de deformação-limite exigidos em norma.

**Palavras-chave:** Laje nervurada unidirecional. Laje nervurada bidirecional. Concreto protendido. Concreto armado.

### ABSTRACT

The use of solid slabs is common in the hinterland of Paraíba in particular in the Pombal region, however, the search for the use of ribbed slabs, that is, without the use of trussed beams, shows a growing trend for this region, they are systems of slabs that are massive at first, but which have voids in their pagination reducing the self-weight of the structure and creating the ribs in one or two directions. This work deals with a comparative study between the structural system of bidirectional and unidirectional ribbed slabs in reinforced concrete, as well as in prestressed concrete, performing their structural analyzes with the TQS software and a budget study for comparison purposes. From the analyzes carried out, it was found that, for the design in question, the system of bidirectional ribbed slabs in prestressed concrete is more viable, since it presents a saving of 4,33% in relation to the unidirectional ribbed slab in reinforced concrete, 9,31% in relation to the unidirectional ribbed slab in prestressed concrete and 1,61% in relation to the bidirectional ribbed slab in reinforced concrete, in addition to satisfy the limit deformation criteria required by the standard.

**Keywords:** Unidirectional ribbed slab. Bidirectional ribbed slab. Prestressed concrete. Reinforced concrete.

## 1. Introdução

No Brasil há vários modelos construtivos e o que mais se destaca é o concreto armado. Semelhante a ele existe o concreto protendido, sendo os dois normatizados pela NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento), que trata de projetos de estruturas de concreto, as quais se diferenciam, dentre outros fatores, no tipo de aço empregado, e em seus procedimentos de dimensionamento, nas verificações de segurança quanto a capacidade resistente e ao desempenho em serviço e nos processos executivos.

O concreto armado possui um comportamento satisfatório quando aplicado em pilares, pode-se dizer que, em sua maioria, absorvem cargas verticais de compressão na peça, mas quando aplicado em vigas e lajes mostram algumas fragilidades, como as fissuras que aparecem devido a rigidez do concreto armado em não trabalhar bem à tração. Quando utilizado em lajes, uma tendência é aumentar a altura da mesma, e conseqüentemente a altura útil, acarretando no ganho de resistência. Contudo, essa ação aumenta o peso próprio da estrutura. As lajes são estruturas importantes para absorção direta de ações verticais, sejam elas permanentes ou variáveis transferindo-as para vigas ou pilares, mas também não deixam de influenciar nas distribuições de ações horizontais, comportando-se como diafragma rígido. Tornam-se elementos que normalmente possuem um elevado consumo de concreto, vindo a ter aproximadamente dois terços do volume total da estrutura, quando se trata de uma laje maciça, segundo França e Fusco (1997, p.05).

Segundo Carvalho e Pinheiro (2009, p.28), “[...] boa parte do concreto da laje maciça pouco contribui na resistência à flexão, pois geralmente a linha neutra tem pouca profundidade, resultando em uma grande quantidade de concreto tracionado”. Nos espaços podem ser utilizados blocos cerâmicos, de cimento, poliestireno expandido (EPS) ou até mesmo espaços vazios a fim de reduzir o seu peso próprio, como são realizadas nas lajes nervuradas unidirecional ou bidirecional.

Ao passo que surgem novos sistemas estruturais, como as lajes nervuradas citadas, a Engenharia Civil, para se adequar a determinadas características arquitetônicas, desafia-se a inovar e criar formas de fazer as estruturas de concreto armado vencer grandes vãos, objetivando atender ao estado limite de deformações excessivas sem aumentar o seu peso próprio. Para tentar solucionar este problema, surgiu o concreto protendido, em que é implementado um sistema de tensões em armaduras para comprimir o concreto e evitar que fissuras venham surgir em regiões, antes tracionadas, anulando parcialmente ou completamente a tração e a fissuração naquela região, podendo, assim, a depender do caso, reduzir a altura da seção da laje ou da viga. Uma aplicação desse sistema, por exemplo, em se tratando de lajes lisas protendidas, é possível constituir um pavimento apenas de laje e pilares, com vigas faixa para se corrigir o efeito da punção, melhorando a estética, economizando em materiais e reduzindo o peso próprio.

Este trabalho pretende apresentar uma análise entre os métodos construtivos em concreto armado para os casos de laje nervurada unidirecional e bidirecional e utilizando da mesma premissa com concreto protendido aplicado nas mesmas lajes em questão, com o intuito de encontrar a melhor opção entre elas, havendo a presença de protensão, ou não, entre os casos.

Para isso foi utilizado o projeto de uma laje nervurada bidirecional em concreto armado de uma edificação na cidade de Pombal-PB, executada conforme projeto e, a título de estudo, foram realizados outros três projetos com base na primeira, sendo eles: unidirecional em concreto armado; unidirecional em concreto protendido; e bidirecional em concreto protendido e realizadas comparações analisando seus comportamentos com o



auxílio do *software* TQS, desde a modelagem, o processamento, as análises técnicas e a obtenção de quantitativo quanto ao consumo de materiais para então serem feitos os comparativos de custo e viabilidade entre os modelos de concreto armado e protendido.

## 2. Fundamentação Teórica

Partindo do pressuposto de se ter vários tipos de lajes, serão apresentadas as lajes nervuradas unidirecionais e bidirecionais.

As lajes maciças são aquelas com a espessura totalmente preenchida com concreto – sem vazios, contendo armaduras embutidas no concreto e apoiadas ao longo de todo ou parte do perímetro (Bastos, 2019, p.69), que, segundo a NBR 6118: 2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento), define espessuras mínimas para lajes maciças de piso de 8cm quando não estiver em balanço e de 10cm quando estiver em balanço.

Lajes nervuradas podem ser pré-moldadas ou moldadas *in loco* utilizando o mesmo princípio das lajes maciças, mas que possui o diferencial de ter materiais inertes ou “vazios” no decorrer da paginação da laje, vazios estes que podem ser aplicados materiais como cubetas plásticas, que podem ser removidas posteriormente, ou EPS em locais pré-determinados em projeto fazendo com que reduzam áreas de concreto que não teriam uma função tão eficaz na estrutura e que provocariam um aumento de peso próprio na laje. Com relação às diretrizes de projeto para este tipo de laje moldada *in loco*, deve-se respeitar a NBR 6118:2014 de acordo com o item 13.2.4.2, que trata de suas dimensões e espaçamentos mínimos, a mesma norma rege também quando são dispensadas ou não as verificações da flexão da mesa e quanto ao cisalhamento das nervuras, pois elas são os principais componentes responsáveis pela resistência da peça frente às solicitações aplicadas.

A disposição das nervuras bem como de suas cargas, quando se tratar de laje pré-moldada, devem seguir conforme recomendações das normas 6118:2014, 14859-1:2002 (Laje pré-fabricada – Requisitos, Parte 1: Lajes unidirecionais) e 14859-2:2002 (Laje pré-fabricada – Requisitos, Parte 2: Lajes bidirecionais). Carvalho e Pinheiro (2009, p.42-43) recomendam a disposição das nervuras no caso de nervuras bidirecionais que a relação entre os vãos seja igual ou menor a dois; para o caso de nervuras unidirecionais são recomendadas quando um dos lados for bem maior do que o outro ou que um lado seja pelo menos duas vezes maior do que o outro.

A laje nervurada unidirecional, como pode ser vista na Figura 1, consiste em uma laje com nervuras mais longas em uma direção, com nervuras e vazios moldados normalmente através de enchimentos com EPS ou cubetas plásticas, possui altura e volume de concreto normalmente superiores se comparados com o modelo bidirecional.

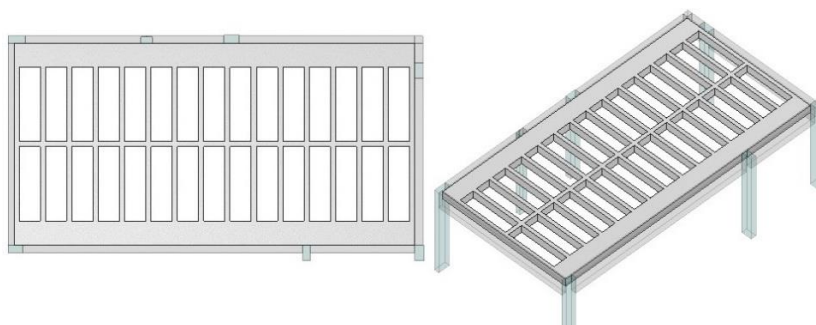


Figura 1 – Laje L8 nervurada unidirecional em planta e em perspectiva. (Fonte: AUTORIA PRÓPRIA; 2023)

A laje nervurada bidirecional, demonstrada na Figura 2, é semelhante à unidirecional diferenciando-se ao possuir comprimentos de nervuras iguais para ambas as

direções, segundo Emerick (2002, p.14), “os principais esquemas estruturais adotados atualmente para lajes protendidas são as lajes lisas, com ou sem engrossamento na região dos pilares, e as lajes nervuradas”.

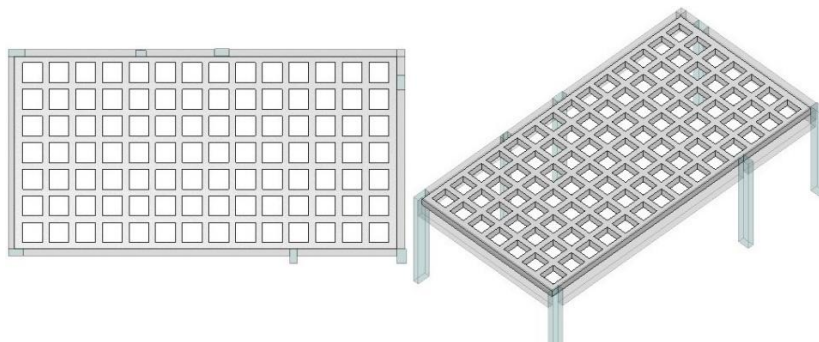


Figura 2 – Laje L8 nervurada bidirecional em planta e em perspectiva. (Fonte: AUTORIA PRÓPRIA; 2023)

Carvalho (2017, p.55) cita que a protensão pode ser aplicada para qualquer tipo de laje, embora seja mais vantajosa em lajes lisas.

## 2.1 Protensão

Como já mencionado, o concreto possui características adequadas para resistirem à compressão, porém, para compensar sua fraqueza à tração, é necessária a implementação do aço criando, assim, o concreto armado. E é exatamente para aprimorar mais este sistema que foi desenvolvido a protensão, surgindo o concreto protendido. A princípio, a protensão tem a função básica de atenuar ou eliminar as forças de tração presentes na região de um elemento através da aplicação de forças de compressão, a pesar do cabo estar tracionado, consiste então de adicionar cabos ou fios de protensão na região do concreto e adicionar, uma excentricidade em relação à linha neutra de acordo com o momento fletor da peça e então tracioná-lo para que o concreto comprima, é possível aplicar a protensão sem a excentricidade (como exemplo de peças pré-moldadas), a pesar da eficiência ser menor, mas logicamente esta é uma explanação superficial sobre o assunto.

Cauduro, em 1996, apresenta em todo o decorrer do seu artigo a protensão em diversos tipos quanto à aderência, demonstra diversas vantagens em se utilizar a protensão com monocordoalhas engraxadas, objeto em estudo, desde seus componentes até detalhes de como executar sua aplicação e materiais utilizados.

Quando ao processo executivo, a protensão pode ser aderente ou não aderente. Além disso, os cabos podem ser pré-tensionados ou pós-tensionados. Com isso, ela pode ser completa, limitada ou parcial, e podem variar também os tipos de cabos. Dado o exposto, este trabalho utilizou como material de estudo o uso de monocordoalhas engraxadas de aço CP 190 RB (relaxação baixa) de 12,7mm de diâmetro, como representado nas Figuras 3 e 4, para a aplicação da protensão nos pavimentos, uma vez que é um material bastante utilizado para projetos menores, se comparado com pontes, onde são utilizadas normalmente uma maior quantidade de cabos, assim como bitolas com diâmetros superiores, devido a magnitude dos esforços atuantes. A protensão limitada submete tensões no concreto buscando melhorar o comportamento das deformações, sendo assim não aderente, pós-tensionada e fazendo uso do modelo limitado de protensão.

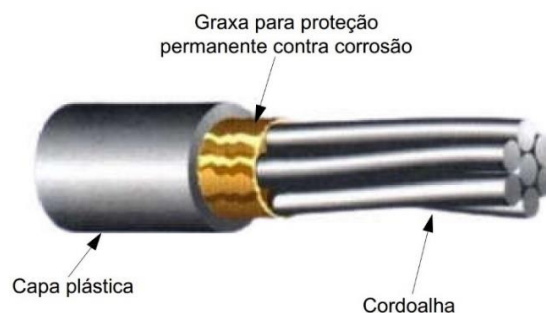


Figura 3- Composição da monocordoalha engraxada. (Fonte: ALMEIDA FILHO; 2002)

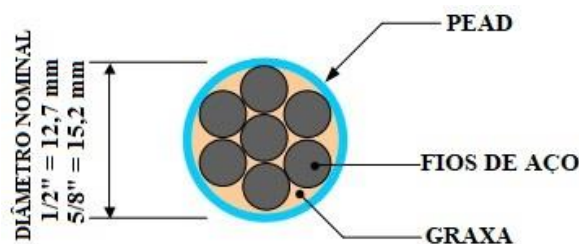


Figura 4 - Seção transversal da monocordoalha engraxada. (Fonte: EMERICK; 2002)

Bastos (2019, p.07) fala sobre o concreto protendido ser uma alternativa frente ao concreto armado.

*O Concreto Protendido pode ser uma opção ao Concreto Armado, especialmente no caso de ambientes muito agressivos, por possibilitar o projeto de peças sem fissuras, ou fissuras que possam surgir apenas sob carregamentos menos frequentes ao longo do tempo de vida útil da estrutura.*

A tabela 13.4 da NBR 6118:2014 elenca as combinações e exigências relativas à fissuração de acordo com a classe de agressividade ambiental, cuidados que quando tomados tornam a protensão uma opção ao concreto armado como dito por Bastos.

Veríssimo e César Jr. (1998, p. 37-39) e Carvalho (2017, p. 26-27) fazem uma análise dos aspectos referentes ao concreto protendido não aderente, quando apresenta certas vantagens da protensão por ter perdas baixas de atrito, permite a colocação de cabos e formas de maneira mais rápida e simples, assim como a proteção do aço contra corrosão fora da obra, eliminação da injeção da nata de cimento, antes fator primordial para a protensão aderente com o uso de bainhas, dentre outros fatores.

A NBR 7197:1989 (Projeto de estruturas de concreto protendido), filosofia a qual está presente na NBR 6118:2014, prescreve o concreto protendido sem aderência podendo ser empregado apenas em casos especiais e sempre com protensão completa, visando prevenir formações de grandes fissuras no concreto, mostrando que com o avanço dos estudos e das disponibilidades de dados experimentais, certas observações vão sendo feitas sobre as limitações em serviço e a durabilidade ao longo do tempo, isso deixa o projetista mais atento às mudanças.

O sistema de cordoalhas engraxadas possui ancoragens em que são presas às pontas das cordoalhas. O sistema de ancoragem é composto por ancoragem passiva, que é o primeiro ponto ancorado, uma estrutura fixada por processo de prensagem à cordoalha (bainha, bloco, placa de ancoragem ou forma plástica e cunha ou cap fechado) e fixada na armadura de fretagem pré-dimensionada. Essa armadura é responsável por evitar que ocorra uma ruptura no local do concreto sujeito a essas tensões aplicadas da protensão.

A ancoragem ativa é o ponto em que será aplicado o macaco hidráulico para tracionar o cabo. Nesses pontos, também são utilizados sistemas de ancoragem, mas um

pouco diferentes da ancoragem passiva, que consiste em tubo de transição, luva, bloco de ancoragem, cunha e forma plástica de proteção. Também pode ser tracionado de ambos os lados para evitar alguma perda de protensão, assim a ancoragem é feita igualmente nas pontas conforme explicado para ancoragem ativa. O macaco hidráulico é o equipamento responsável por tracionar a cordoalha a uma tensão calculada em projeto. A seguir, são mostradas as partes que compõem o sistema em estudo nas Figuras 5, 6 e 7.

Rodrigues (2015, p. 26-31) menciona as características da cordoalha engraxada que mais tem agradado os projetistas. As cordoalhas são produzidas em aço CP 190 RB (relaxação baixa), que por sua vez se torna um processo simplificado não necessitando de injeção de nata de cimento. Citando também a relaxação baixa vindo a reduzir a perda de protensão e ser mais eficaz, se comparado com a relaxação normal.

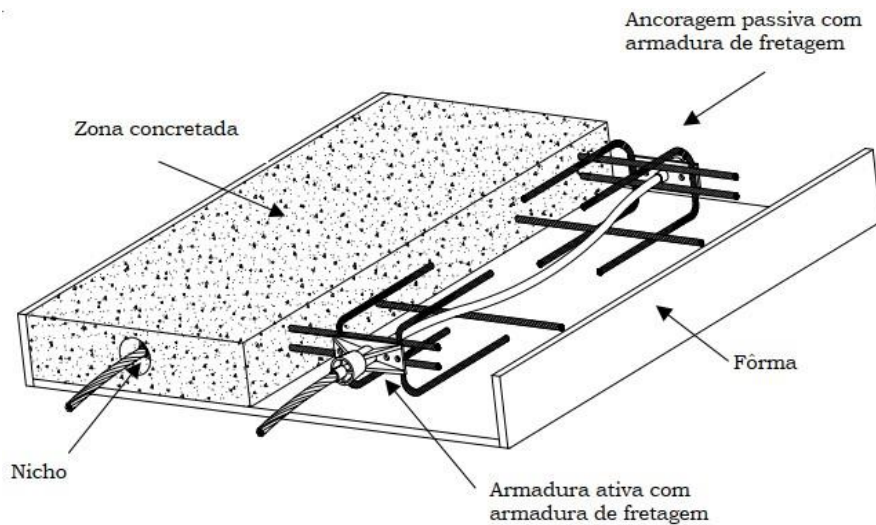


Figura 5 - Esquema simplificado de protensão não aderente (ancoragem passiva, ativa e armadura de fretagem). (Fonte: ALMEIDA FILHO; 2002)

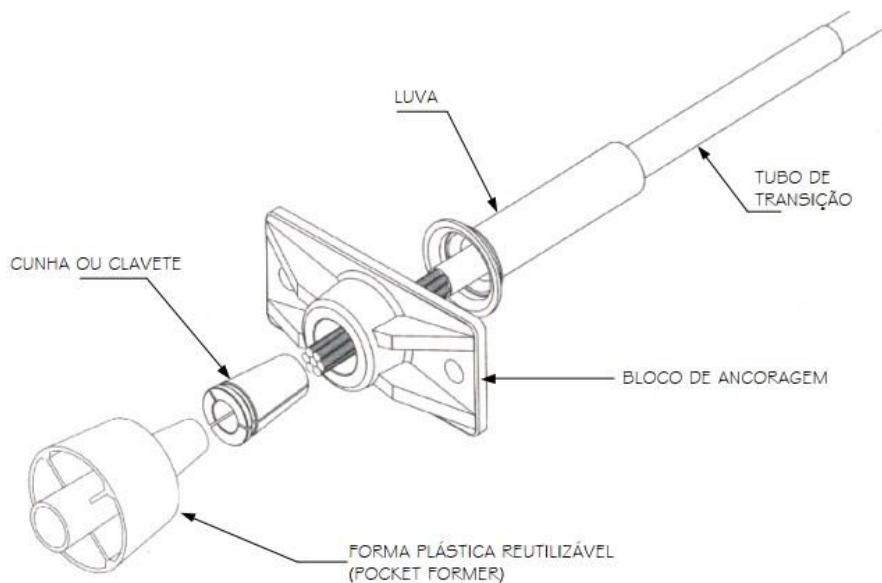


Figura 6 - Detalhe dos elementos da ancoragem ativa. (Fonte: EMERICK; 2002)

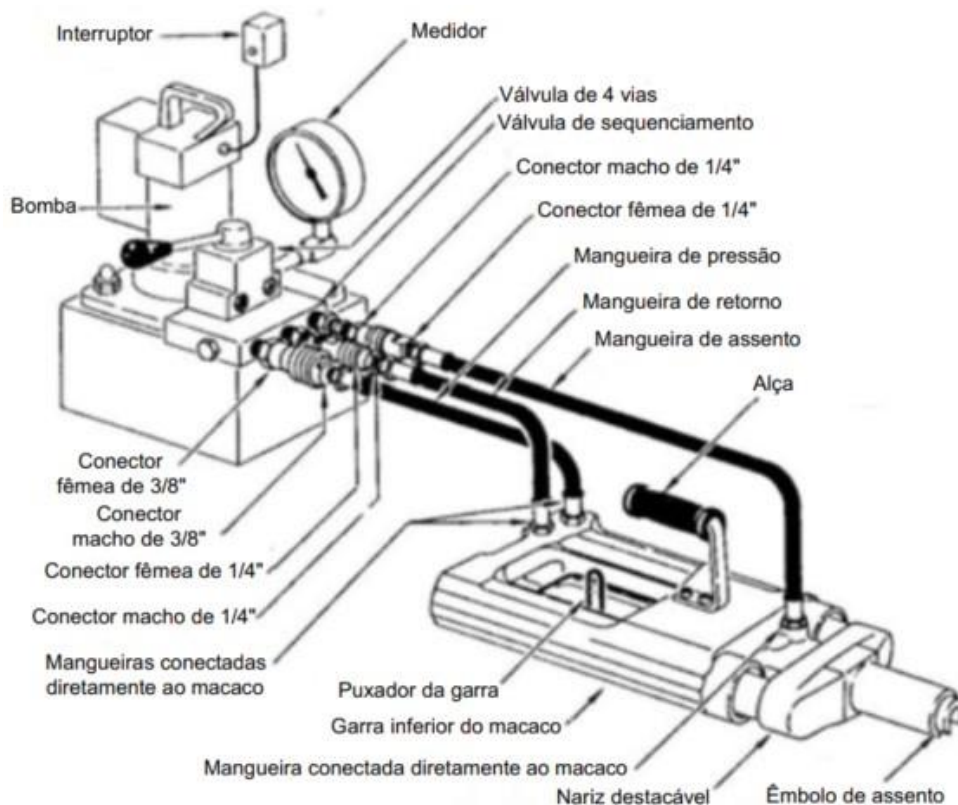


Figura 7 – Esquema de macaco hidráulico de regulação automática. (Fonte: ALMEIDA FILHO; 2002)

O *software* TQS calcula as protensões utilizando o método das cargas equivalentes. Aalami e Jurgens (2003) tratam em seu artigo sobre balanceamento de cargas no pavimento através das protensões, consistindo em um conjunto equilibrado de forças, exercendo no concreto cargas equivalentes de protensão. As cargas equivalentes são consideradas como um carregamento externo aplicado à estrutura de concreto constituindo assim um traçado de cabos. Em um primeiro momento, para combater as cargas verticais uniformemente distribuídas e, em um segundo momento, para combater as cargas concentradas aplicadas através das ancoragens, cargas correspondentes às forças de pré-compressão pelas forças horizontais.

O projeto utiliza disposições para uma protensão limitada, ou seja, a peça protendida irá comprimir possibilitando ainda uma parcela de flexão ao longo do tempo. Como consequência, a estrutura possui menores deformações, pois a protensão equilibra boa parcela de carregamento da estrutura vindo a reduzir deslocamentos finais. Com isso, o elemento em concreto protendido pode vir a ser mais leve do que o concreto armado, pela possibilidade de redução de material, ficando assim mais esbelto.

Porém, como o concreto protendido não deixa de ser também armado, ele acarreta as desvantagens que o concreto armado fornece como o fato de precisar de escoras e o tempo de cura necessário para o concreto. Outro fator é que devido as lajes protendidas serem menos espessas, a necessidade de possuírem uma maior condutibilidade de som e de calor, mas o maior e o principal problema do concreto protendido atualmente é a falta de mão de obra adequada e a acessibilidade de materiais em determinadas regiões do país como a região de Pombal-PB.

Podemos explicar o comportamento do concreto protendido através da visualização do diagrama de corpo livre de uma viga de concreto bi apoiada, conforme a Figura 8, considerando o cabo de protensão, a parte e verificar o que acontece posteriormente com a ação e reação do conjunto.

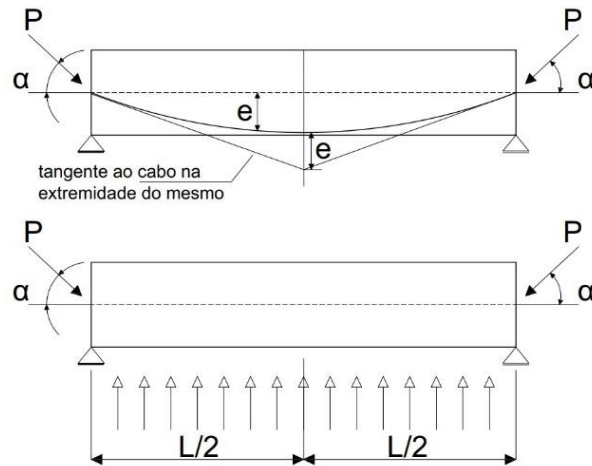


Figura 8 - Efeito da protensão de cabo curvo através de uma ação equivalente. (Fonte: CARVALHO; 2017)

O diagrama de momento fletor da viga produz uma parábola voltada para cima apresentando um momento fletor positivo e uma flexão vindo a fissurar o concreto. Logo, o cabo de protensão traçado em cima do diagrama de momento da viga de concreto com uma excentricidade tal que ao tracionar a uma força  $P$  provocará uma compressão na peça nas regiões fletidas e uma força contrária à flexão com uma tendência a manter a peça equilibrada, bem como suas cargas, como pode ser explicado melhor na Figura 9.

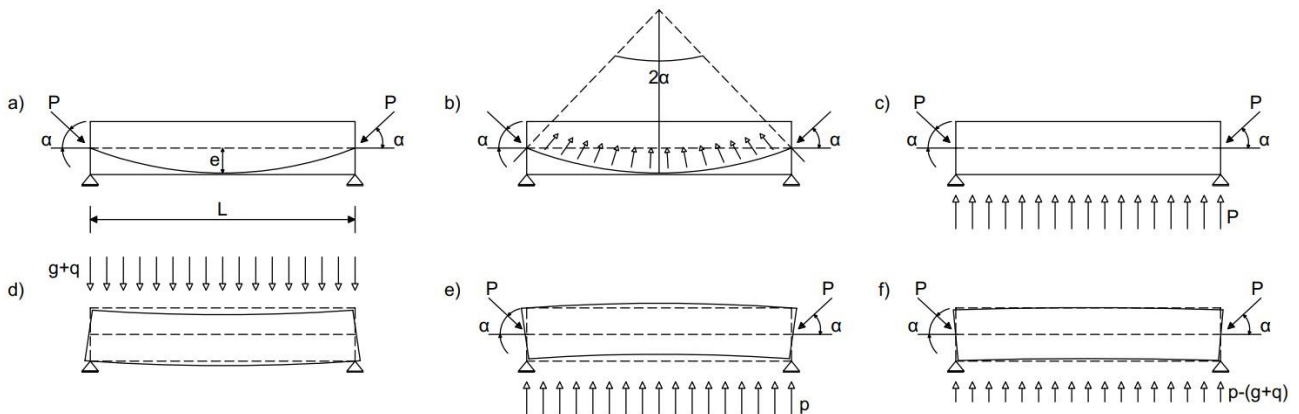


Figura 9 - Consideração do carregamento equivalente up que traduz o efeito fa flexão da protensão: a) cabo de protensão parabólico; b) efeito da ação do cabo no concreto; c) substituição do efeito do cabo na viga; d) deformação provocada na viga por g e q; e) deformação devido o efeito da protensão; e f) deformação final g + q e protensão (p). (Fonte: CARVALHO; 2017)

A protensão consiste, portanto, em reforçar o concreto armado, visto que primariamente se tem todo um escopo montado onde há uma armadura, que neste caso é chamada de passiva, pois ela começará a ser tracionada após a retirada das escoras e quando o concreto atingir o seu limite de resistência à tração e precisar flexionar; diferentemente da armadura de protensão, chamada de ativa, a qual começa a atuar antes de retirar as escoras, antes de o concreto receber as cargas de tração em suas fibras, é exatamente para isso que se adiciona a protensão na estrutura, para poder vencer essa solicitação de flexão e o surgimento de fissuras no concreto.

A respeito do concreto protendido, deve-se atentar à classe de agressividade ambiental, para este trabalho em questão, temos uma classe de agressividade ambiental II. Para o concreto armado, pode-se utilizar no mínimo a classe C25 ( $f_{ck} = 25MPa$ ), mas quando se utiliza o concreto protendido nas mesmas circunstâncias é possível notar que na tabela 7.1 da NBR 6118:2014 recomenda que o concreto seja de no mínimo classe

C30 ( $f_{ck} = 30MPa$ ), porém, por um fator de segurança, foi adotado C35 ( $f_{ck} = 35MPa$ ) por possuir mais resistência do que o C30 e ser mais acessível do que o C40 na região.

Um item indispensável no estudo de protensão são as perdas de forças nos cabos. Através de muitas formas, é possível verificar limites de tensões que o concreto ou o aço em estudo podem suportar através do subitem 9.6.3 da NBR 6118:2014 que fala das perdas de protensão, explicados mais à frente.

Menegatti (2004, p.30), ao falar em carregamento externo, mostra que Lin (1955) sugeriu que a força de protensão fosse representada como um conjunto de carregamentos, a fim de se obter um balanceamento nos carregamentos atuantes, pois esta consideração de força de protensão constante não compromete as análises usuais. Este método é conhecido nos Estados Unidos como “*Load-Balancing Model*”. Skaf e Stucchi (1995 *apud* Dornelles 2009), buscando aperfeiçoar o método que Lin apresentou naquele mesmo ano, procurando representar as perdas de protensão ao longo dos cabos, sugerem uma proposta de discretização dos carregamentos em trechos constantes, permitindo ainda a representação de cabos de estruturas hiperestáticas nas mudanças de trajetória dos cabos.

Carvalho (2017, p. 138) diz que “Ao se efetuar a protensão da armadura, não se consegue um esforço constante ao longo da mesma. Vários fatores, entre os quais as técnicas de protensão, influem no esforço efetivo de protensão em cada seção”.

Portanto, para verificarmos tais condições citadas, precisamos conhecer ao menos os principais esforços de perdas de protensão atuantes ao longo do elemento em estudo. De antemão, a NBR 6118:2014 nos fornece em seu item 9.6.1.3 (valores representativos da força de protensão), que o valor característico da força de protensão pode ser utilizado com 0,95 ou 1,05 levando em conta a impossibilidade de prever com precisão as perdas de protensão, de acordo com Carvalho (2017, p. 138).

*As diminuições do esforço de protensão que ocorrem ao longo dos cabos são normalmente chamadas de perdas e podem ser classificadas de imediatas e diferidas ou ao longo do tempo. As primeiras são devido principalmente à forma como se procede a protensão e das propriedades elásticas do aço e do concreto. As perdas diferidas ou ao longo do tempo se devem às propriedades visco elásticas tanto do concreto como do aço.*

Tomando como base a pós-tração sem aderência, as principais perdas de protensão iniciais ou imediatas são:

- Perda por atrito cabo-bainha:  
A princípio, o cabo pode ser tracionado em suas duas extremidades ou apenas em uma delas, a escolha será do projetista de acordo com seus cálculos, consideradas todas as perdas e que ao final o cabo terá atingido o valor de tensão adequado em projeto. No caso das cordoalhas engraxadas, a perda por atrito cabo-bainha ainda ocorre mesmo amenizadas pela graxa, podemos encontrar perdas parasitárias neste sentido do cabo-bainha através das ondulações que o cabo deverá fazer em seu traçado. Para facilitar os cálculos de coeficientes de atrito cabo-bainha, no item 9.6.3.3.2.2 da NBR 6118:2014 taxa o coeficiente de atrito aparente para perdas parasitárias;
- Perda por deformação da ancoragem:  
Tais perdas devem ser separadas nos casos de pré-tração e pós-tração, pois na primeira a tensão é constante e na segunda é variável, devido ao atrito. Nos atendo ao caso de pós-tração, tem-se uma característica que é um pequeno retrocesso ou deslocamento efetivo do cabo-ancoragem provocando uma certa queda de tensão;

- Perda por deformação imediata do concreto:  
Este tipo de perda difere na pré-tensão e na pós-tensão, no tocante a pós-tensão, após a aplicação da tensão na armadura de protensão, o concreto irá sofrer um encurtamento ou uma deformação elástica imediata, caso esteja trabalhando com apenas um único cabo não haverá tal perda, porém, se estiver trabalhando com, por exemplo, 3 (três) cabos e tensionando-os um após o outro, ao tensionar o primeiro e quando tensionar o segundo, já existirá uma certa perda no anterior e quando tensionar o terceiro acontecerá como no anterior, haverá uma certa perda para o segundo cabo também e assim ocorreria com  $n$  cabos já ancorados. Com isso, deve-se ponderar um valor médio para o alongamento dos cabos ou ainda sobretensioná-los, para que ao final do trabalho de tensionamento dos cabos, todos tenham a mesma força de protensão e tentar amenizar ao máximo a perda.

De maneira análoga às perdas de protensão imediatas, as perdas progressivas também ocorrem tanto no concreto como no aço e tais perdas permanecem ocorrendo ao longo do tempo, pois as características elásticas e mecânicas do aço e do concreto variam conforme o tempo passa ou por variação de esforços, principalmente se sujeitas a cargas extras não consideradas em projeto.

Ainda em se tratando de pós-tração, as perdas de protensão ao longo do tempo, diferidas ou progressivas, são:

- Perdas por retração do concreto:  
A retração do concreto, de maneira simplista, é a perda de volume do concreto através da perda da água após o seu endurecimento. Atuando diretamente neste caso, estão a temperatura e umidade do ambiente, fenômeno este que começa a ocorrer desde o início do lançamento do concreto. O volume de água que sai do concreto é aquele que não reagiu com o concreto atuando para o seu endurecimento, ou seja, é o excesso de água. Deve-se entender também que o concreto é poroso e outras propriedades devem ser vistas quanto à permeabilidade, saída da água. Deve-se analisar a perda da protensão após o início do fenômeno de retração e assim analisar a queda da tensão;
- Perdas por fluência do concreto:  
A fluência do concreto se dá com o aumento da deformação de encurtamento da peça como consequência das ações permanentes de compressão ou de flexão impostas ao longo do tempo. Exemplificando melhor a respeito de vigas e lajes: a fluência é responsável pela flecha diferida que ocorre após a flecha imediata que existem nas peças de concreto.  
Segundo Souza e Migliore Jr. (2021, p. 70), “A fluência é iniciada após a aplicação do carregamento e seus efeitos são minimizados após cerca de 20 (vinte) anos”;
- Perda por relaxação do aço de protensão:  
Tal perda se dá pela redução da intensidade de tensão necessária para manter o aço de protensão alongado, de maneira pré-determinada em projeto, ao longo do tempo. A perda por relaxação pode ser chamada de pura ou variável. Quando pura, diz-se que o alongamento foi mantido constante, a perda por relaxação depende diretamente da intensidade da tensão imposta na armadura em questão.



Segundo Souza e Migliore Jr. (2021, p. 70) “A relaxação é iniciada após o alongamento do aço e seus efeitos são minimizados após cerca de 30 (trinta) anos”.

Vale ressaltar que valores obtidos para perdas progressivas não dependem se forem oriundos de modelo de pré-tração ou pós-tração, aderente ou não aderente; consideram-se os efeitos reológicos do concreto após todo o processo de protensão e efeitos imediatos impostos no elemento estrutural. Em relação às cordoalhas engraxadas, segundo Carvalho (2017, p.167), “no caso de cordoalhas engraxadas, as perdas seriam calculadas para a seção da ancoragem e a favor da segurança considerada a mesma para as demais seções”.

### 3. Metodologia

Foram realizados os procedimentos descritos na Figura 10 para análise e comparação dos modelos em estudo e obtenção dos resultados.

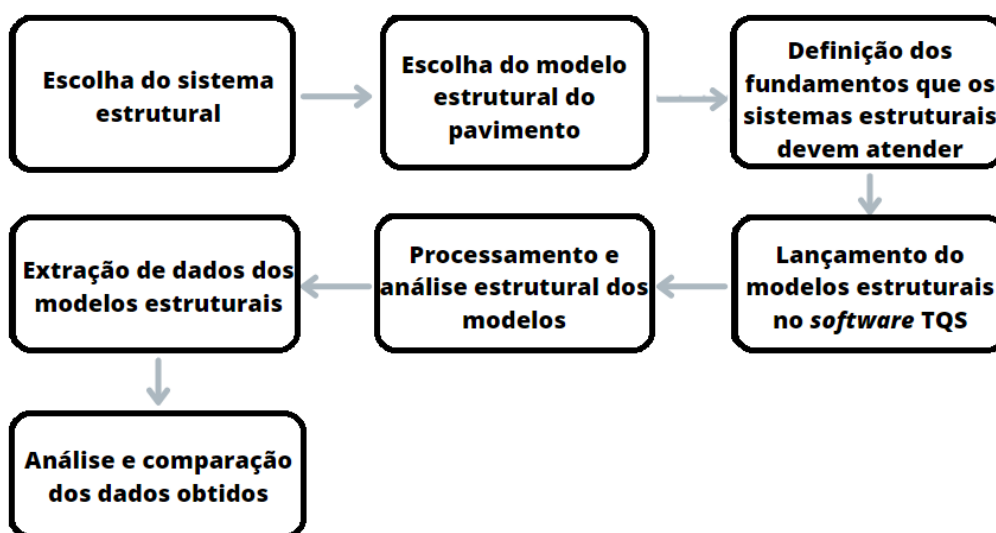


Figura 10 – Sequência de procedimentos realizados no estudo. (Fonte: Autoria própria; 2023)

Os sistemas estruturais a serem analisados em estudo são:

- Laje Nervurada Unidirecional (LNU): um sistema de laje com nervuras em uma direção principal, em concreto armado e protendido;
- Laje Nervurada Bidirecional (LNB): um sistema de laje com nervuras em duas direções, em concreto armado e protendido.

Após a identificação dos sistemas estruturais a serem estudados, foram ajustados os critérios de projeto do edifício no *software* TQS e o presente trabalho se baseia em um projeto, focando em um dos pavimentos da edificação, alvo do estudo de caso, projeto este executado na cidade de Pombal-PB. Trata-se de um pavimento de com área de 433,51m<sup>2</sup>, Figura 11, o qual se encontra a uma altura de 3m do solo. A classe de edificação foi A, pois a maior dimensão é menor que 20m, de acordo com a NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações)

Foi considerada uma velocidade básica de 30m/s, o fator topográfico do terreno é 1,00, a rugosidade se enquadra na categoria III (como terrenos planos ou ondulados, muros, árvores, edificações baixas, fazendas, subúrbios com casas baixas), utilizou-se uma taxa de 1,00 e uma Classe II de agressividade ambiental. Um resumo de critérios para execução do projeto no TQS se encontra no Quadro 1.



Critérios	Sistema em Concreto Armado		Sistema em Concreto Protendido	
Área	433,51m <sup>2</sup>		433,51m <sup>2</sup>	
Modelo Estrutural do Edifício	Modelo VI		Modelo VI	
Classe do Concreto	C35		C35	
Classe de Agressividade Ambiental	II		II	
Cobrimento	Conforme NBR 6118:2014		Conforme NBR 6118:2014	
Cargas de Vento	V0	30m/s	V0	30m/s
	S1	1,00	S1	1,00
	S2	III-A	S2	III-A
	S3	1,00	S3	1,00
Coeficiente de Arrasto	90°	2,409	90°	2,409
	270°		270°	
	0°	2,239	0°	2,239
	180°		180°	
Critério de Protensão	-		Não aderente	
Bitola do Aço de Protensão	-		12,7mm	
Tipo de Aço de Protensão	-		CP190 RB	

Quadro 1 – Critérios utilizados para execução do projeto. Fonte: (Autoria própria, 2023)

Por exigência estética arquitetônica, neste caso, as lajes deveriam ser nervuradas e como critérios estruturais, a fim de atender à arquitetura. Determinados vãos não poderiam ter pilares, portanto, foram utilizadas vigas T para atender aos requisitos mínimos de deformação, quando aplicada a protensão, reduziu-se a área da mesa a fim de reduzir o consumo de concreto e aço passivo.

Assumida a Classe II de agressividade ambiental, foram utilizados os valores de cobrimentos de norma, Tabela 7.2 da NBR 6118:2014, 2,5cm para lajes, 3,0cm para vigas e 3cm para peças protendidas. Quanto à protensão, foi utilizado o sistema não aderente de protensão limitada, seguindo recomendações da tabela 13.4 da NBR 6118:2014, com monocordoalhas engraxadas CP 190 RB (Relaxação Baixa), com 12,7mm de diâmetro, placas de ancoragem com 6cm de largura, 13cm de altura e um espaçamento de 7cm entre as placas.

Quanto ao concreto, foi optado por utilizar de classe C35 ( $f_{ck} = 35MPa$ ). O projeto foi modelado no *software* TQS e consideradas as cargas permanentes e acidentais para edifícios comerciais, de acordo com a NBR 6120:2019 (Ações para o cálculo de estruturas de edificações), sendo de 0,2 tf/m<sup>2</sup> e 0,3tf/m<sup>2</sup> respectivamente. Não foram consideradas alvenarias sobre as lajes, para fins de cálculo, apenas alguns presentes em vigas, conforme o arquitetônico.

Após todos os critérios e parâmetros definidos no *software* TQS, foi lançado o modelo estrutural a fim de conceber primeiramente em concreto armado, assim foram realizados os pavimentos em laje nervurada unidirecional e bidirecional, obtidos todos os dados em tabela, de aço, concreto e formas necessárias para a concepção do projeto; em um segundo momento, foram alterados os critérios para modelagem em concreto protendido. O *software* trata das lajes protendidas como uma ferramenta à parte que funciona como um módulo, mas que ao mesmo tempo funciona de maneira integrada após serem incorporadas todas as alterações feitas ao modelo estrutural, dentro do módulo de lajes protendidas. Para iniciar a modelagem, foi escolhido o Modelo VI para protensão, modelo este que trabalha de forma integrada em seu pórtico, sendo possível realizar análises tridimensionais de grelha, realizando verificações para as combinações quase-permanente, frequente e ato de protensão, atendendo às expectativas para estruturas protendidas.

A protensão foi realizada em regiões que demonstravam maiores deformações, como vãos que chegavam a 8,06m para as vigas e de 8,55m para lajes, que, respeitando

a tabela 13.2 da NBR 6118:2014, podem chegar a deslocamentos-limite de 3,22cm e 2,30cm, respectivamente. Foram verificados as grelhas e os deslocamentos verticais de acordo com as combinações em ELS e ELU, e ao final, atendendo aos deslocamentos previstos em norma, são obtidos os resultados para as análises e comparações.

Em concreto armado, fazem-se dimensionamentos no estado limite último e verifica-se no estado limite de serviço; em concreto protendido, faz-se a quantificação das armaduras de protensão em estado limite de serviço e verifica-se a armadura ativa em estado limite último, porém é necessário complementar a armadura ativa com uma armadura passiva efetivamente calculada para equilibrar a resultante de compressão, ou se no caso de a armadura ativa já ser superior à resultante de compressão, é necessário adicionar uma armadura mínima passiva na peça estrutural. Para as vigas protendidas, foi utilizado o VPro do TQS, porém, no tocante a armadura passiva, aplicada não somente para vigas, mas também para as lajes. Dita a NBR 7197:1989 no item 9.5.3.4 que deve ser prevista uma armadura passiva mínima com taxa geométrica não inferior a 0,05%, devendo ser aumentada de acordo com a protensão e utilizando a expressão:

$$\rho_s = 0,15 - 0,50\rho_p \quad (3)$$

Onde,

$\rho_s$  = Taxa de armadura passiva (%);

$\rho_p$  = Taxa de armadura ativa (%).

É também recomendado pela NBR 6118:2014 no item 20.3.2.6 prescindindo o uso de armaduras passivas quanto ao colapso progressivo nas situações em que pelo menos um cabo atravessar o interior da armadura longitudinal do pilar em cada direção ortogonal, mas não isenta o uso de armadura mínima em nenhum outro caso.

## 4. Resultados e Discussões

Neste tópico são apresentadas as plantas de fôrma do pavimento, contemplando todas as quatro combinações de estudo: laje nervurada unidirecional e bidirecional, ambas em concreto armado, e laje nervurada unidirecional e bidirecional, ambas em concreto protendido. Não foram levados em consideração os materiais necessários para pilares. Foram obtidos todos os dados necessário para se executarem as lajes e vigas, como os quantitativos de aço, concreto e fôrmas, por m<sup>3</sup> e m<sup>2</sup>, bem como os valores de flechas e deslocamentos verticais máximos verificados em ELS, as combinações e análises em ELU foram feitas a título de verificação de resistências e capacidades.

### 4.1 Laje Nervurada Unidirecional em Concreto Armado

Neste modelo de laje, representado na Figura 14, em concreto armado, foi adotada uma altura de 31cm, contabilizado já com uma capa de 5cm, cubetas plásticas PavPlus de 61 x 183cm da Impacto, altura de 26cm, dimensões da nervura de 7cm inferior, 11,5cm médio e 16cm superior, moldes reutilizáveis, os quais representam um volume unitário de 0,221m<sup>3</sup>, volume este que seria preenchido de concreto se fosse uma laje maciça, chegando a uma economia neste aspecto. Para a contabilização total de cubetas, na Tabela 5, foi feita entre cubetas inteiras e meias cubetas.

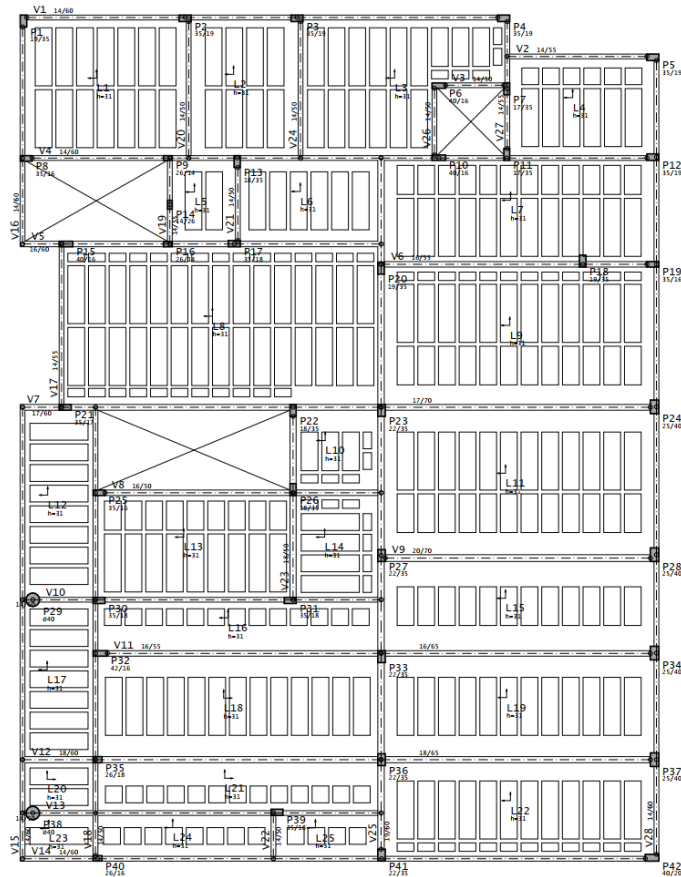


Figura 14 – Planta de fôrma do sistema de laje nervurada unidirecional em concreto armado no TQS. (Fonte: Autoria própria; 2023)

O modelo não apresentou dificuldades sérias, valores elevados de deformações ou esforços que não atendam as verificações de capacidade resistente e desempenho em serviço, apenas ajustes nas larguras das mesas das vigas T para que fossem satisfeitas as exigências de deslocamento-limite impostas pela norma e que ficaram dentro das exigências de ELU e ELS utilizando de suas respectivas combinações de análise contemplados na tabela 13.4 da NBR 6118:2014 e seus referidos deslocamentos máximos, de modo análogo, foi feita a verificação para as lajes em seus maiores vãos e foram satisfeitas as exigências em seus máximos deslocamentos verticais, dados representados no Quadro 2.

	Combinação	Deslocamento	
		Laje	Viga
ELS	Frequente / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,6xCargas Acidentais + 0,3xVento	-1,26cm	-1,09cm
ELS	Quase Permanente / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,6xCargas Acidentais	-1,26cm	-1,09cm
ELU	Todas as Acidentais Combinadas / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,8xCargas Acidentais + Vento	-1,31cm	-1,14cm
ELU	Permanentes e Acidentais Combinadas / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,8xCargas Acidentais	-1,31cm	-1,14cm

Quadro 2 – Combinações de ELU e ELS para as lajes e vigas T do sistema de lajes nervuradas unidirecional em concreto armado. Fonte: (Autoria própria, 2023)

Após análise da grelha e seus deslocamentos, foi extraído o quantitativo de materiais, representado na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantitativo de materiais para o sistema de Laje Nervurada Unidirecional.

Materiais		Lajes	Vigas	Total	Total (/m <sup>2</sup> )
Aço CA50/CA60	(kg)	3843,00	1726,00	5569,00	12,84
Concreto	(m <sup>3</sup> )	67,49	23,19	90,68	0,21
Fôrma	(m <sup>2</sup> )	-	215,90	215,90	0,50
Cubetas	(unid)	289,00	-	289,00	0,67

Fonte: Autoria própria, 2023

#### 4.2 Laje Nervurada Bidirecional em Concreto Armado

No sistema bidirecional, como mostra a Figura 15, em concreto armado, foi verificado que uma altura de laje de 26cm satisfaz as necessidades de projeto no tocante às deformações, tendo em vista que o sistema de vigas permaneceu igual. Esta altura já contabiliza uma capa de 6cm; foram utilizadas cubetas plásticas PavPlus de 61 x 61cm da Impacto, altura de 20cm, dimensões da nervura de 12,5cm inferior, 16cm médio e 19,5cm superior, moldes reutilizáveis, os quais representam um volume unitário de 0,041m<sup>3</sup>, o qual seria preenchido de concreto se fosse uma laje maciça, chegando a uma economia neste aspecto. A contabilização total de cubetas, na Tabela 6, foi feita entre cubetas inteiras e meias cubetas.

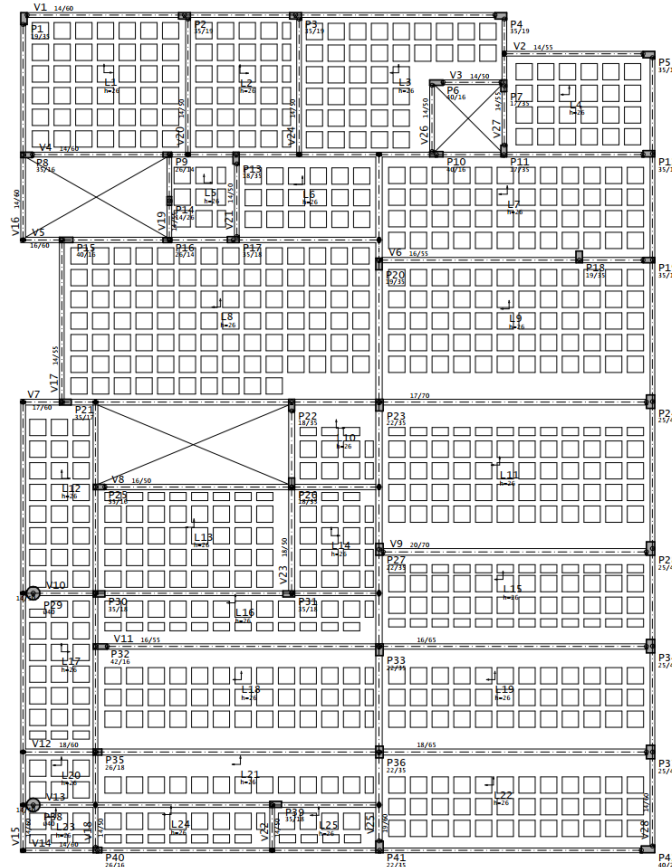


Figura 15 – Planta de fôrma do sistema de laje nervurada bidirecional em concreto armado no TQS. (Fonte: Autoria própria; 2023)

Apesar de que o modelo estrutural de vigas tenha permanecido, os deslocamentos verticais não permaneceram os mesmos, visto que foi reduzida a altura da laje. Verificou-se que ficaram dentro das exigências, em seus máximos deslocamentos verticais em ELU

e ELS. Foi feita também a verificação para as lajes, que ficaram dentro das exigências em ELU e ELS, conforme apresentado no Quadro 3.

	Combinação	Deslocamento	
		Laje	Viga
ELS	Frequente / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,6xCargas Acidentais + 0,3xVento	-1,17cm	-1,02cm
ELS	Quase Permanente / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,6xCargas Acidentais	-1,17cm	-1,02cm
ELU	Todas as Acidentais Combinadas / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,8xCargas Acidentais + Vento	-1,19cm	-1,03cm
ELU	Permanentes e Acidentais Combinadas / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,8xCargas Acidentais	-1,19cm	-1,03cm

Quadro 3 – Combinações de ELU e ELS para as lajes e vigas T do sistema de lajes nervuradas bidirecional em concreto armado. Fonte: (Autoria própria, 2023)

Após análise da grelha e seus deslocamentos, foi extraído o quantitativo de materiais, representados na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantitativo de materiais para o sistema de Laje Nervurada Bidirecional.

Materiais		Lajes	Vigas	Total	Total (/m <sup>2</sup> )
Aço CA50/CA60	(kg)	3403,00	1690,00	5093,00	11,75
Concreto	(m <sup>3</sup> )	67,75	23,19	90,94	0,21
Fôrma	(m <sup>2</sup> )	-	235,76	235,76	0,54
Cubetas	(unid)	671,00	-	671,00	1,54

Fonte: Autoria própria, 2023

### 4.3 Laje Nervurada Unidirecional Protendida

Este modelo replicou a maioria das vigas com exceção das vigas em T do sistema unidirecional em concreto armado. Foram modificadas a fim de protendê-las, ou seja, foram removidas as mesas, tornando-se vigas comuns protendidas. O módulo VPro do TQS se mostrou muito prático, pois, ao passo que eram modelados os cabos, podiam ser manipuladas as excentricidades em pontos específicos e verificando as combinações em ELS quase permanentes, frequentes e ato de protensão, bem como as áreas de aço passivo necessárias em cada região. Ao final da modelagem quando os cálculos são atendidos, podem-se ver o traçado e os cortes transversais de todas as seções necessárias juntamente com as distâncias das excentricidades dos cabos mostrando a não interferências entre eles e a fluidez do trabalho. As alturas das lajes permaneceram as mesmas do sistema unidirecional em concreto armado (31cm), o modelo de disposição das cubetas sofreu mínimas alterações a fim de uma melhor compatibilização com as vigas protendidas adjacentes, mantendo o escopo do projeto em concreto armado, conforme pode ser visto nas Figuras 16, 17 e 18.

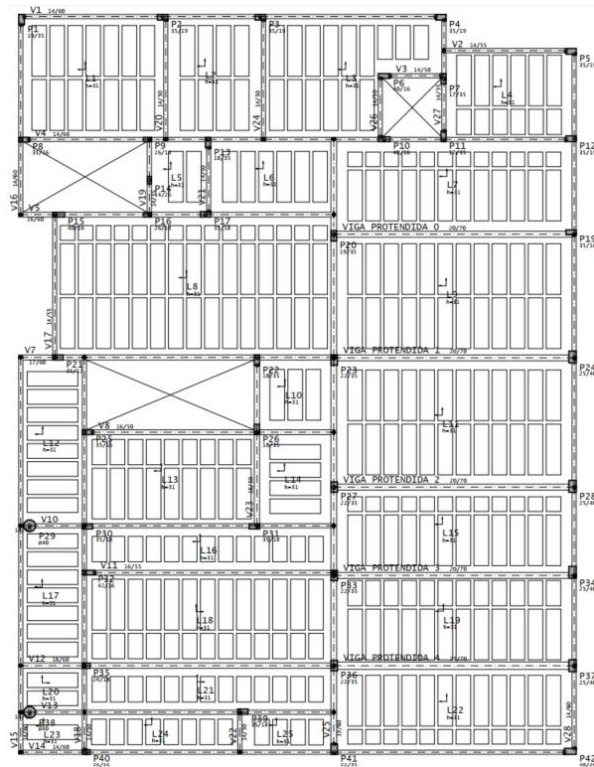


Figura 16 – Planta de fôrma do sistema de laje nervurada unidirecional protendida no TQS. (Fonte: Autoria própria; 2023)

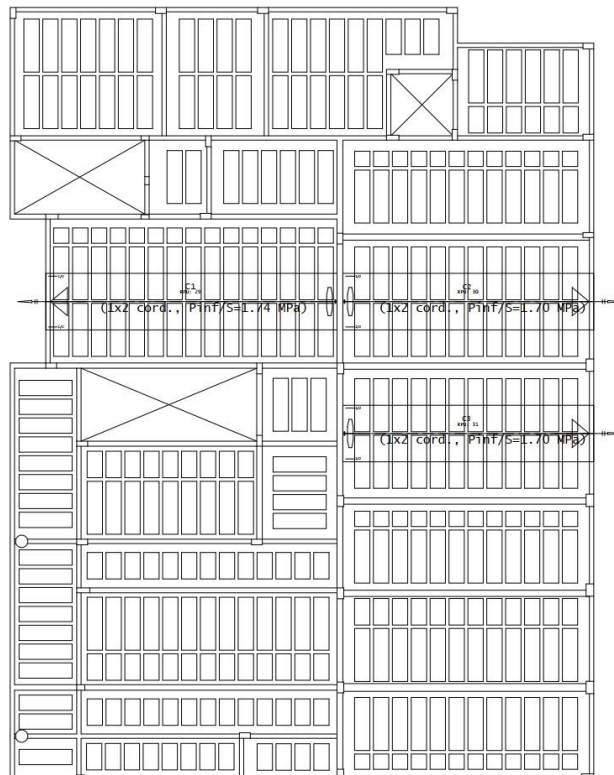


Figura 17 – Traçado de RPU horizontais e distribuição de cabos do sistema de laje nervurada unidirecional protendida no TQS. (Fonte: Autoria própria; 2023)



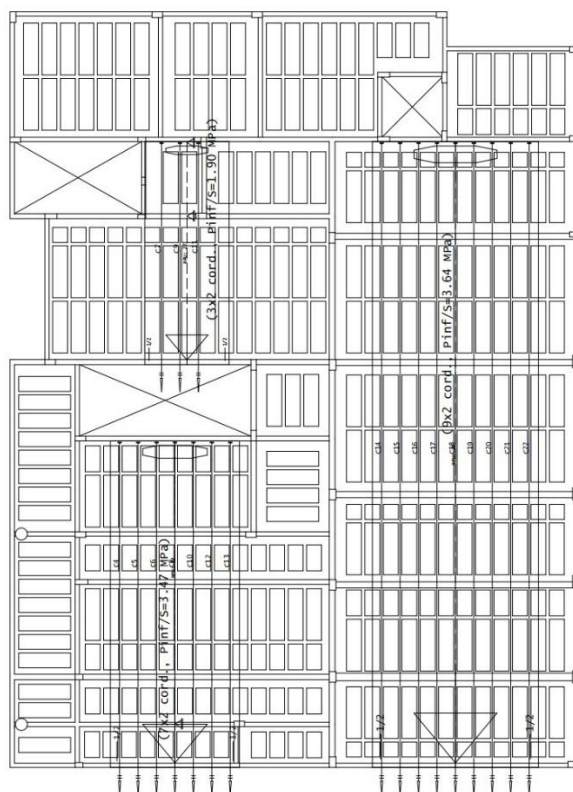


Figura 18 – Traçado de RPUs verticais e distribuição de cabos do sistema de laje nervurada unidirecional protendida no TQS. (Fonte: Autoria própria; 2023)

Como mencionado, algumas vigas T foram modificadas para vigas comuns protendidas e foi possível notar, no visualizador de grelhas do TQS, o comportamento na distribuição de cargas verticais e as concentrações dos deslocamentos no ELU e ELS e suas respectivas combinações de análise, descritas no Quadro 2, lembrando que os critérios de aceitabilidade sensorial de deslocamento-limite e os dados para análise seguem idênticos ao mesmo sistema unidirecional em concreto armado.

As lajes, como mencionado, não tiveram alterações no tocante ao sistema unidirecional em concreto armado, foi visto em sua análise de grelha em ELU e ELS nas combinações descritas no Quadro 4.

	Combinação	Deslocamento	
		Laje	Viga
ELS	Frequente / Peso Próprio + Sobrecarga + Hiperestático + 0,6xCargas Acidentais + 0,3xVento	-0,31cm	-0,31cm
ELS	Quase Permanente / Peso Próprio + Sobrecarga + Hiperestático + 0,6xCargas Acidentais	-0,31cm	-0,31cm
ELU	Todas as Acidentais Combinadas / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,86xHiperestático + Cargas Acidentais + 0,6xVento	-0,75cm	-0,67cm
ELU	Permanentes e Acidentais Combinadas / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,86xHiperestático + Cargas Acidentais	-0,74cm	-0,67cm

Quadro 4 – Combinações de ELU e ELS para as lajes e vigas protendidas do sistema de lajes nervuradas unidirecional em concreto protendido. Fonte: (Autoria própria, 2023)

Quando se aplica a protensão nos elementos estruturais, surge o hiperestático de protensão e um fator de forças de alívio presentes nas combinações, sendo possível analisar no visualizador de grelhas tanto para as vigas como para as lajes. Portanto, foi verificado o hiperestático atuando no deslocamento em sentido contrário ao deslocamento

verificado anteriormente, de peso próprio, sobrecarga e cargas acidentais, chegando a um deslocamento de 0,89cm. Da mesma forma as forças de alívio de protensão apresentaram um deslocamento de 0,88cm, ambos em ELU. Já em ELS tiveram para o hiperestático e para as forças de alívio de protensão 0,49cm e 0,49cm, respectivamente, são deslocamentos positivos que combatem os deslocamentos negativos demonstrados na Figura 9.

Após análise da grelha e seus deslocamentos, foi extraído o quantitativo de materiais representados na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantitativo de materiais para o sistema de Laje Nervurada Unidirecional Protendido.

Materiais		Lajes	Vigas	Total	Total (m <sup>2</sup> )
Aço CA50/CA60	(kg)	3073,00	1595,00	4668,00	10,77
Aço CP190 RB	(kg)	6000,00	348,70	948,70	2,19
Concreto	(m <sup>3</sup> )	59,60	24,52	84,12	0,19
Fôrma	(m <sup>2</sup> )	-	221,32	221,32	0,51
Cubetas	(unid)	353,00	-	353,00	0,81

Fonte: Autoria própria, 2023

#### 4.4 Laje Nervurada Bidirecional Protendida

De maneira análoga aos procedimentos realizados no pavimento unidirecional do modelo em concreto protendido para com o modelo em concreto armado, foram modificadas algumas vigas T para vigas comuns protendidas, ou seja, foram removidas as mesas, e se mostrou uma decisão eficaz ao mostrar uma redução de aço passivo e concreto, conforme as Figuras 19, 20 e 21. Porém, permaneceu com uma altura de 26cm já contabilizando uma capa de 6cm, sendo que a única diferença no modelo foram algumas cubetas alteradas de lugar ou removidas para uma melhor compatibilização com as vigas protendidas adjacentes.

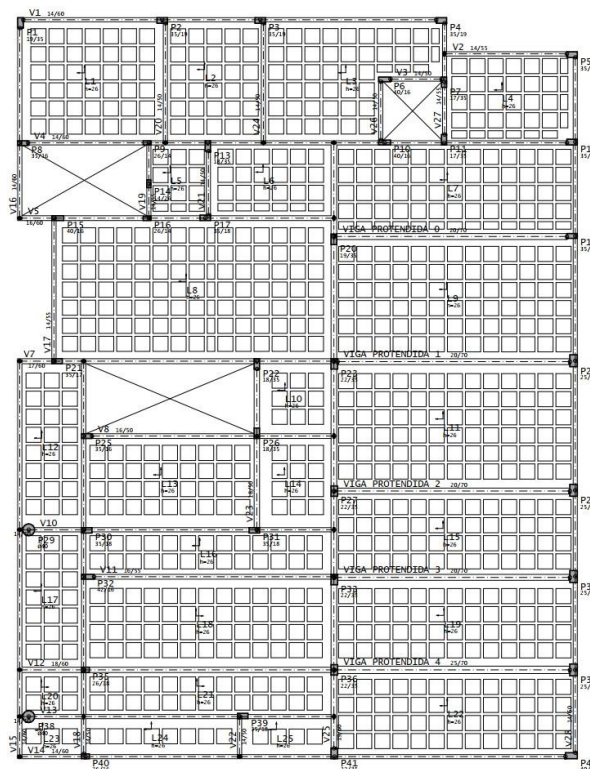


Figura 19 – Planta de fôrma do sistema de laje nervurada bidirecional protendida no TQS. (Fonte: Autoria própria; 2023)

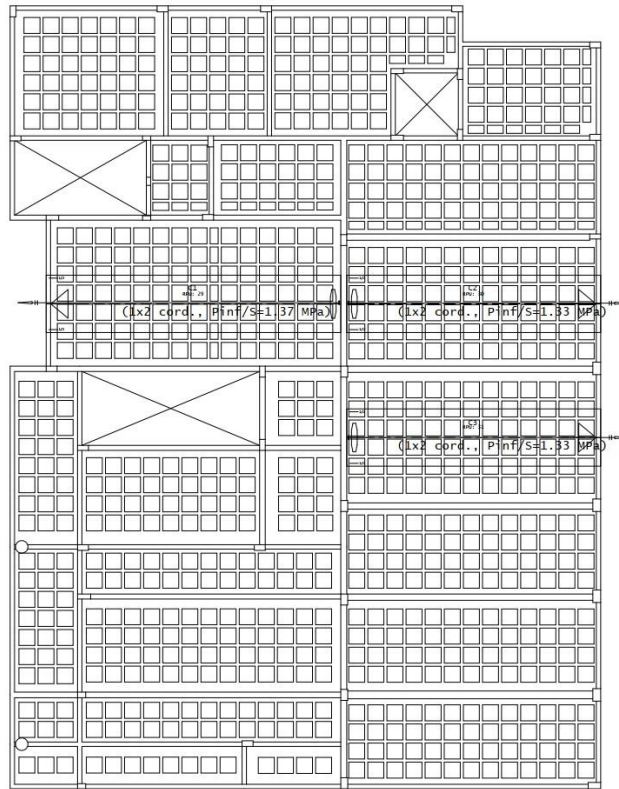


Figura 20 – Traçado de RPU horizontais e distribuição de cabos do sistema de laje nervurada bidirecional protendida no TQS. (Fonte: Autoria própria; 2023)

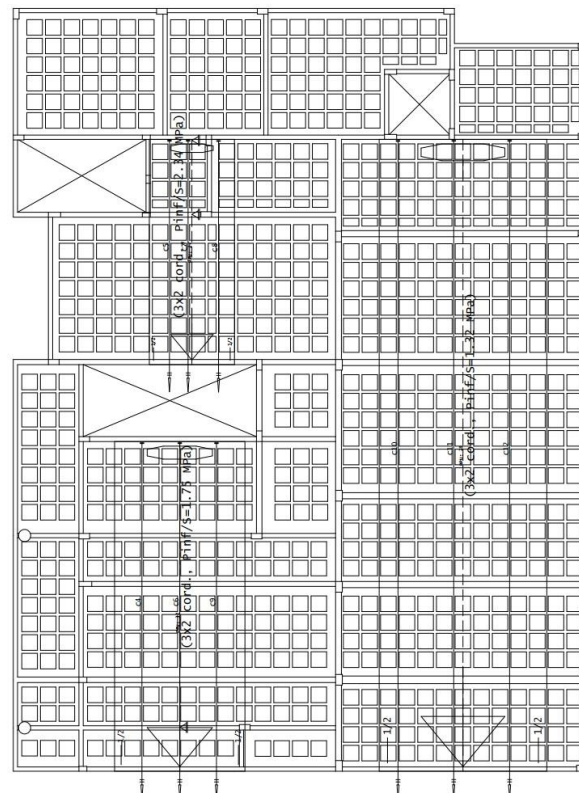


Figura 21 – Traçado de RPU verticais e distribuição de cabos do sistema de laje nervurada bidirecional protendida no TQS. (Fonte: Autoria própria; 2023)

Como feito anteriormente, foram analisados, no modelo de visualização de grelhas do TQS, o comportamento na distribuição de cargas verticais nas vigas faixa protendidas e seus deslocamentos verticais no ELU e ELS com as respectivas combinações para

análise e obtenção de deslocamentos, descritos no Quadro 3, satisfazendo também os critérios de aceitabilidade sensorial de norma.

Como já citado, foi feita uma repaginação de cubetas em determinados locais para adequação das vigas protendidas e foi feita a análise de grelha em ELU e ELS e suas respectivas combinações para análise e obtenção de seus deslocamentos, descritos no Quadro 5.

	Combinação	Deslocamento	
		Laje	Viga
ELS	Frequente / Peso Próprio + Sobrecarga + Hiperestático + 0,6xCargas Acidentais + 0,3xVento	-0,29cm	-0,31cm
ELS	Quase Permanente / Peso Próprio + Sobrecarga + Hiperestático + 0,6xCargas Acidentais	-0,29cm	-0,31cm
ELU	Todas as Acidentais Combinadas / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,86xHiperestático + Cargas Acidentais + 0,6xVento	-0,56cm	-0,59cm
ELU	Permanentes e Acidentais Combinadas / Peso Próprio + Sobrecarga + 0,86xHiperestático + Cargas Acidentais	-0,55cm	-0,59cm

Quadro 5 – Combinações de ELU e ELS para as lajes e vigas protendidas do sistema de lajes nervuradas bidirecional protendida. Fonte: (Autoria própria, 2023)

Ainda no visualizador de grelhas do TQS foram analisados o hiperestático de protensão e as forças de alívio de protensão tanto para as vigas protendidas como para as lajes protendidas e as consequências dos seus deslocamentos. No que tange o ELU podemos notar um deslocamento resultante do hiperestático de 0,53cm e para as forças de alívio foi de 0,52cm; já no ELS o deslocamento resultante do hiperestático foi de 0,46cm e para as forças de alívio foi de 0,45cm. Como dito, estes deslocamentos positivos irão combater os deslocamentos negativos e equilibrar as forças para dar mais resistência e sustentabilidade para a estrutura ao longo do tempo, vide Figura 9.

Após análise da grelha e seus deslocamentos, foi extraído o quantitativo de materiais, representado na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantitativo de materiais para o sistema de Laje Nervurada Bidirecional Protendido.

Materiais		Lajes	Vigas	Total	Total (/m <sup>2</sup> )
Aço CA50/CA60	(kg)	2640,00	1551,00	4191,00	9,67
Aço CP190 RB	(kg)	264,00	348,60	612,60	1,41
Concreto	(m <sup>3</sup> )	53,10	24,51	77,61	0,18
Fôrma	(m <sup>2</sup> )	-	241,20	241,20	0,49
Cubetas	(unid)	898,00	-	898,00	2,07

Fonte: Autoria própria, 2023

#### 4.5 Comparação dos Resultados Obtidos

A seguir, serão feitas as comparações entre os sistemas construtivos apresentados entre lajes nervuradas unidirecionais e bidirecionais em concreto armado e concreto protendido, suas análises de grelha no que tange seus deslocamentos em ELS bem como seus índices de consumo, visando a uma melhor escolha e um melhor custo benefício. É fato que não é uma tarefa simples analisar custos, visto que valores referentes à tabela SINAPI normalmente são uma média calculada para se ter como base na hora de orçamentar qualquer tipo de projeto, pois os valores de mercado podem variar muito ao simples comparar de preços entre cidades vizinhas, bem como a velocidade de execução e preços de mão de obra. Portanto, não foram levados em consideração custos e velocidade de execução.

Os custos de insumos foram feitos com composição própria e, através da tabela SINAPI atualizada em outubro de 2022 em sua composição analítica desonerada, os materiais buscados constam apenas insumos sem composição. Também foram obtidos valores de insumos das cubetas plásticas através da empresa Impacto e aço de protensão com a ArcelorMittal, referentes a janeiro de 2023, pois são os mesmos materiais utilizados para cálculo no TQS, bem como as tapas nervuras utilizadas para o sistema de laje nervurada unidirecional.

#### 4.5.1 Insumos e Composições dos Sistemas Estruturais em Concreto Armado

Aqui contemplará os sistemas de lajes nervuradas unidirecional e bidirecional em concreto armado. Estão descritos nas Tabelas 8 e 9, índices de consumo e orçamento desonerado para os sistemas estruturais de lajes e vigas em questão.

Tabela 8 – Orçamento desonerado de insumos para o sistema de laje nervurada unidirecional em concreto armado.

Insumo	Fonte de Pesquisa		Descrição	Und	Qtd	Orçamento Desonerado		
	Código	Base de Dados				Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	
Aço CA50/CA60	Obs.(1) <sup>1</sup>	SINAPI	Aço CA-50 (6,3mm, 8,0mm, 10mm, 12,5mm, 16mm, 20mm, 25mm), aço CA-60 (5,0mm), vergalhão	KG	5569	12,29	68.443,01	
Concreto	34495	SINAPI	Concreto usinado bombeável C35	M3	90,68	449,66	40.775,17	
Fôrma	1345	SINAPI	Painel de madeira compensada plastificada para forma de concreto, de 2200x1100 mm, e = 17mm	M2	215,9	46,63	10.067,42	
Cubetas	Obs.(2) <sup>2</sup>	Impacto	Cubeta plástica PavPlus 61x183 unidirecional	UN	289	10,86	3.138,54	
Tapa Nervura	Obs.(2) <sup>2</sup>	Impacto	Tapa nervura PavPlus	UN	415	6,78	2.813,70	
Total =								125.237,84

Fonte: Autoria própria, 2023

<sup>1</sup> Observação (1): Para chegar ao valor médio do aço CA50 e CA60 foram tomados como referência os códigos 32, 33, 34, 43055, 43056 e 43059, para serem utilizados seus valores unitários como base e fazer uma média ponderada, visto que eram valores próximos e não ficaria um cálculo discrepante em relação a uma bitola de aço diferente da outra.

<sup>2</sup> Observação (2): O *software* TQS emite em suas tabelas fôrmas prontas e não distingue fôrmas completas de fôrmas repartidas com uso de tapa nervura. A empresa Impacto dispõe de cubetas de 61 x 61cm (x3) e tapas nervuras para compor uma fôrma unidirecional de 61 x 183cm utilizado no presente estudo, portanto, pode diferir a quantidade de cubetas fornecidas na tabela de projeto para a quantidade presente na tabela orçamentária; os valores referentes às cubetas e tapas nervuras são para aluguel mensal.

Tabela 9 – Orçamento desonerado de insumos para o sistema de laje nervurada bidirecional em concreto armado.

Insumo	Fonte de Pesquisa		Descrição	Und	Qtd	Orçamento Desonerado	
	Código	Base de Dados				Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Aço CA50/CA60	Obs.(1) <sup>1</sup>	SINAPI	Aço CA-50 (6,3mm, 8,0mm, 10mm, 12,5mm, 16mm, 20mm, 25mm), aço CA-60 (5,0mm), vergalhão	KG	5093	12,29	62.592,97
Concreto	34495	SINAPI	Concreto usinado bombeável C35	M3	90,94	449,66	40.892,08
Fôrma	1345	SINAPI	Painel de madeira compensada plastificada para forma de concreto, de 2200x1100 mm, e = 17mm	M2	235,76	46,63	10.993,49
Cubetas	-	Impacto	Cubeta plástica PavPlus 61x183 unidirecional	UN	671	10,86	7.287,06
Total =							121.765,60

Fonte: Autoria própria, 2023

#### 4.5.2 Insumos e Composições dos Sistemas Estruturais em Concreto Protendido

Nas Tabelas 10 e 11 estão descritos os índices de consumo e orçamento desonerado para os sistemas estruturais de lajes nervuradas unidirecional e bidirecional em concreto protendido.

Tabela 10 – Orçamento desonerado de insumos para o sistema de laje nervurada unidirecional em concreto protendido.

Insumo	Fonte de Pesquisa		Descrição	Und	Qtd	Orçamento Desonerado	
	Código	Base de Dados				Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Aço CA50/CA60	Obs.(1) <sup>1</sup>	SINAPI	Aço CA-50 (6,3mm, 8,0mm, 10mm, 12,5mm, 16mm, 20mm e 25mm), aço CA60 (5,0mm), vergalhão	KG	4668,00	12,29	57.369,72
Aço CP190 RB	-	ArcelorMittal	Monocordoalha de 7 fios engraxada e plastificada (PEAD)	KG	948,70	20,25	19.211,17
Concreto	34495	SINAPI	Concreto usinado bombeável C35	M3	84,12	449,66	37.825,40
Fôrma	1345	SINAPI	Painel de madeira compensada plastificada para forma de concreto, de 2200x1100 mm, e = 17mm	M2	221,32	46,63	10.320,15
Cubetas	Obs.(2) <sup>2</sup>	Impacto	Cubeta plástica PavPlus 61x183 unidirecional	UN	353	10,86	3.833,58
Tapa Nervura	Obs.(2) <sup>2</sup>	Impacto	Tapa nervura PavPlus	UN	523	6,78	3.545,94
Total =							132.105,97

Fonte: Autoria própria, 2023

Tabela 11 – Orçamento desonerado de insumos para o sistema de laje nervurada bidirecional em concreto protendido.

Insumo	Fonte de Pesquisa		Descrição	Unid	Qtd	Orçamento Desonerado	
	Código	Base de Dados				Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Aço CA50/CA60	Obs.(1) <sup>1</sup>	SINAPI	Aço CA-50 (6,3mm, 8,0mm, 10mm, 12,5mm, 16mm, 20mm, 25mm), aço CA-60 (5,0mm), vergalhão	KG	4.191	12,29	51.507,39
Aço CP190 RB	-	ArcelorMittal	Monocordoalha de 7 fios engraxada e plastificada (PEAD)	KG	612,60	20,25	12.405,15
Concreto	34495	SINAPI	Concreto usinado bombeável C35	M3	77,61	449,66	34.898,11
Fôrma	1345	SINAPI	Painel de madeira compensada plastificada para forma de concreto, de 2200x1100 mm, e = 17mm	M2	241,20	46,63	11.247,16
Cubetas	-	Impacto	Cubeta plástica PavPlus 61x183 unidirecional	UN	898	10,86	9.752,28
Total =							119.810,09

Fonte: Autoria própria, 2023

#### 4.5.3 Comparativo dos Sistemas Estruturais

Como referência comparativa entre os deslocamentos verticais máximos nos sistemas estruturais em estudo, advindos de peso próprio, sobrecarga, cargas acidentais, cargas de vento e nos casos dos modelos concebidos com protensão, é possível citar também os deslocamentos oriundos dos hiperestáticos de protensão e das forças de alívio de protensão, descritos nos Quadros 6 e 7.

Sistema Estrutural	Critério de segurança	Deslocamento	
		Laje	Viga
Laje Nervurada Unidirecional em Concreto Armado	ELS-CFREQ	-1,26cm	-1,09cm
	ELS-CQPERM	-1,26cm	-1,09cm
Laje Nervurada Bidirecional em Concreto Armado	ELS-CFREQ	-1,17cm	-1,02cm
	ELS-CQPERM	-1,17cm	-1,02cm
Laje Nervurada Unidirecional em Concreto Protendido	ELS-CFREQ	-0,31cm	-0,31cm
	ELS-CQPERM	-0,31cm	-0,31cm
Laje Nervurada Bidirecional em Concreto Protendido	ELS-CFREQ	-0,29cm	-0,31cm
	ELS-CQPERM	-0,29cm	-0,31cm

Quadro 6 – Comparativo de deslocamentos entre os sistemas estruturais de lajes nervuradas para lajes e vigas. Fonte: (Autoria própria, 2023)

Comparando os sistemas em concreto armado vê-se uma leve redução em favor do sistema bidirecional por deslocar menos 0,09cm para lajes e 0,07cm para as vigas; entre os sistemas de concreto protendido nota-se um comportamento semelhante, sendo possível ver uma redução voltada para o sistema bidirecional com 0,02cm a menos para as lajes e 0,0cm para as vigas, pois neste último os deslocamentos foram iguais. Tais

parâmetros podem se mostrar plausíveis pelo fato de que as lajes unidirecionais tendem a ser mais altas, conseqüentemente utilizando um maior consumo de concreto e de aço. Logo, seu peso próprio influencia diretamente neste resultado.

Quando se comparam os casos de concreto armado com o concreto protendido, nota-se uma diferença absoluta nos deslocamentos, os quais se justifica a eficácia do método de protensão, chegando a deslocar 75,21% a menos se comparar os modelos que se saíram melhor em suas comparações, ou seja, se comparar o modelo bidirecional em concreto armado e o modelo bidirecional em concreto protendido.

Para se justificar esta eficácia, no Quadro 7, estão expostos os deslocamentos resultantes das forças presentes nos sistemas protendidos, que combatem os deslocamentos que tanto prejudicam os modelos em concreto armado.

Sistema Estrutural	Critério de segurança	Deslocamento	
		Laje	Viga
Laje Nervurada Unidirecional em Concreto Protendido	ELS-HIPPROT	0,49cm	0,39cm
	ELS-ALIVPROT	0,49cm	0,38cm
Laje Nervurada Bidirecional em Concreto Protendido	ELS-HIPPROT	0,46cm	0,43cm
	ELS-ALIVPROT	0,45cm	0,42cm

Quadro 7 – Deslocamentos resultantes das combinações de protensão (Hiperestático e Forças de Alívio).  
 Fonte: (Autoria própria, 2023)

A Tabela 12 mostra em termos gerais um demonstrativo dos índices de consumo de materiais necessários para cada sistema construtivo.

Tabela 12 – Comparativo entre os índices de consumo de materiais por m<sup>2</sup> para os modelos estruturais.

Sistema	Aço CA50/CA60 (kg/m <sup>2</sup> )	Aço CP190 RB (kg/m <sup>2</sup> )	Concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Fôrma (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
Laje Nervurada Unidirecional CA	12,846	-	0,209	0,498
Laje Nervurada Bidirecional CA	11,748	-	0,210	0,544
Laje Nervurada Unidirecional CP	10,768	2,188	0,194	2,092
Laje Nervurada Bidirecional CP	9,668	1,413	0,179	2,628

Fonte: Autoria própria, 2023

Para análise entre os modelos em concreto armado, nota-se uma economia de 8,55% no consumo de aço em favor do sistema bidirecional. O consumo de concreto se mostrou muito próximo com uma economia de 0,29% a favor do sistema unidirecional e economia também no tocante as fôrmas de 8,42%.

No que se refere a análise entre os modelos em concreto protendido, é notável a economia de aço passivo de 10,22%, de aço ativo de 35,43% e economia de concreto de 7,74% todos em favor do sistema bidirecional. De maneira análoga à comparação do sistema em concreto armado, nota-se um maior consumo de fôrmas no sistema bidirecional em concreto protendido também, economizando 20,40% em favor do sistema unidirecional.

Na comparação entre os modelos de concreto armado e concreto protendido, comparando os mais econômicos de cada modelo, bidirecional de ambos os sistemas, vê-se que o sistema bidirecional protendido teve uma economia de 17,71% no aço CA50/60 e uma economia de 14,66% em concreto, porém, teve um acréscimo de 79,30% no



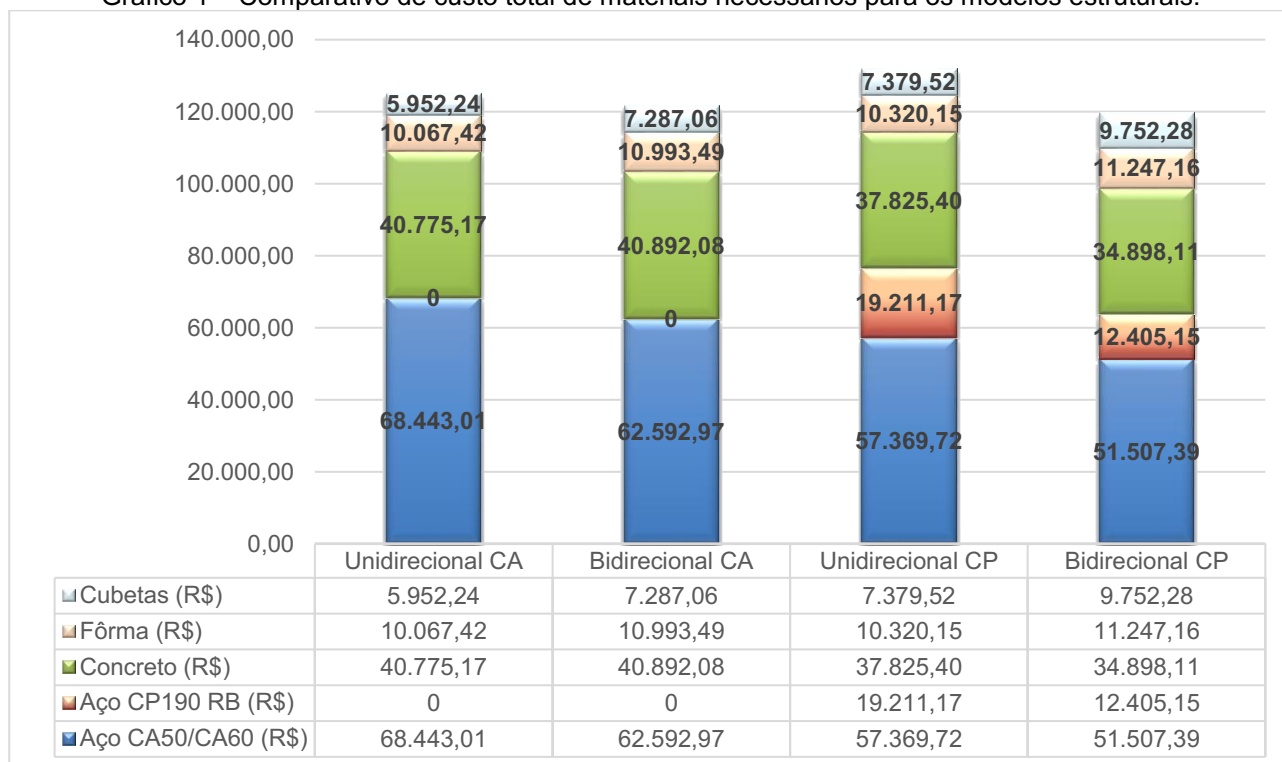
consumo de fôrmas devido ao aumento do número de cubetas, as quais preencheram as áreas de concreto das vigas T, e não se pode esquecer que o sistema protendido tem um aumento no índice de aço CP190 RB que é dispensável no modelo de concreto armado. Verifica-se que em termos gerais o modelo em concreto protendido teve um aumento no consumo total de 9,98%, porém, o percentual de consumo pode não refletir no custo final da obra. A Tabela 13 e os Gráficos 1, 2, 3, 4 e 5 descrevem os custos de materiais utilizados nos sistemas estruturais.

Tabela 13 – Comparativo de custo de materiais necessários para os modelos estruturais.

Sistema (R\$)	Aço CA50/CA60 (R\$)	Aço CP190 RB (R\$)	Concreto (R\$)	Fôrma (R\$)	Cubetas (R\$)	Total (R\$)
Laje Nervurada Unidirecional CA	68.443,01	-	40.775,17	10.067,42	5.952,24	125.237,84
Laje Nervurada Bidirecional CA	62.592,97	-	40.892,08	10.993,49	7.287,06	121.765,60
Laje Nervurada Unidirecional CP	57.369,72	19.211,17	37.825,40	10.320,15	7.379,52	132.105,97
Laje Nervurada Bidirecional CP	51.507,39	12.405,15	34.898,11	11.247,16	9.752,28	119.810,09

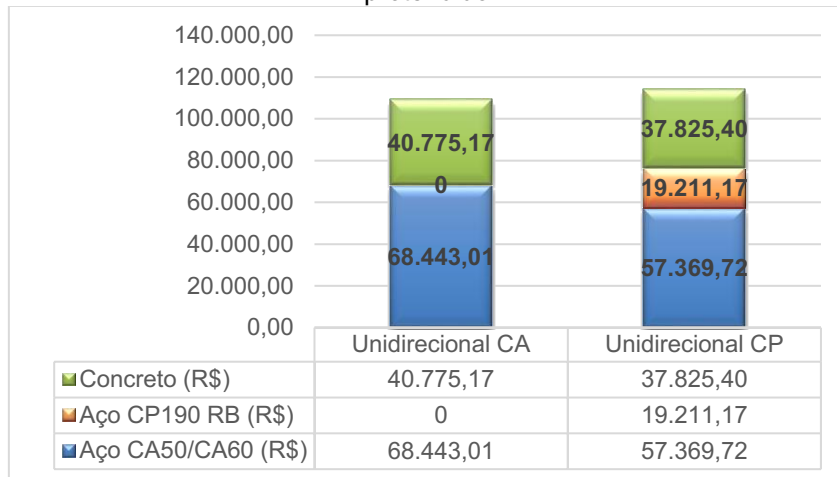
Fonte: Aatoria própria, 2023

Gráfico 1 – Comparativo de custo total de materiais necessários para os modelos estruturais.



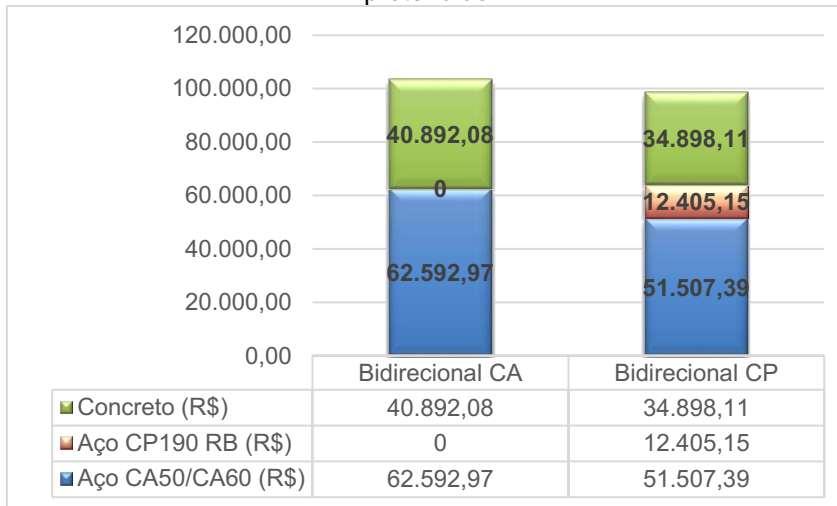
Fonte: Aatoria própria, 2023

**Gráfico 2 – Comparativo de custo entre os modelos unidirecionais em concreto armado e concreto protendido.**



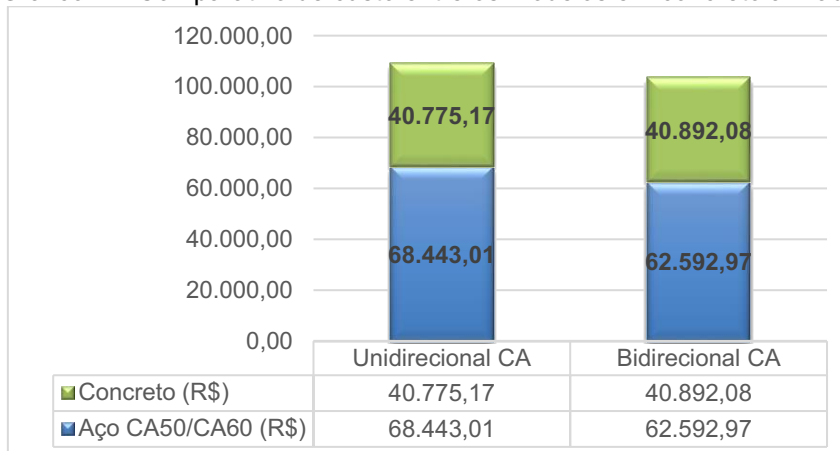
Fonte: Autoria própria, 2023

**Gráfico 3 – Comparativo de custo entre os modelos bidirecionais em concreto armado e concreto protendido.**



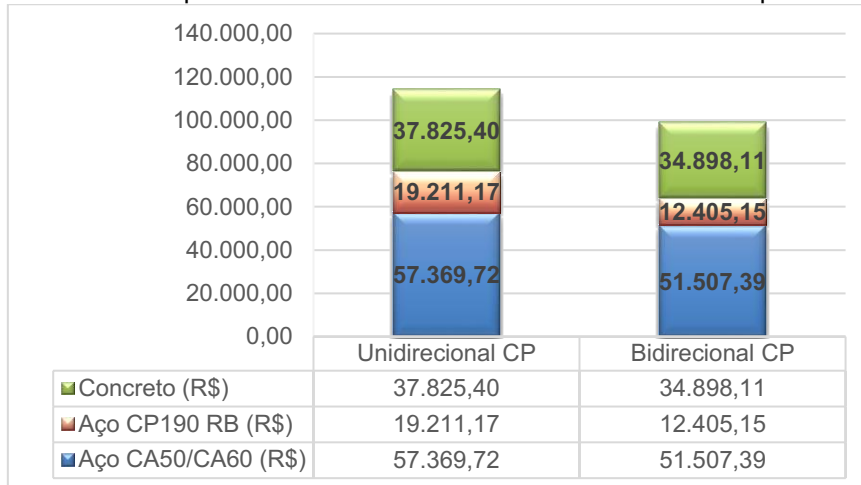
Fonte: Autoria própria, 2023

**Gráfico 4 – Comparativo de custo entre os modelos em concreto armado.**



Fonte: Autoria própria, 2023

Gráfico 5 – Comparativo de custo entre os modelos em concreto protendido.



Fonte: Autoria própria, 2023

Com relação a custos totais, nota-se que o sistema bidirecional em concreto protendido se mostra 4,33% mais econômico em relação ao sistema unidirecional em concreto armado, 1,61% mais econômico em relação ao sistema bidirecional em concreto armado e 9,31% mais econômico em relação ao sistema unidirecional em concreto protendido.

## 5. Conclusão

Tem-se, após verificação de desempenho, consumo de materiais e orçamentário dos modelos estruturais em questão, resultados favoráveis para os sistemas de concreto protendido, visto que se sobrepuseram consideravelmente aos sistemas em concreto armado em relação a deslocamento vertical, chegando a deformar 75,21% menos. Em relação ao consumo de materiais, estes apresentaram um ligeiro aumento nos índices de consumo de fôrmas e principalmente no aço CP 190, ausente no concreto armado, mas reduziram consideravelmente o aço passivo, o qual compensa o consumo, consequentemente o que reflete no resultado do orçamento final.

O sistema unidirecional em concreto protendido em relação a custo não se justificou quando comparado com os sistemas em concreto armado, devido ao alto custo do aço de protensão, porém apresenta um menor consumo em aço passivo e concreto, um consumo equiparável de fôrmas e cubetas. O sistema estrutural bidirecional protendido se mostrou mais viável em termos gerais, seja em deslocamento, seja em custo, o que se justifica pela demanda do modelo de lajes unidirecionais precisar de uma altura maior demandando um maior consumo de concreto o que leva a um maior peso e uma maior demanda de aço para combater as flechas.

Portanto, o sistema estrutural bidirecional em concreto protendido se mostrou o mais economicamente viável dos quatro modelos analisados, apresentando o consumo mais equilibrado de materiais e um ótimo comportamento estrutural. Contudo, deve-se atentar que caracterizar os custos e comparar determinados modelos de projeto requer uma gama de variáveis não consideradas neste trabalho como tempo de execução, mão de obra, disponibilidade de materiais, transporte, dentre outros fatores que possam onerar ou prejudicar de alguma forma na escolha de sistemas estruturais.

Uma possibilidade de desonerar ainda mais o estudo em questão poderia ser aplicar estes sistemas em lajes lisas e comparar os modelos unidirecionais e bidirecionais, já que optando por remover o conjunto de vigas comuns e aplicar o uso de vigas faixa poderia reduzir o consumo de aço, concreto e fôrmas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **7197**: Projeto de estruturas de concreto protendido. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14859-1**: Laje pré-fabricada - Requisitos. Parte 1: Lajes unidirecionais. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14859-2**: Laje pré-fabricada - Requisitos. Parte 2: Lajes bidirecionais. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL – SINAPI. **Custos de composições analíticas – Desonerado**. João Pessoa, outubro de 2022.

ARCELORMITTAL. **Fios e cordoalhas para concreto protendido**. Brasil: ArcelorMittal, 2021.

IMPACTO. **Catálogo de dados técnicos**. Brasil: Impacto, 2023

AALAMI, Bijan O; JURGENS, Jennifer D. **Guidelines for the design of post-tensioned floors**. Concrete International. San Francisco, 2003.

ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes. **Estruturas de pisos de edifícios com a utilização de cordoalhas engraxadas**. 2002. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002

BASTOS, Paulo Sérgio. **Fundamentos do concreto armado**. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. V. 2. São Paulo: Pini, 2009.

CARVALHO, Roberto Chust. **Estruturas em concreto protendido: Pré-tração, Pós-tração e Cálculo e detalhamento**. 2ª Ed. São Paulo: Pini, 2017.

CAUDURO, Eugenio Luiz. Em favor da leveza. *Revista Técnica*, nº 26. Jan/Fev 1997.

DORNELLES, Francisco Lunardi. **Estudo sobre a modelagem da protensão em lajes lisas com o uso de analogia de grelhas**. 2009. 220 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

EMERICK, Alexandre Anozé. **Projeto e execução de lajes protendidas**. Brasília, 2002.

FRANÇA, Argemiro B. Monteiro da; FUSCO, Péricles Brasiliense. **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios**. São Paulo: AFALA & ABRAPEX, 1997.

MENEGATTI, Marcelo. **A protensão como um conjunto de cargas concentradas equivalentes**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

RODRIGUES, Públio Penna Firme. **Pisos industriais protendidos com cordoalha engraxada**. Revista Concreto & Construções. XLIII. 2015. IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto. São Paulo, 2015.

SOUZA, Fábio Albino; MIGLIORE JR, Ângelo Rubens. **Avaliação prática de perdas de protensão**. São Paulo: Protenfor, 2021.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JUNIOR, Kléos M Lenz. **Concreto protendido: fundamentos básicos**. 4ª Ed. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1998.

TQS Informática LTDA. **Lajes Protendidas**. Manual de utilização do usuário. Disponível em: <<https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=1631009215&language=pt-BR>>. Acesso em: 24 de jan. de 2023.

TQS Informática LTDA. **Modelo VI + Lajes Protendidas**. Manual de utilização do usuário. Disponível em: <<https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=892642655&search=modelo%20vi&language=pt-BR>>. Acesso em: 24 de jan. de 2023.