



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**GABRIEL SOARES FERREIRA**

**COMPARAÇÃO DE CUSTOS DIRETOS DE DUAS ESTRUTURAS DE CONCRETO  
ARMADO E PROTENDIDO PARA UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL DE  
QUATRO PAVIMENTOS**

**Palmas/TO**  
**2022**

**GABRIEL SOARES FERREIRA**

**COMPARAÇÃO DE CUSTOS DIRETOS DE DUAS ESTRUTURAS DE CONCRETO  
ARMADO E PROTENDIDO PARA UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL DE  
QUATRO PAVIMENTOS**

Monografia apresentado ao Curso de  
Engenharia Civil da Universidade Federal do  
Tocantins como requisito à obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil.  
Orientador: Prof<sup>a</sup> Msc. Rafael Alves Amorim.

**Palmas/TO  
2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

F383c    Ferreira, Gabriel Soares.

    Comparação de custos diretos de duas estruturas de concreto armado e protendido para uma edificação residencial de quatro pavimentos. / Gabriel Soares Ferreira. – Palmas, TO, 2022.

    53 f.

    Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2022.

    Orientador: Rafael Alves Amorim

    1. Concreto armado. 2. Concreto protendido . 3. Orçamento. 4. Residência Unifamiliar . I. Título

**CDD 624**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

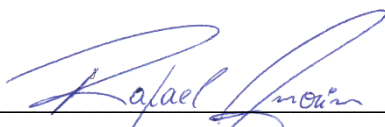
GABRIEL SOARES FERREIRA

**COMPARAÇÃO DE CUSTOS DIRETOS DE DUAS ESTRUTURAS DE CONCRETO  
ARMADO E PROTENDIDO PARA UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL DE  
QUATRO PAVIMENTOS**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 29/06/2022

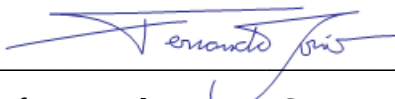
Banca Examinadora



---

Prof. Rafael Alves Amorim

Orientador, UFT – Universidade Federal do Tocantins



---

Prof. Fernando Moreno Suarte Junior

Examinador, UFT – Universidade Federal do Tocantins



---

Prof. Dr. Roldão Pimentel de Araújo Júnior  
Matrícula 1783498

Eng. Civil/UFT  
Prof. Roldão Pimentel de Araújo Júnior

Examinador, UFT – Universidade Federal do Tocantins

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por sua bondade e sabedoria, por sempre estar do meu lado ao longo de mais essa jornada, me mandando forçar e ajudando a não desistir me deixando sempre confiante por tê-lo ao meu lado. Além de colocar pessoas nessa etapa que ajudou a deixar essa caminhada menos difícil.

Aos meus pais, Elaine de Borba Soares Ferreira e Fabrício Paraguassu Ferreira por todas as lições, educação e aprendizado que me proporcionaram, me prestando fornecendo sempre apoio sem queixar das minhas escolhas. As histórias, forças e coragem me serviram de inspiração para chegar até aqui e querer ir mais longe.

Agradeço aos meus avós, Maria de Borba Soares, Gabriel Soares, Ivete Terezinha Paraguassu Ferreira e Valdir Ferreira Rosa (in memoria), por todos carinhos e cuidado ao longo de toda minha vida. Agradeço aos meu irmão, Fabricio Paraguassu Ferreira Filho, a minha namorada Taynara Bahia, meus primos e amigos por todo o companheirismo. A todos o meu amor mais profundo.

Ao meu professor e orientador Rafael Alves Amorim, por utilizar com sabedoria o dom de ensinar, cooperando para a formação de profissionais qualificado, introduzindo os alunos com clarezas no eixo de estruturas. Seus ensinamentos foram essenciais para a formação e inspiração para esse trabalho.

## RESUMO

As crescentes exigências estéticas impostas por projetos de arquitetura podem desafiar o engenheiro calculista na realização de projetos estruturais. Pelo motivo apresentado os profissionais podem buscar soluções em opções de estruturas, que não são convencionais na maior parte da cultura do território brasileiro, com o objetivo de apresentar soluções viáveis. O concreto protendido pode ser a solução para a construção dessa residência, aliando as principais vantagens desse método construtivo como: capacidade de suportar grandes vãos, chances em economias de aço e madeira e aumento da produtividade. Esse trabalho tem o objetivo de apresentar uma comparação de custos diretos entre os métodos construtivos concreto armado e concreto protendido. Foram elaborados uma concepção estrutural para cada estrutura usando software TQS versão 23 Plena de um imóvel com quatro pavimentos. A partir disso foi feito levantamento de quantitativo dos elementos estruturais e por seguinte dos seus custos diretos, usando as composições do SINAPI de janeiro de 2022 do estado do Tocantins. Após análises foi concluído que o sistema construtivo em concreto protendido, comparando as concepções apresentas apresentou maior economia para a execução da residência apresentada com uma economia de 6,22%, em comparação à estrutura em concreto armado.

**Palavras-Chave:** Concreto armado, concreto protendido, orçamento, residência unifamiliar.

## ABSTRACT

The growing aesthetic demands imposed by architectural projects increasingly challenge the calculating engineer in single-family property calculations. For the reason presented, professionals are being encouraged to seek solutions in constructive method options, which are not popular in most of the Brazilian territory, in order to present viable solutions. Given this fact, it is believed that prestressed concrete can be the solution for the construction of this residence, combining the main advantages of this construction method such as: ability to support large spans, large savings in steel and wood and increased productivity. Therefore, this work aims to present a comparison of direct costs between the construction methods reinforced concrete with solid slab and prestressed concrete with flat slab. Two structural projects of each construction method were elaborated using the TQS software Full version of a property with four floors. From this, a quantitative survey of the structural elements was carried out and, subsequently, their direct costs, using the compositions of the SINAPI of January 2022 in the state of Tocantins. After analysis, it was concluded that the construction system in prestressed concrete with flat slab presented greater effectiveness for the execution of the single-family residence presented, reducing costs by 6.22%.

**Keywords:** Reinforced concrete, prestressed concrete, budget, single-family residence.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Custos do concreto protendido x concreto armado em função dos vãos. .... | 15 |
| Figura 2 – Transferência ideal de cargas em uma edificação.....                     | 18 |
| Figura 3 – Esquema estrutural de uma viga de transição. ....                        | 18 |
| Figura 4 – Traçados para encontrar as áreas de influência de cada pilar.....        | 19 |
| Figura 5 – Representação de uma viga. ....                                          | 20 |
| Figura 6 - Viga de Concreto Armado fissurada e com diagramas.....                   | 21 |
| Figura 7 – Tensões normais na viga protendida. ....                                 | 22 |
| Figura 8 – Detalhamento das peças da ancoragem. ....                                | 22 |
| Figura 9 – Exemplo de uma cabeceira de ancoragem.....                               | 23 |
| Figura 10 – Relaxamento da armadura ativa.....                                      | 24 |
| Figura 11 – Corte esquemático da armadura de punção ....                            | 25 |
| Figura 12 – Corte de uma laje protendida.....                                       | 25 |
| Figura 13 – Peça já concretas com os dutos no seu interior.....                     | 26 |
| Figura 14 – Estiramento da armadura ativa.....                                      | 26 |
| Figura 15 – Comportamento do concreto no estágio I.....                             | 27 |
| Figura 16 – Comportamento do concreto no estágio II ....                            | 28 |
| Figura 17 – Comportamento do concreto no estágio III ....                           | 28 |
| Figura 18 – Dimensões dos vãos do subsolo (dimensões em cm).....                    | 35 |
| Figura 19 - Concepção estrutural inicial do subsolo.....                            | 36 |
| Figura 20 - Concepção estrutural inicial do térreo e superior ....                  | 36 |
| Figura 21 – Concepção estrutural inicial cobertura.....                             | 37 |
| Figura 22 - Concepção estrutural inicial do pavimento subsolo ....                  | 37 |
| Figura 23 - Concepção estrutural inicial dos pavimentos térreo e superior.....      | 38 |
| Figura 24 - Concepção estrutural inicial do pavimento cobertura.....                | 38 |
| Figura 25 - Nova Concepção do Subsolo.....                                          | 39 |
| Figura 26 – Nova concepção Térreo e Superior.....                                   | 40 |
| Figura 27 – Nova concepção Cobertura.....                                           | 40 |
| Figura 28 – 3D do edifício ....                                                     | 40 |
| Figura 29 - Nova Concepção do Subsolo.....                                          | 41 |
| Figura 30 - Nova concepção Térreo e Superior.....                                   | 41 |
| Figura 31 - Nova concepção Cobertura ....                                           | 42 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Figura 32 - 3D do edifício ..... | 42 |
|----------------------------------|----|

## **LISTAS DE TABELAS**

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Classificação do grau de agressividade ambiental. ....                                                                              | 31 |
| Tabela 2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e a proteção de armadura em função das classes de agressividade ambiental..... | 32 |
| Tabela 3 – Comparação de custos por pavimento .....                                                                                            | 43 |
| Tabela 4 – Comparação de gastos de concreto, forma e aço por elemento.....                                                                     | 44 |

## **LISTAS DE ABREVIACÕES**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

TCPO – Tabela de Composição e Preços para Orçamentos

## SUMÁRIO

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                               | <b>14</b> |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA .....                                                  | 15        |
| 1.2      | OBJETIVOS.....                                                       | 16        |
| 1.2.1    | <b>Objetivo Geral .....</b>                                          | <b>16</b> |
| 1.2.2    | <b>Objetivos Específicos .....</b>                                   | <b>16</b> |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                   | <b>17</b> |
| 2.1      | DEFINIÇÃO DO SISTEMA ESTRUTURAL.....                                 | 17        |
| 2.1.1    | <b>Concepção estrutural de edifícios.....</b>                        | <b>17</b> |
| 2.2      | CONCRETO PROTENDIDO .....                                            | 21        |
| 2.2.1    | <b>Concreto protendido pré-tração.....</b>                           | <b>22</b> |
| 2.2.2    | <b>Concreto protendido pós-tração.....</b>                           | <b>24</b> |
| 2.3      | ESTADOS LIMITE .....                                                 | 27        |
| 2.3.1    | <b>Estado limite de serviço formação de fissuras (ELS-F).....</b>    | <b>29</b> |
| 2.3.2    | <b>Estado limite de serviço de abertura de Fissuras (ELS-W).....</b> | <b>29</b> |
| 2.3.3    | <b>Estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF).....</b>        | <b>29</b> |
| 2.3.4    | <b>Estado limite de serviço de descompressão (ELS-D).....</b>        | <b>29</b> |
| 2.3.5    | <b>Estado limite último .....</b>                                    | <b>30</b> |
| 2.4      | GRAU DE PROTENSÃO.....                                               | 30        |
| 2.4.1    | <b>Protensão parcial .....</b>                                       | <b>32</b> |
| 2.4.2    | <b>Protensão limitada .....</b>                                      | <b>32</b> |
| 2.4.3    | <b>Protensão completa.....</b>                                       | <b>33</b> |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA .....</b>                                             | <b>34</b> |
| 3.1      | DEFINIÇÃO DOS SOFTWARES .....                                        | 34        |
| 3.2      | DEFINIÇÃO DO EMPREENDIMENTO .....                                    | 34        |
| 3.3      | DEFINIÇÃO DOS FATORES LOCAIS .....                                   | 35        |
| 3.4      | CONCEPÇÃO ESTRUTURAL .....                                           | 35        |
| 3.4.1    | <b>Concreto Armado .....</b>                                         | <b>36</b> |
| 3.4.2    | <b>Concreto Protendido.....</b>                                      | <b>37</b> |
| 3.5      | MODELAGEM ESTRUTURAL .....                                           | 38        |
| 3.5.1    | <b>Concreto Armado .....</b>                                         | <b>39</b> |
| 3.5.2    | <b>Concreto Protendido.....</b>                                      | <b>41</b> |

|     |                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------|----|
| 3.6 | EXTRAÇÃO DE QUANTITATIVO E DE CUSTOS DIRETOS ..... | 42 |
| 4   | RESULTADOS .....                                   | 43 |
| 5   | CONCLUSÃO.....                                     | 46 |
| 6   | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                   | 47 |

## 1 INTRODUÇÃO

Hodiernamente a arquitetura vem aumentando cada vez mais seus padrões de estéticas, deixando o concreto convencional menos usual, devido a adequação estrutural aos paramentos exigidos pela arquitetura. O concreto protendido, atualmente pouco utilizado no Brasil em obras residenciais, não chega nem a 15% do que é consumido nos EUA, é uma alternativa que atende muito bem os quesitos impostos pela arquitetura, devido a sua capacidade de suportar grandes vãos. Atualmente, o mercado da construção civil mostra-se cada dia mais competitivo, visto que o desenvolvimento de novos materiais, técnicas e inovações tecnológicas proporcionam alternativas ao que é convencionalmente executado. Usando como fator relativo o número de habitantes, o Brasil deveria consumir ao menos 65% do que é consumido nos EUA, atualmente mais 80% do mercado da construção civil norte americano consome o concreto protendido (DAL PRÁ, 2012).

Segundo a NBR 6118 ABNT 2014, o concreto protendido é aquele em que parte das armaduras é previamente alongada, com a finalidade de impedir ou limitar a fissuração e deslocamentos da estrutura em serviço e propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado limite último (ELU). Para o alongamento das armaduras, é necessário um sistema de ancoragem compostos por cones macho e fêmea e um macaco hidráulico. As aplicações da protensão englobam diversos tipos de obras, como pontes, viadutos, edifícios comerciais e pré-moldados (CHOLFE; BONILHA, 2013).

O concreto protendido se tornou viável em 1928, quando Eugène Freyssinet usou cordoalhas submetidas a grandes tensões no concreto, com o objetivo de eliminar ou tornar próximo de zero as tensões de tração do concreto. Quando os carregamentos produzem no concreto tensões de tração elevadas, maiores que as compressões induzidas pela protensão, o concreto sofre alongamentos, podendo atingir valores que provocam a ruptura do concreto por tração, produzindo fissuração da peça (PFEIL, 1984).

No Brasil o concreto protendido é pouco usado em obras residenciais, tendo a maior demanda em obras de infraestrutura. A média de consumo de cordoalhas em obras brasileiras são em média 45 mil toneladas/ano, tendo atingido seu pico em 2013 com 100 mil toneladas, a diminuição de cordoalha no Brasil se deve a redução de obras de infraestrutura nos últimos anos. A primeira obra que adotou o método de concreto protendido no Brasil foi a ponte do Galeão que dá acesso ao aeroporto internacional do Rio de Janeiro (SANTOS, 2018).

O concreto protendido em relação ao armado, além de possuir as estruturas de aço em seu interior, possui cabos de aços tracionados e ancorados no concreto, tendo um grande ganho na resistência de duas ou três vezes maior que no concreto armado (DAL PRÁ, 2012).

Dentre as principais vantagens do concreto protendido estão:

- Reduz as tensões de trações derivadas da flexão e esforço cortante;
- Reduz quantidade de aço e concreto;
- Admite com melhor economia grandes vãos em relação ao concreto armado;
- Maior liberdade arquitetônica;
- Dimensionamento de lajes e vigas com alturas menores comparadas ao concreto armado.

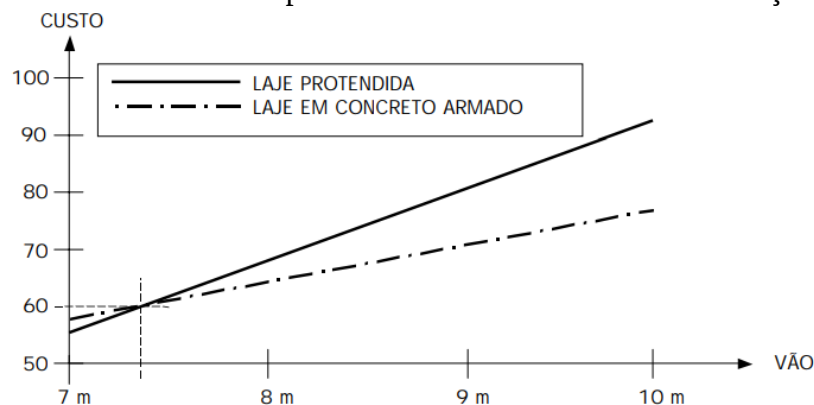
Na execução são utilizados sistemas especiais de protensão e é necessário um controle de qualidade mais rigoroso dos materiais e dos componentes executados. Enfim, requer-se uma maior disponibilidade tecnológica, o que inclui pessoal especializado e equipamentos geralmente de custo mais elevados (HANAI, 2005).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha de determinado sistema estrutural para a constituição de um espaço envolve uma série de variáveis, que vão desde questões muito concretas – como custos, mão de obra disponível, prazos e etc. – bem como questões delicadas, como valores sociais, culturais e até mesmo sensações e percepções (REBELLO, 2007).

Segundo Emerick, o concreto protendido é mais viável em relação ao concreto armado, quando utilizado como solução de vão de mais de 7 metros, como mostrado na figura 1.

Figura 1 – Custos do concreto protendido x concreto armado em função dos vãos.



Fonte: Emerick (2005)

O concreto protendido é um método construtivo que seria muito bem utilizado no Brasil, seu uso pode ir muito além de obras de infraestrutura, mas a falta da mão de obra especializada é um impasse para o crescimento do método no Brasil. Países da Europa, utilizaram o método para se reerguer após a Segunda Guerra Mundial, sendo usado em larga escala até os dias de hoje, principalmente na fabricação de pré-moldados. Suas vantagens são muito atrativas, principalmente economicamente nos com materiais e no tempo de execução (CARVALHO, 2012).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Comparar os custos diretos entre as concepções de projetos apresentadas de concreto armado e concreto protendido de um edifício residencial de quatro pavimentos localizado em Palmas Tocantins.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir as concepções estruturais;
- Modelagem da estrutura do edifício em software;
- Comparar custos diretos de serviços.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA ESTRUTURAL

O sistema estrutural de uma edificação, em particular é formado por um conjunto estável de elementos estruturais, projetados e construídos para sustentar e transmitir as cargas impostas até o chão de maneira segura, sem exceder os esforços permissíveis de seus elementos. Cada elemento estrutural possui características únicas e se comporta de maneira única sob cargas impostas. Contudo, antes que os elementos e componentes estruturais possam ser isolados para fins de estudo e resolução, é importante que o projetista entenda como o sistema estrutural acomoda e sustenta de maneira holística, as formas espaços e as relações programáticas e contextuais do projeto arquitetônico (ONOUYE; ZUBERBUHLER; CHING, 2015).

É importante estudar o contexto da obra antes de escolher o método estrutural mais indicado, analisando questões de tempo de execução, requisitos visuais, econômicos, questões espaciais do projeto arquitetônico e questões relacionadas com a região como mão de obra qualificada disponível e materiais.

#### 2.1.1 Concepção estrutural de edifícios

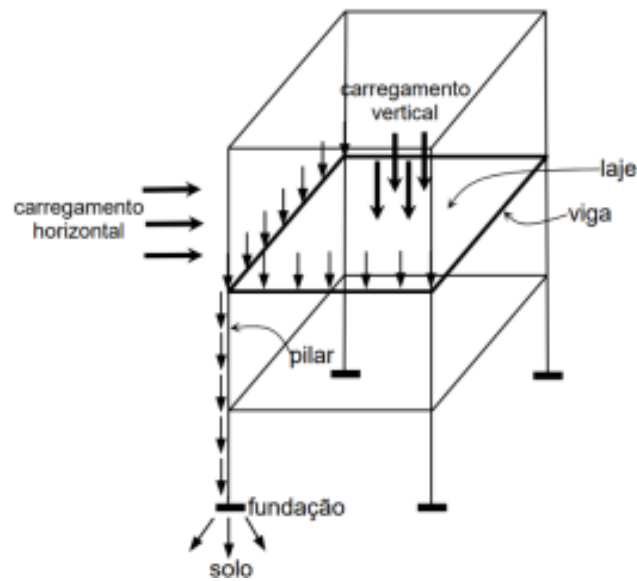
Essa etapa, uma das mais importantes no projeto estrutural, implica em escolher os elementos a serem utilizados e definir suas posições, de modo a formar um sistema estrutural eficiente, capaz de absorver os esforços oriundos das ações atuantes e transmiti-los ao solo de fundação (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

O projeto arquitetônico é a base para a elaboração do projeto estrutural. O lançamento de elementos como pilares, vigas e lajes devem respeitar os ambientes em todos os pavimentos que constitui uma edificação e os demais projetos complementares (hidráulico, elétrico, gás, sanitário, incêndio e etc.). Outro grande fator que deve ser levado em consideração é que a subestrutura deve estar de acordo com as características do solo no qual se apoia (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

É através do estudo de concepção que o sistema estrutural será definido, após análise dos quesitos impostos pelo projeto arquitetônico (como vãos, pé direito duplo, forma da fachada e etc.). Um exemplo é, em casos que o projeto arquitetônico haja solicitação por grandes vãos podemos optar pela protensão para deixar o elemento estrutural mais econômico.

Preferencialmente a transferência de cargas entre os pavimentos deve ser a mais direta possível como mostrado na Figura 2, evitando sempre que possível a utilização de vigas de transição. As vigas de transição, como podemos ver na Figura 3, são vigas que recebem pilares e transmite a carga para outros pilares, esse recebimento causa grandes solicitações, tendo como consequência o aumento da altura da viga e sua deformação, podendo causar problemas relacionado ao cálculo estrutural e compatibilização com o projeto arquitetônico.

Figura 2 – Transferência ideal de cargas em uma edificação.



Fonte: Rangel Lage (2019)

Figura 3 – Esquema estrutural de uma viga de transição.



Fonte: Rabelo (2012)

#### 2.1.1.1 Pré-dimensionamento de pilares

Para o pré-dimensionamento de um pilar, a área da seção transversal é pré-calculada por meio da carga total ( $P_{TOTAL}$ ) prevista no pilar, que é determinado por meio da Equação 1.

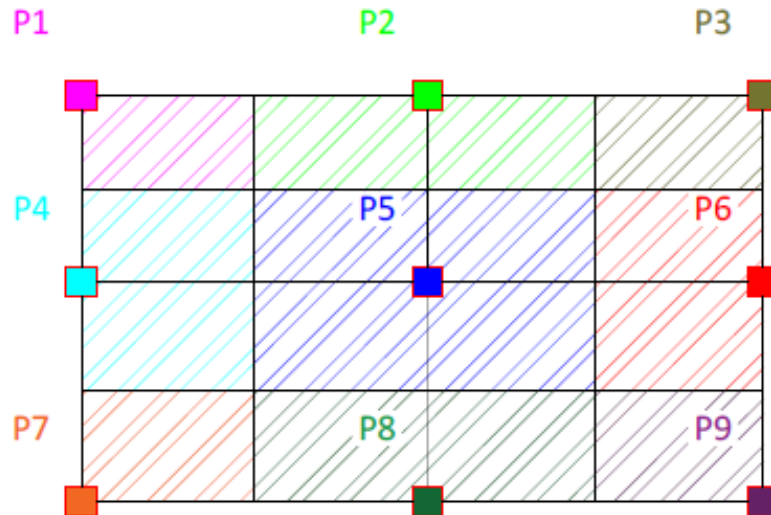
$$P_{TOTAL} = P_{PAV1} + P_{PAV2} + P_{PAV3} + ... + P_{PAVN} \quad (\text{Equação 1})$$

Para estipular a carga correspondente ao pilar de um pavimento, temos que determinar a área de influência do pavimento sob o pilar e multiplicar pela carga média ( $p_{méd.}$ ) do pavimento, como mostrada na Equação 2.

$$P_{PAVX} = A_{INFL} \times p_{méd} ; \text{ sendo } 10 \text{ kN/m}^2 \leq p_{méd} \leq 12 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Equação 2})$$

Para encontra a área de influência, é necessário traçar retas mediatrizes das retas que une os pilares e o contorno do pavimento, segue o exemplo na Figura 4.

Figura 4 – Traçados para encontrar as áreas de influência de cada pilar.



Fonte: Rangel, adaptada pelo autor (2022)

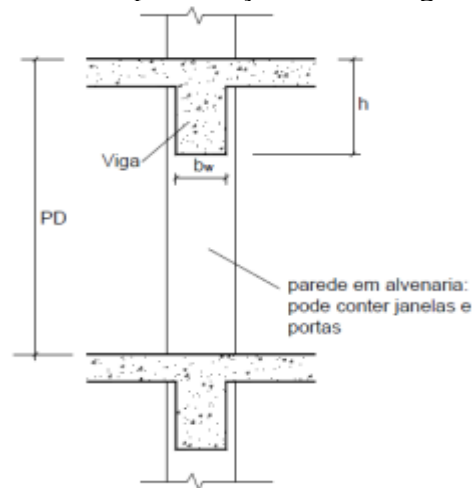
Após obter a carga estimada exigida ao pilar, usa-se a Equação 3, para obter a área da seção transversal do pilar. Segundo a NBR 6118, a área de seção transversal deve ser maior ou igual a 360 cm<sup>2</sup>, caso após os cálculos resultar em uma área de seção menor, usa-se o valor mínimo de 360 cm<sup>2</sup>.

$$A_{ST} = P_{TOTAL} / 0,5 \times F_{ck} \quad (\text{Equação 3})$$

#### 2.1.1.2 Pré-dimensionamento de vigas e lajes maciças

Geralmente a nervura de uma viga ( $b_w$ ) é definida por quesitos arquitetônico, como por exemplo espessura de alvenaria, já a altura ( $h$ ) pode-se calcular baseados no vão da viga analisada, usando a equação 4, sendo seu limite baseada no pé direito e na existência de portas e janelas. Segundo a NBR 6118, a largura mínima para uma viga é de 12cm e para viga parede de 15cm.

Figura 5 – Representação de uma viga.



Fonte: Rangel (2019)

$$h \cong \frac{L}{12} \text{ à } \frac{L}{10}, \text{ sendo } L \text{ vão do trecho da viga analisado.} \quad (\text{Equação 4})$$

O pré-dimensionamento de lajes pode ser feito através da Equação 5.

$$h_x = L_x / 40 \text{ ou } 45, \text{ onde } L_x \text{ é o menor vão.} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo que 40 é usado para laje maciça em concreto armado e 45 é usado para laje plana em concreto protendido.

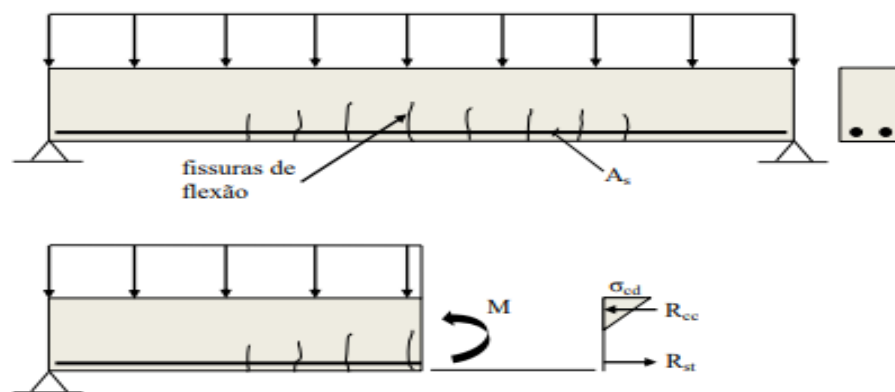
Lembrando que deve seguir os seguintes valores mínimos estabelecidos pela NBR 6118:

- 7 cm para lajes de cobertura que não estejam em balanço;
- 8 cm para lajes de piso ou lajes de cobertura em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total inferior ou igual a 30kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30kN;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes cogumelos.

## 2.2 CONCRETO PROTENDIDO

Um elemento de concreto armado bi apoiado submetida a carregamentos, irá está sob efeitos de tensão de compressão nas fibras superior e efeito de tensão de tração nas fibras inferiores. As armaduras no interior do concreto irão ajudar a aumentar a resistência do concreto para resistir aos esforços de compressão e por conseguinte a um futuro colapso. Porém, há situações em que somente a inclusão de armaduras passivas<sup>1</sup> não irá ser o bastante para suportar os esforços sem fissurar, como indicado na figura 6, ou será economicamente inviável (BASTOS, 2021).

Figura 6 - Viga de Concreto Armado fissurada e com diagramas.



Fonte: Bastos (2021)

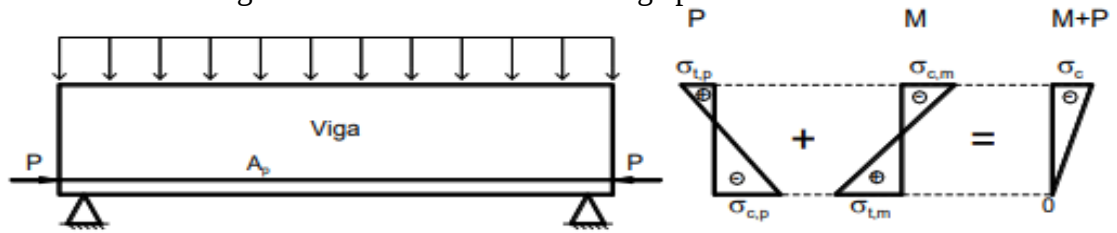
A solução para o problema de fissuração explicito na figura 6, é a protensão. A inserção de armadura ativa<sup>2</sup> ao ser alongada irá produzir esforços de compressão no interior do concreto, tornando os esforços nulos ou quase nulos.

No caso do elemento biapoiado exemplificado na figura 6, com a inserção da protensão irá reagir, quando estiver sob o momento fletor provocado pelo carregamento externo, induzindo esforços de compressão ( $\sigma_{c,M}$ ) nas fibras superior e esforços de tração ( $\sigma_{t,M}$ ), a força de protensão irá produzir esforços de compressão ( $\sigma_{c,P}$ ) nas fibras superiores e esforços de tração ( $\sigma_{t,P}$ ) nas fibras inferiores, gerando uma combinação onde o concreto da viga irá trabalhar somente à compressão, indicado na figura 7 (BASTOS, 2021).

<sup>1</sup> Armadura passiva: Segundo a NBR 6118/2014, armadura que não é usada para produzir forças de protensão.

<sup>2</sup> Armadura ativa: Segundo a NBR 6118/2014, armadura destinada à produção de forças de protensão.

Figura 7 – Tensões normais na viga protendida.



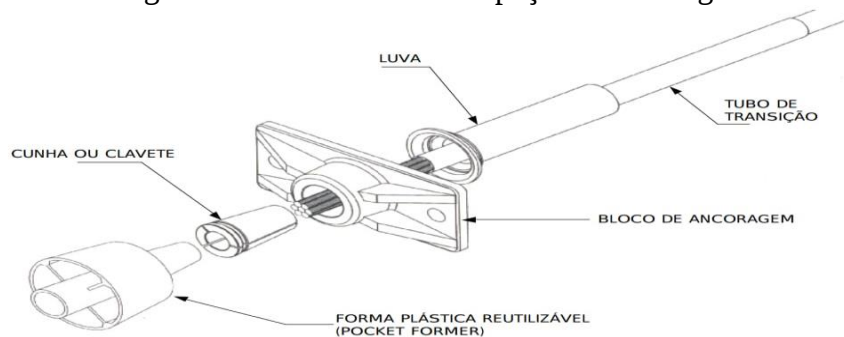
Fonte: Bastos (2021)

A operação da protensão, consiste na tração das armaduras ativas (cordoalhas ou barra de aço) utilizando um macaco hidráulico, esse procedimento pode ser executado antes ou depois da concretagem (BASTOS, 2021).

A classificação de elementos protendidos pode ser obtido considerando os mecanismos de aderência entre a armadura ativa e o concreto. Se classifica como pré-tração com aderência inicial, quando a aderência entre a armadura ativa e o concreto é se dá no momento da concretagem. Se classifica como pós-tração com aderência inicial, quando a aderência entre a armadura ativa e o concreto se inicia após a concretagem, o concreto tem que atingir a resistência ideal. Quando não tem aderência, é por que a armadura não irá ter contato direto com o concreto, geralmente serão usada cordoalha plastificada engraxada (CARVALHO 2017).

Durante a operação é necessário ancorar a cordoalha nas extremidades do elemento, para isso usa-se duas peças metálicas a cunha e a placa de ancoragem, outros apetrechos também usados são a luva e o tubo de transição, para evitar que o concreto entre em contato direto com o aço, e o pocket (no caso de pós-tração) usado para deixar o espaço do encaixe no macaco no concreto, todos os apetrechos são ilustrados na figura 8 (BASTOS, 2021).

Figura 8 – Detalhamento das peças da ancoragem.



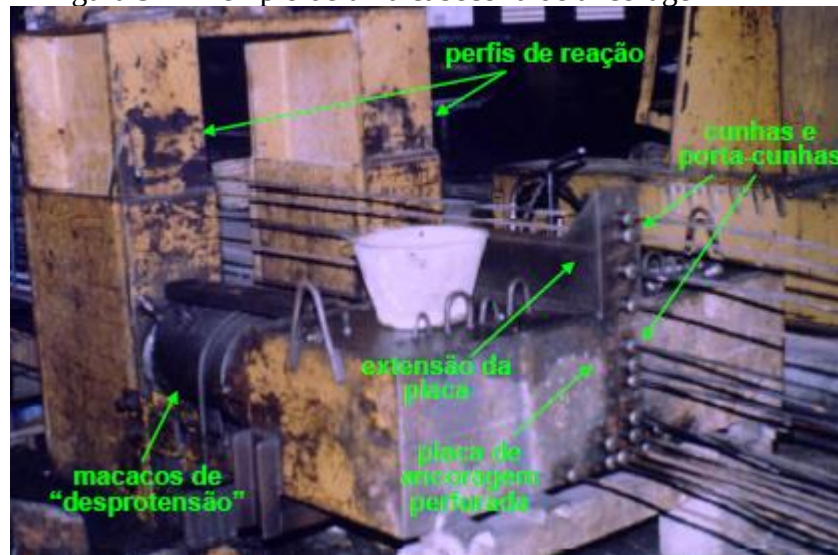
Fonte: Pereira (2021)

### 2.2.1 Concreto protendido pré-tração

Conforme o item 3.1.7 da NBR 6118, trata-se de concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é feito utilizando-se apoios independentes do elemento estrutural, antes do lançamento do concreto. Nesse caso, a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios é desfeita após o endurecimento do concreto; a ancoragem no concreto realiza-se só por aderência (CHOLFE E BONILHA, 2013).

A protensão com aderência inicial geralmente é utilizada em pistas de fabricação de elementos pré-moldados, onde a ancoragem provisória da armadura ativa é feita nos blocos de cabeceira como mostrado na figura 9 (HANAI, 2005).

Figura 9 – Exemplo de uma cabeceira de ancoragem

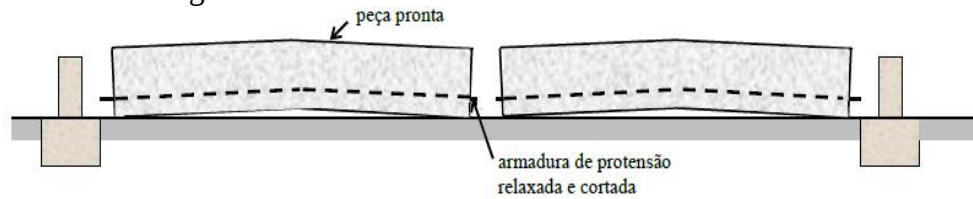


Fonte: Hanai (2005)

A execução desse método construtivo segue a seguinte sequência:

- 1) Posicionamento das formas e das armaduras passiva;
- 2) Fixação da armadura ativa na ancoragem passiva;
- 3) Na ancoragem ativa, a armadura ativa é alongada utilizando o macaco hidráulico;
- 4) Após o alongamento, as ancoragens ativas são fixadas para evitar o relaxamento da armadura ativa.
- 5) Lançamento do concreto;
- 6) Após o concreto atingir a resistência ideal, a armadura ativa é solta e/ou cortada ocorrendo o relaxamento, indicado na figura 10.

Figura 10 – Relaxamento da armadura ativa.



Fonte: Bastos (2021)

A protensão ocorre no relaxamento, a armadura ativa após ser alongada, tende voltar ao seu estado de deformação inicial, porém a ancoragem por aderência ao concreto restringe essa movimentação, a força dessa restrição gera esforços de compressão ao longo de toda seção transversal da peça. Este processo se denomina pré-tração com aderência inicial (Bastos 2021).

## 2.2.2 Concreto protendido pós-tração

### 2.2.2.1 Pós-tração sem aderência posterior

A pós-tensão sem aderência com o uso de cordoalha engraxada vem sendo muito aplicada no Brasil e no mundo nas últimas duas décadas, especialmente em lajes maciças e nervuradas, pisos industriais, vigas e em reforço estrutural (BASTOS, 2021).

Neste método não irá existir aderência entre a armadura ativa e o concreto, onde o alongamento da armadura é realizado após a concretagem, quando o concreto atingir a resistência ideal, as ancoragens ficam apoiadas no próprio elemento estrutural (CHOLFE; BONILHA, 2013).

A execução desse método construtivo segue a seguinte sequência:

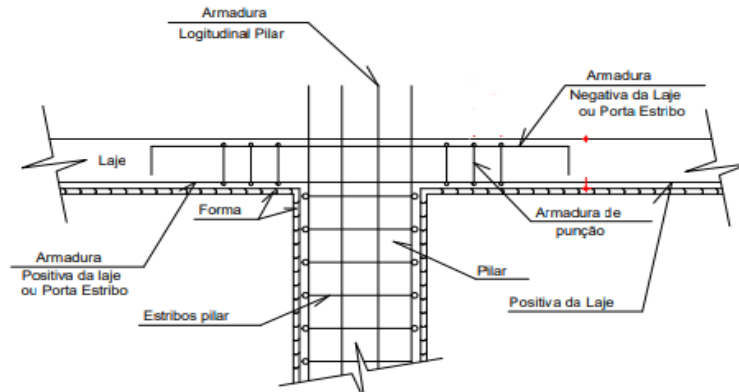
- 1) Cordoalhas são colocadas na forma, sendo fixado em uma extremidade (ancoragem passiva);
- 2) Concretagem;
- 3) Após o concreto atingir a resistência ideal, é executado o alongamento na parte da cordoalha da ancoragem ativa e fixada, com uso do macaco hidráulico.

Como não existe aderência entre as cordoalhas e o concreto, a força que comprime o concreto da peça concentra-se apenas nas extremidades do elemento estrutural (BASTOS, 2021).

Neste método construtivo, com a ausência de vigas, a laje é apoiada diretamente sobre os pilares, causando a punção, segundo a NBR 6118 é o fenômeno do pilar “furar a laje”.

Como forma de combater esses esforços usa-se a armadura de punção, mostrado na figura 11, está irá atuar capitando os esforços que chegam até o concreto (VIEIRA, PALHARES E LIMA, 2020).

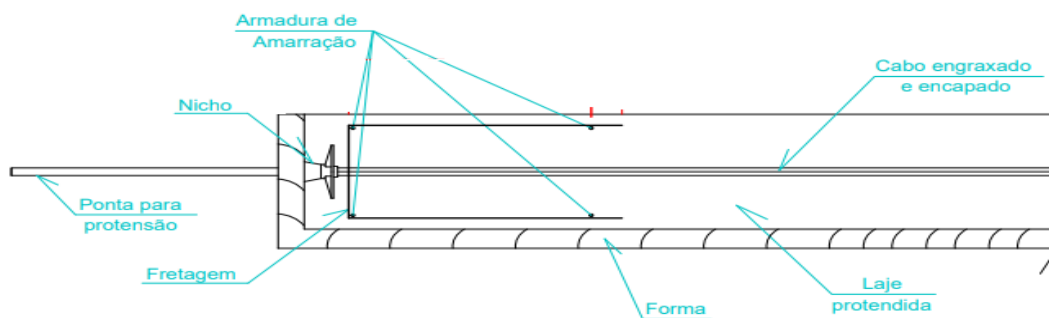
Figura 11 – Corte esquemático da armadura de punção



Fonte: TQS, adaptada pelo autor (2022)

Como a força da protensão ocorre nas extremidades, as regiões onde ficam a ancoragem ocorrem tensões de fendilhamento, sendo usado para combater esses esforços a armadura de fretagem, estas possuem o formato de “C” e irão ficar entre as placas de ancoragens, como mostrada na figura 12 (Rudloff, 20--).

Figura 12 – Corte de uma laje protendida



Fonte: TQS, adaptada pelo autor (2022)

#### 2.2.2.2 Pós tração com aderência posterior

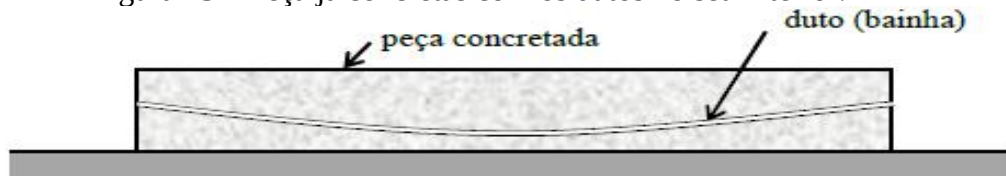
Segundo a NBR 6118 a prontensão com aderência posterior é a que o alongamento da armadura ativa é realizado após o concreto atingir a resistência ideal, sendo utilizado como apoio o próprio elemento estrutural, a aderência é criada com a injeção de concreto nos dutos.

Neste tipo de protensão, a armadura ativa é colocada solta em dutos ou bainhas e é ancorada nas extremidades da peça. Após lançado e endurecido do concreto, esta armadura é tensionada, injetando-se, em seguida, uma nata de cimento (*grout*), o qual proverá a aderência entre concreto e aço. Este método é muito utilizado para produção de peças pré-moldadas em canteiros para serem aplicadas em obras de infraestrutura (LEONHARDT, 2007).

A execução deste método construtivo segue a seguinte sequência:

- 1) Dutos são colocados no interior das formas, atravessando o elemento estrutural, indicado na figura 13;

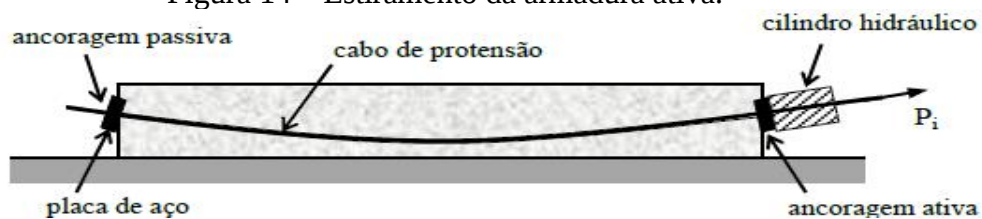
Figura 13 – Peça já concretada com os dutos no seu interior.



Fonte: BASTOS (2021)

- 2) O concreto é lançado envolvendo as armaduras passivas e os dutos;
- 3) Com o concreto endurecido, a armadura ativa é colocada dentro dos dutos;
- 4) Com o concreto atingindo a resistência ideal, ocorre o estiramento da armadura, indicado na figura 14;

Figura 14 – Estiramento da armadura ativa.



Fonte: BASTOS (2021)

- 5) Preenchimento da bainha com cimento ou grout.

O preenchimento das bainhas com nata de cimento sob pressão, serve para proteger o aço e criar aderência com o concreto, fazendo com que ambos os materiais trabalhem em conjunto, resultando num ganho na resistência a tração (BASTOS, 2021).

### 2.3 ESTADOS LIMITE

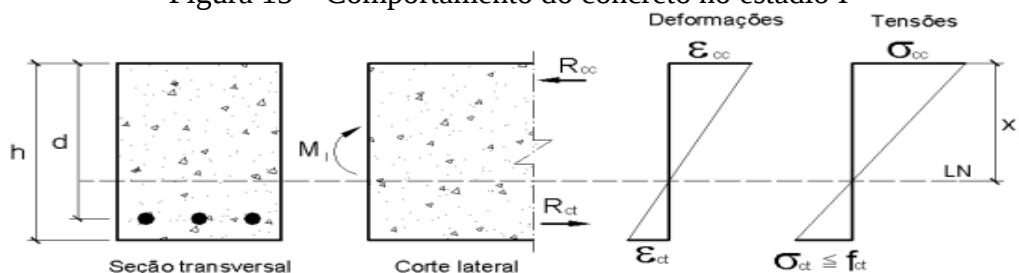
Ao dimensionar elementos estruturais há a obrigação de atender o estado de limite de serviço (ELS) e o estado limite último (ELU). O ELS está relacionado ao desempenho do elemento estrutural em condições de utilização, o qual é atingido quando a edificação deixa de ter seu uso pleno (deformações excessivas e grau de fissuração, por exemplo). O ELU está relacionado a segurança da estrutura, sendo alcançado quando o elemento atinge um colapso parcial ou total (KIMURA, 2007).

O concreto armado é dimensionado no estado limite de último e as verificações são feitas no estado limite serviço isso se dá pelo o fato no dimensionamento do concreto só se deve verificar as flechas e as formações de fissuras para a condição de serviço. Já o concreto protendido segue um caminho inverso, o dimensionamento é feito no estado limite de serviço e as verificações são feitas no estado limite último, pois no dimensionamento o objetivo é que o elemento estrutural não tenha flechas exageras e aberturas de fissuras exageras, entende-se por exagerada ultrapassar os limites impostos pela NBR 6118 (SANTOS, 2017).

O procedimento para determinar os comportamentos da seção de um elemento estrutural em concreto consiste em aplicar um carregamento, no qual o momento fletor se inicia do zero e vai até a ruptura. São divididos em três etapas -estádio I, estágio II e estágio III, à medida que o comportamento da seção transversal se altera, um estágio é finalizado e dando início ao outro (PINHEIRO, MUZARDO E SANTOS, 2004).

No estágio 1 o concreto está sob efeito de um momento fletor  $M_I$  de pequena intensidade, não ultrapassando a resistência a tração do concreto. Nesse estágio não irá aparecer fissuras visíveis, o diagrama de tensão é linear ao longo da seção e proporcional às deformações, como indicado na figura 15 (CARVALHO, 2017).

Figura 15 – Comportamento do concreto no estágio I



Fonte: PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS (2004)

O estágio 1, é relevante no dimensionamento para a realização do cálculo do momento de fissuração, com este é possível determinar a armadura mínima, que irá ser capaz de resistir os esforços de um momento fletor de mesma magnitude (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

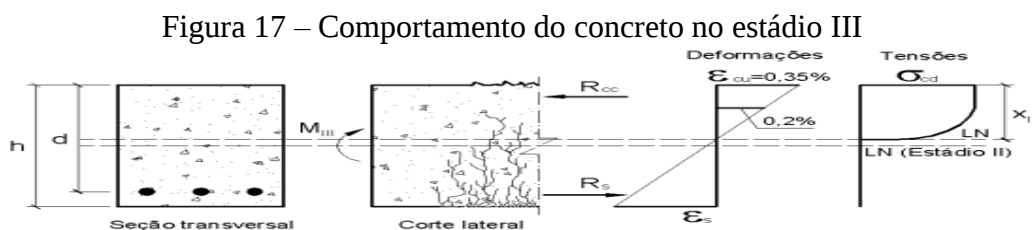
Com o início da fissuração se inicia o estágio 2, neste o momento fletor é  $M_{II}$  ( $M_{II} > M_I$ ), fazendo com que as tensões de tração nos pontos abaixo da linha neutra irão ser superiores aos da resistência característica do concreto à tração. Nesse estágio apenas o aço no interior do concreto começa a resistir à tração, o diagrama de tensão de compressão continua linear, as fissuras originadas da tração do concreto começam ser visíveis, como indicado na figura 16. Nesse estágio a lei de Hooke<sup>3</sup> ainda permanece, pois o concreto ainda se comporta de maneira elástica (CARVALHO, 2017).



Fonte: PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS (2004)

No estágio II irá ocorrer a verificação da peça no estágio limite de serviço de abertura de fissuras e de deformações excessivas (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

Quando o concreto inicia a plastificação se dá início ao estágio 3, neste o momento fletor é aumentado para  $M_{III}$  ( $M_{III} > M_{II}$ ) no qual irá ficar próximo da ruína. Nesse estágio o elemento estrutural está com muitas fissuras, com quase todas as fibras trabalhando com sua resistência máxima, sendo que a fibra mais comprimida começara a escoar, o diagrama de tensão começa a aderir formato de parábola, como indicado na figura 17. (CARVALHO, 2017).



Fonte: PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS (2004)

<sup>3</sup> Lei de Hooke: Quando uma força deforma o elemento estrutural, outra força restauradora passa ser exercida na mesma direção e sentido oposto.

Neste estágio o concreto já está completamente fissurado a ponto de ocorrer a ruptura e de atingir a deformação plástica da armadura. É nesse estágio que é determinado o momento de ruptura e a verificação no estágio limite último (MESQUITA, 2008).

Com base na Tabela 2, desprende-se que quando o concreto protendido é introduzido deve-se realizar as verificações do estado limite último no ato da protensão (ELU-ATO) e dos estados limites de serviço de formação de fissura (ELS-F) e de descompressão (ELS-D). Sendo assim o ELU-ATO, ELS-F e ELS-D são fundamentais no cálculo da armadura longitudinal.

Na protensão a ordem sequencial seria ELS-D, ELS-F, ELS-W e ELS-DEF.

### **2.3.1 Estado limite de serviço formação de fissuras (ELS-F)**

Esse estado limite é atingido quando a tensão de tração é maior que a resistência característica do concreto, resultando na abertura da primeira fissura (NBR 6118, ABNT 2014).

### **2.3.2 Estado limite de serviço de abertura de Fissuras (ELS-W)**

Esse estado de limite é atingido quando as fissuras existentes no elemento estrutural apresentam aberturas iguais ao máximo especificada pela tabela 2 (NBR 6118, ABNT 2014).

Vale ressaltar que as fissuras no concreto protendido aparecem com menos frequência, porém são mais nocivas tendo em vista que existe a possibilidade de corrosão sob tensão. Por este motivo a norma possui maior exigências de abertura de fissuras em concreto protendido (NBR 6118, ABNT 2014).

### **2.3.3 Estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF)**

Esse estado limite é atingido quando as flechas atingirem valores maiores que os limites da norma NBR 6118, sendo essa flexão máxima calculada entre  $L/250$  a  $L/350$  (NBR 6118, ABNT 2014).

### **2.3.4 Estado limite de serviço de descompressão (ELS-D)**

Esse estado limite é atingido quando em um ou mais pontos da seção transversal a tensão normal é nula, não existindo tração no restante da seção (NBR 6118, ABNT 2014).

### 2.3.5 Estado limite último

Em elementos estruturais protendidos, as armaduras ativas geram um aumento significativo para a segurança no estado limite último e de serviço. No estado limite último as armaduras ativas com aderência e sem aderência trabalham de maneiras diferentes, pois quando não há aderência não há compatibilidade de deformação entre a armadura ativa e o concreto, por consequência o acréscimo de tensão na armadura originado do carregamento não depende da seção, mas sim da deformação. O estado limite último no concreto armado não é relevado na verificação, pois nele o momento solicitante de cálculo é significativamente maior ao que se pode atuar nas condições do estado limite de serviço (NAAMAN; ALKHAIRI, 1991; MANISEKAR e SENTHIL, 2006; LOU; LOPES; LOPES, 2013).

#### 2.3.5.1 Estado limite último no ato da protensão (ELU-ATO)

Usualmente a protensão é aplicada para baixas idades do concreto, entre 3 a 15 dias após a concretagem, podendo acontecer fissuras nas regiões tracionadas e a ruptura do concreto nas regiões comprimidas, tornando obrigatória a verificação da segurança da peça, tendo como carregamentos a protensão e as ações por ela mobilizadas, sendo considerada a resistência do concreto conforme sua idade na data de protensão. Esta verificação indicará em que condições a protensão precisa ser aplicada (uma ou mais etapas) e quais as providências complementares decorrentes das tensões geradas por ela (CHOLFE; BONILHA, 2013).

### 2.4 GRAU DE PROTENSÃO

As armaduras ativas e passivas contribuem para a resistência de um elemento estrutural, ao variar as quantidades dessas armaduras temos o grau de proteção que varia entre o concreto armado (sem armadura protendida) e o concreto protendido (sem armadura convencional) (LEONHARDT, 2007).

Segundo a NBR 6118, os tipos e o grau de protensão estão relacionados com a durabilidade das peças. As armaduras ativas estão mais propensas à corrosão do que as armaduras passivas, pois devido às grandes tensões que atuam sobre elas, há a chance de iniciar uma corrosão por tensão, sendo assim deve-se aumentar os cuidados em relação à fissuração no concreto protendido (CARVALHO, 2017).

Há três tipos de protensão, a protensão completa; protensão limitada e a protensão parcial. A definição da protensão é feita após estudo do grau de agressividade do meio ambiente e do tipo de construção. Para auxiliar na definição do grau de proteção pode-se consultar a tabela 1 e a tabela 2 e as combinações de serviço (quase permanente<sup>4</sup>, frequente<sup>5</sup> e raras<sup>6</sup>, sendo a permanente com a carga mais leve e a rara com carga mais pesada). Os níveis de protensão estão relacionados a forças que serão aplicadas no elemento estrutural e a proporção de armadura ativa e passiva que necessita a utilização.

Tabela 1 – Classificação do grau de agressividade ambiental.

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|-----------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| I                                 | Fracas        | Rural                                                          | Insignificante                     |
|                                   |               | Submersa                                                       |                                    |
| II                                | Moderada      | Urbana <sup>a, b</sup>                                         | Pequeno                            |
| III                               | Forte         | Marinha <sup>a</sup>                                           | Grande                             |
|                                   |               | Industrial <sup>a, b</sup>                                     |                                    |
| IV                                | Muito forte   | Industrial <sup>a, c</sup>                                     | Elevado                            |
|                                   |               | Respingos de maré                                              |                                    |

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (2014)

<sup>4</sup> Combinações de serviço quase permanente: Ações que podem atuar durante grande parte do período da vida da estrutura.

<sup>5</sup> Combinações de serviço frequente: Ações que se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura.

<sup>6</sup> Combinações de serviço raras: Ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura.

Tabela 2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e a proteção de armadura em função das classes de agressividade ambiental.

| Tipo de concreto estrutural                      | Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão | Exigências relativas à fissuração  | Combinação de ações em serviço a utilizar |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|
| Concreto simples                                 | CAA I a CAA IV                                              | Não há                             | —                                         |
| Concreto armado                                  | CAA I                                                       | ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm            | Combinação 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 com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II           | ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm            | Combinação frequente                      |
| Concreto protendido nível 2 (protensão limitada) | Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV        | Verificar as duas condições abaixo |                                           |
|                                                  |                                                             | ELS-F                              | Combinação frequente                      |
|                                                  |                                                             | ELS-D <sup>a</sup>                 | Combinação quase permanente               |
| Concreto protendido nível 3 (protensão completa) | Pré-tração com CAA III e IV                                 | Verificar as duas condições abaixo |                                           |
|                                                  |                                                             | ELS-F                              | Combinação rara                           |
|                                                  |                                                             | ELS-D <sup>a</sup>                 | Combinação frequente                      |

<sup>a</sup> A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com  $a_p = 50$  mm (Figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 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.

Fonte: NBR 6118 (2014)

#### 2.4.1 Protensão parcial

Com base na tabela 2, conclui-se que a protensão parcial permite a abertura de fissuras, desde que as aberturas respeitem os limites impostos pela NBR 6118 na combinação frequente, despreendendo que a peça está no estágio 2. A preocupação está relacionada a determinação do nível rigidez de uma peça fissurada, dificultando na quantificação da flexa.

#### 2.4.2 Protensão limitada

Com base na tabela 2, conclui-se que nunca irá ter fissuras no elemento estrutural em combinação quase permanente pois estará sendo verificado no estado limite de descompressão, ou seja a peça estará sempre tracionada, podendo ter a formação de uma fissura na combinação frequente. A grande vantagem desse tipo de protensão é na descoberta da flexa, pois estará no estágio 1, necessitando apenas de ter uma estimativa boa do módulo de elasticidade do concreto.

### **2.4.3 Protensão completa**

Com base na tabela 2, conclui-se que nesse tipo de protensão para ser executado necessitará ter um elevado custo, pois a verificação de descompressão irá ser realizada na combinação rara e a formação de fissuras na combinação frequente. Este método é usado quando a estrutura não pode ter fissuras de maneira alguma, por exemplo um reservatório de água.

### 3 METODOLOGIA

Quando se define o sistema sem estudos comparativos para uma determinada arquitetura, pode-se gerar consequência chance de aumentar o custo diretos da execução do empreendimento. Na hora da seleção do método construtivo é necessário não ter a mente limitada ao tradicional, pois ao definir algum sistema não adequado poderá gerar impacto financeiro, de tempo de execução, da imagem final do produto e vários outros grandes fatores.

Este estudo é dividido em sete etapas análogas a definição do melhor sistema:

- Definição dos softwares;
- Definição do empreendimento;
- Definição dos fatores locais (ação do vento, coeficiente de atrito entre o solo e estrutura, Fck, fator do terreno, agressividade do ambiente etc.);
- Concepção estrutural;
- Verificação dos estados limites;
- Cálculo dos custos diretos.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DOS SOFTWARES

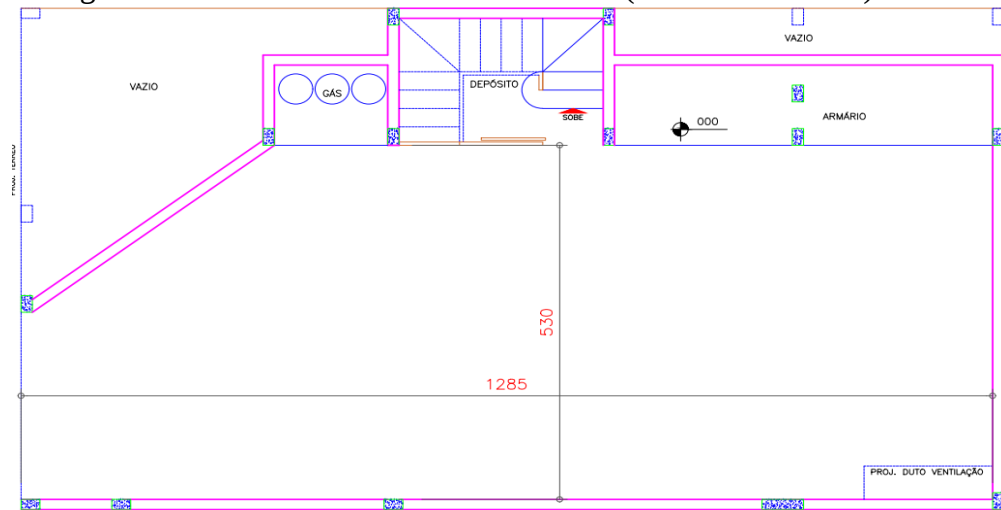
O software é uma ferramenta que auxilia o engenheiro ao dimensionar a sua estrutura seguindo as normas impostas pelas NBRs, salientando que o mesmo não irá trabalhar sozinho sem uma mente com os devidos estudos o operando. Para este estudo foi utilizado o software TQS versão 23 Plena.

#### 3.2 DEFINIÇÃO DO EMPREENDIMENTO

O empreendimento escolhido foi uma residência familiar com 305,4m<sup>2</sup> de área construída, divididos em quatro pavimentos (subsolo, térreo, superior e cobertura), ilustrados no APENDICE A – PLANTAS BAIXA DOS PAVIMENTOS E CORTES DO EMPREENDIMENTO.

O edifício foi selecionado por apresentar limitações de concepção estrutural ocasionado pela existência do subsolo com garagem, que por consequência diminui as opções de uma locação com pilares contínuos, outra consequência implicada pela existência do pavimento são os grandes vãos, ilustrado na figura 18.

Figura 18 – Dimensões dos vãos do subsolo (dimensões em cm)



Fonte: Autor (2022)

### 3.3 DEFINIÇÃO DOS FATORES LOCAIS

Considerando que o edifício residencial irá ser executado na quadra Orla 14, localizado no Plano Diretor Sul de Palmas Tocantins, os fatores locais serão:

- Velocidade do vento será de 30 m/s;
- Classe II de agressividade ambiental;
- Categoria II de rugosidade;
- Fator estatístico será 1,0.
- Resistência do concreto para o projeto em concreto armado convencional de 30MPa;
- Resistência do concreto para o projeto em concreto protendido de 35MPa;
- A sondagem do solo estará localizada no APÊNDICE B – SONDAGEM DO SOLO DO EMPREENDIMENTO.

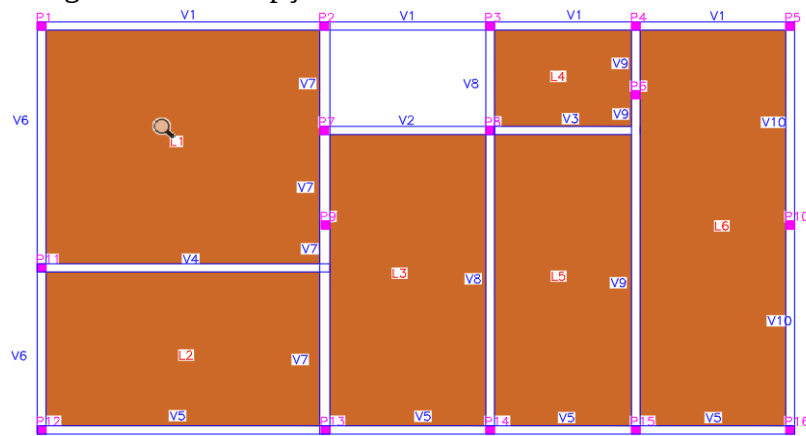
### 3.4 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

As dimensões dos pilares, vigas e lajes foram feitas seguindo o roteiro estabelecido no item 2.1.1 deste trabalho, no projeto em concreto armado com laje maciça foi evitado o máximo possível vão maiores que 5 metros e para o concreto protendido com laje lisa evitou-se vão maiores que 8 metros.

### 3.4.1 Concreto Armado

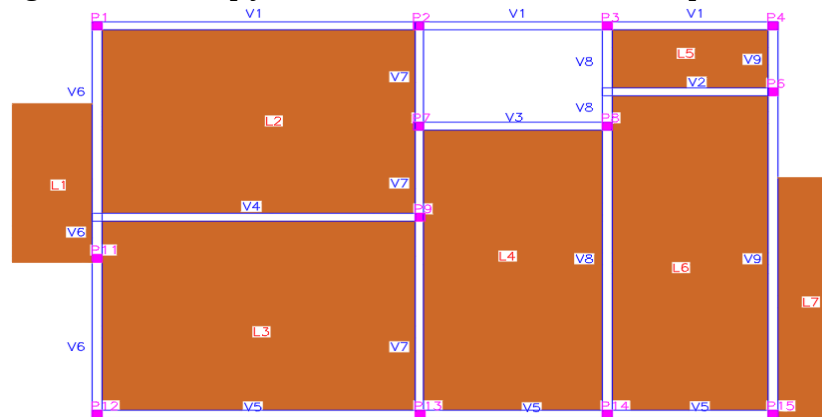
A concepção estrutural foi feita seguindo a ordem de pilares, vigas e lajes. Não foi possível manter em todos os casos as dimensões dos vãos recomendadas para o sistema estrutural, devido à exigências impostas pela arquitetura do imóvel, chegando o maior vão a 5,95 metros. Nas figuras 19, 20 e 21 é demonstrado as concepções estruturais da estrutura de concreto armado em laje maciça após primeira análise.

Figura 19 - Concepção estrutural inicial do subsolo.



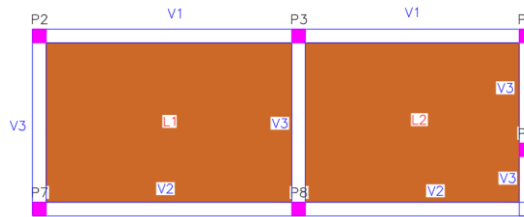
Fonte: Autor (2022)

Figura 20 - Concepção estrutural inicial do térreo e superior



Fonte: Autor (2022)

Figura 21 – Concepção estrutural inicial cobertura



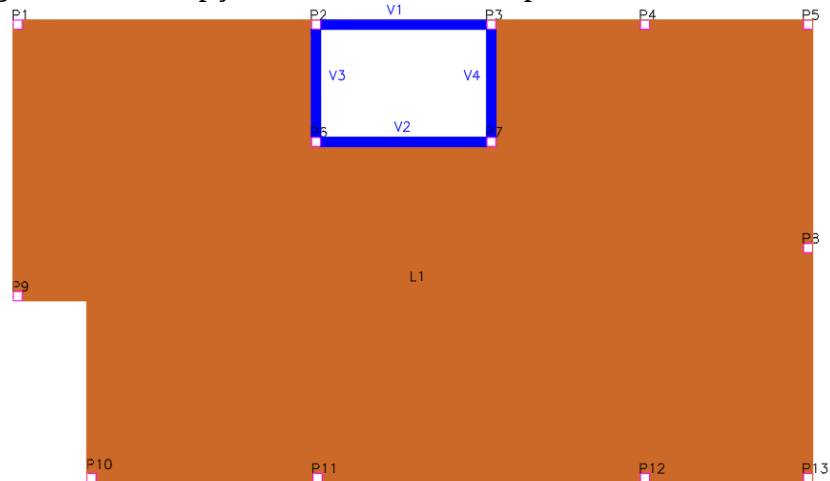
Fonte: Autor (2022)

No subsolo (figura 20) houve a necessidade da adição de um pilar (P9) invadindo a área aberta da garagem, a custo de diminuir os custos do projeto, o mesmo pilar nos pavimentos superiores ficou embutido devido a existência de parede na mesma localização.

### 3.4.2 Concreto Protendido

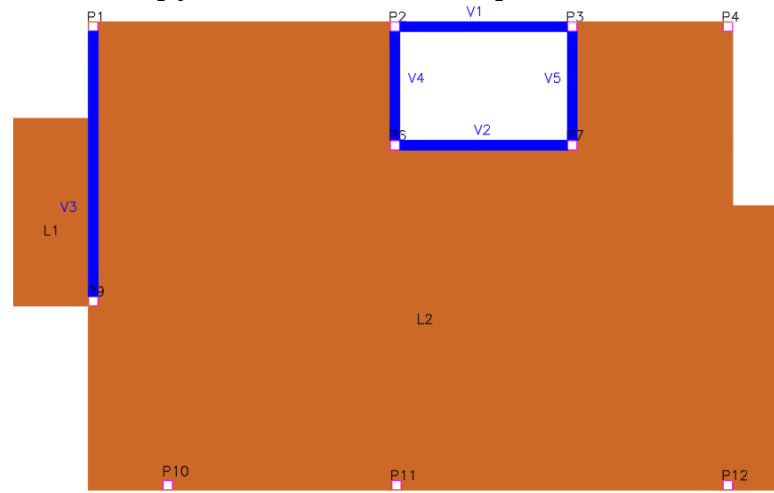
No projeto em concreto protendido com laje lisa optou-se por ter vigas somente nas regiões da escada e quando houver divisas com lajes em balanço. As lajes tem altura de 15 centímetros de início. Para o pré-dimensionamento dos pilares foi seguido o passo a passo indicado no item 2.1.1. Nas figuras 22, 23 e 24 ilustra-se as concepções estruturais dos pavimentos do imóvel.

Figura 22 - Concepção estrutural inicial do pavimento subsolo



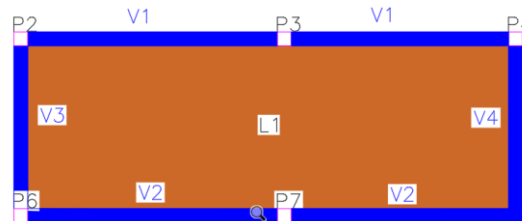
Fonte: Autor (2022)

Figura 23 - Concepção estrutural inicial dos pavimentos térreo e superior



Fonte: Autor (2022)

Figura 24 - Concepção estrutural inicial do pavimento cobertura



Fonte: Autor (2022)

Na concepção inicial da estrutura em concreto protendido não houve necessidade de colocar pilares que invadem as áreas livres dos cômodos. A opção por vigas foi na divisa da laje geral do imóvel com uma sacada, na região da sacada e no último pavimento onde não houve protensão.

### 3.5 MODELAGEM ESTRUTURAL

Nos projetos foi considerado tijolos com 15 cm de espessura, com carga de  $0,18\text{tf/m}^2$ , sendo que para determinar a carga total da parede multiplica-se a carga pela altura do pé direito do pavimento menos a altura da viga superior. Na laje em concreto armado com laje maciça foi usado a carga dos softwares indicadas para cada cômodo, na laje plana em concreto protendido utilizou-se carga permanente de  $0,10\text{tf/m}^2$  e carga acidental de  $0,15\text{tf/m}^2$ .

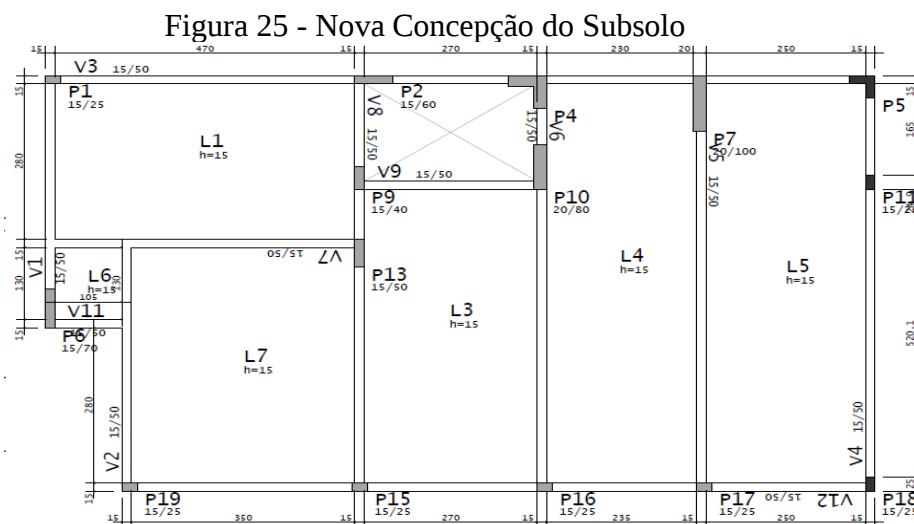
Os elementos em concreto armado foram verificados no estado limite último quanto a capacidade de carga. Já os elementos em concreto protendido com laje lisa foram verificados no estado limite último quanto a verificação de carga e de estados limites no ato da protensão.

Outras verificações feitas foram em relação ao estado limite de serviço de deformações excessivas, no concreto armado e concreto protendido, para não haver um desconforto visual, nem provocar rachaduras em paredes e não ocorrer casos de deformações de portas com esquadrias metálicas. No estado limite de abertura de fissuras foram verificadas também, no concreto protendido com laje lisa, para evitar possíveis corrosões.

O software TQS versão Plena realiza a análise e dimensionamento da estrutura conforme as normas brasileiras e seu processo de cálculo utiliza o método de grelhas associado ao pórtico espacial. Para o processamento da estrutura foi possível realizar a análise estática linear, dimensionamento dos elementos, análise dinâmica da grelha, determinação de flecha nos pórticos e determinação de flecha nas lajes.

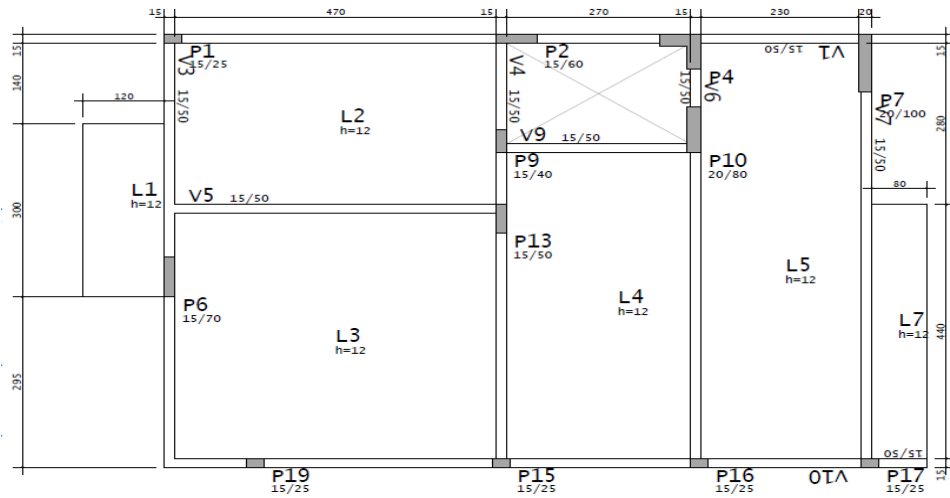
### 3.5.1 Concreto Armado

No primeiro processamento com a concepção estrutural inicial foram encontrados 24 avisos graves divididos entre, dimensionamento impossível de pilar; dimensionamento impossível de viga e lajes e flechas de deformações além dos limites, para corrigir os erros foi aumentado as dimensões dos elementos por consequência à inércia. Após análises e estudos introduziu-se uma nova concepção, mostradas nas figuras 25, 26, 27 e a imagem em 3D na figura 28 devido a necessidade de retirar ou alterar a posição dos elementos do projeto.



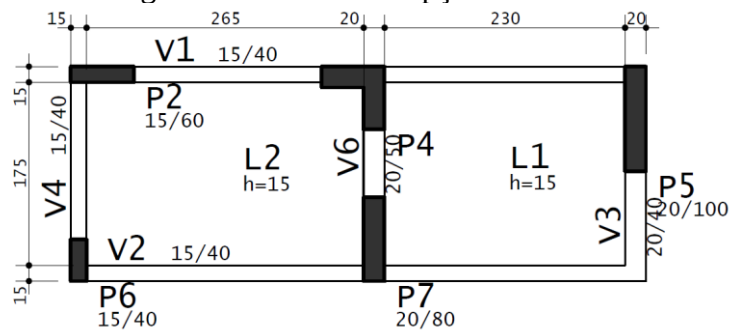
Fonte: Autor (2022)

Figura 26 – Nova concepção Térreo e Superior



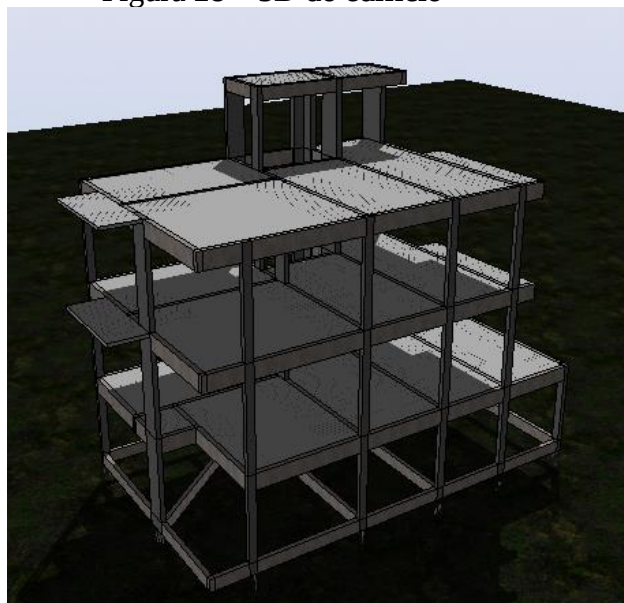
Fonte: Autor (2022)

Figura 27 – Nova concepção Cobertura



Fonte: Autor (2022)

Figura 28 – 3D do edifício

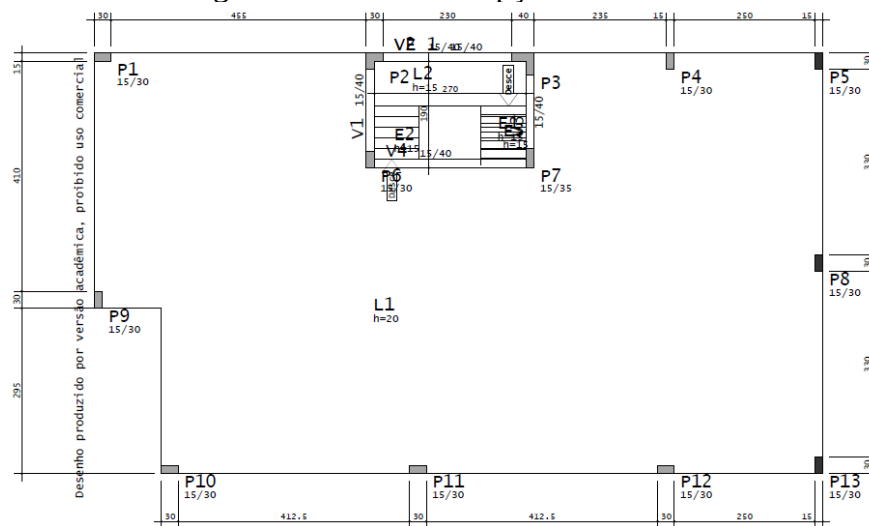


Fonte: Autor (2022)

### 3.5.2 Concreto Protendido

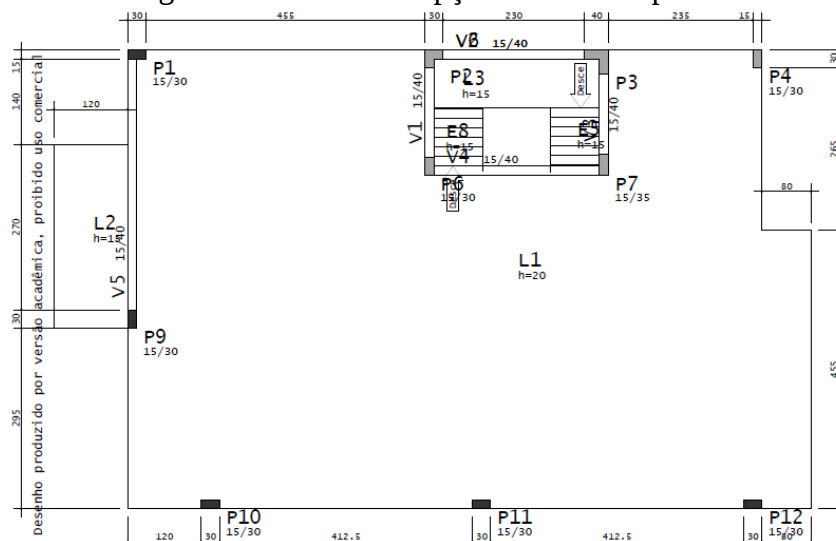
Após simular a concepção inicial no software TQS versão Plena, foram encontrados 10 avisos graves divididos entre dimensão de pilar impossível e desaprumo global, vale ressaltar que nesse primeiro processamento são calculados apenas os esforços das lajes, sendo introduzido armadura protendida e não protendida após a introdução dos cabos de protensão. Após análises os erros indicados foram corrigidos e a concepção mudada com o intuito de melhorar a economia de materiais, ilustrando-se essas novas concepções nas figuras 29, 30 e 31 e o modelo estrutural em 3D pode ser visto na figura 32.

Figura 29 - Nova Conceção do Subsolo



Fonte: Autor (2022)

Figura 30 - Nova concepção Térreo e Superior



Fonte: Autor (2022)



## 4 RESULTADOS

Finalizado o dimensionamento das duas estruturas, foi possível realizar o levantamento do quantitativo de materiais e mão de obra, seguindo dos custos diretos, podendo ser encontrado no APÊNDICE C. Sendo possíveis análises para a geração de relatórios de comparações dos quantitativos de preços para a execução das estruturas.

Para a arquitetura apresentada sistema estrutural no qual o custo saiu mais em conta foi em concreto protendido com laje maciça com o total de R\$ 182.854,44 enquanto o custo da estrutura em concreto armado com laje maciça ficou com um total de R\$ 194.973,65, chegando a uma diferença de 6,22%, na tabela 3 pode-se analisar com mais detalhes a diferença de custos por pavimento de cada método estrutural.

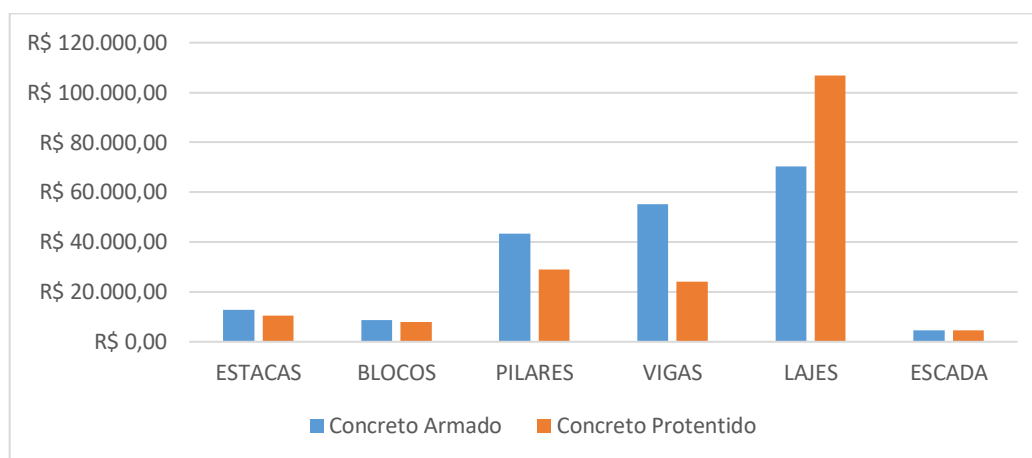
Tabela 3 – Comparação de custos por pavimento

|           | Concreto Armado | Concreto Protendido |
|-----------|-----------------|---------------------|
| BALDRAME  | R\$ 36.064,31   | R\$ 30.128,77       |
| SUBSOLO   | R\$ 52.547,98   | R\$ 52.488,86       |
| TÉRREO    | R\$ 47.459,15   | R\$ 50.242,78       |
| SUPERIOR  | R\$ 47.890,64   | R\$ 42.602,95       |
| COBERTURA | R\$ 11.011,58   | R\$ 9.391,08        |
|           | R\$ 194.973,65  | R\$ 182.854,44      |

Fonte: Autor (2022)

Com base na tabela 3 percebe-se que o único pavimento no qual a estrutura de concreto armado com laje maciça saiu mais em conta que a estrutura de concreto protendido com laje lisa foi o térreo com uma diferença de R\$ 2.693,00 ou de 5,54%. Em relação aos demais pavimentos o pavimento baldrame no concreto protendido com laje lisa saiu R\$ 5.935,54 ou 16,46% mais barato, essa economia se deve pela diferença no número de pilares, enquanto a estrutura de concreto armado tem 18 pilares, a estrutura de concreto protendido tem 13 pilares, tendo como resultado a redução dos custos com bloco e estacas. O subsolo houve custos semelhantes com diferença de R\$ 59,12 ou 0,01%, a introdução do pilar 13 garagem na estrutura de concreto armado colaborou para o equilíbrio do preço. No pavimento superior houve uma diferença significativa no custo, pois neste nível do imóvel há uma área aberta, sem paredes, fazendo com que vigas aumenta a diferença de preço das estruturas em R\$ 5.287,66 ou 11%. No gráfico 1 é possível ver o custo geral de cada elemento por método construtivo.

Gráfico 1 – Comparação por elemento estrutural



Fonte: Autor (2022)

Após analisar o gráfico é possível que a maior diferença está na laje, sendo em concreto protendido com custo mais elevado, a qual é de R\$ 36.407,51 ou de 34%, essa desavença se justifica pelo motivo da não existência ou redução no número de viga, faz com que aumenta a quantidade de kg de aço na laje juntamente com a introdução das cordoalhas. Na estrutura em concreto protendido há também uma redução no custo de pilares, blocos e estacas, devido à redução no número de pilares, essa diferença é de 17.282,79 ou de 27%. Em relação as vigas a estrutura em concreto armado terão o maior custo, pois fazem parte da concepção do método estrutural em contrapartida é possível fazer uma estrutura sem vigas usando o concreto protendido, a diferença é de R\$ 31.243,93 ou de 56%. No gráfico 2, pode-se ver a comparação de aço, forma e concreto separados por elemento estrutural. As comparações das estruturas das escadas não são relevantes, tendo em vista os valores são muito próximos.

Tabela 4 – Comparação de gastos de concreto, forma e aço por elemento

|               | CONCRETO ARMADO |             |          | CONCRETO PROTENDIDO |             |          |
|---------------|-----------------|-------------|----------|---------------------|-------------|----------|
|               | CONCRETO (m³)   | FORMAS (m²) | AÇO (kg) | CONCRETO (m³)       | FORMAS (m²) | AÇO (kg) |
| <b>ESTACA</b> | 10,85           | 0           | 541,22   | 8,89                | 0           | 457,43   |
| <b>BLOCO</b>  | 5,1             | 24,4        | 182,27   | 4,1                 | 20,4        | 150,06   |
| <b>PILAR</b>  | 12              | 180,56      | 1067,21  | 5,97                | 113,2       | 975,59   |
| <b>VIGAS</b>  | 17,33           | 234,01      | 1274,77  | 6,22                | 89,05       | 427,06   |
| <b>LAJES</b>  | 31,31           | 229,8       | 2231,09  | 49,43               | 251,2       | 3122,73  |
| <b>ESCADA</b> | 5,91            | 15,08       | 150,73   | 5,86                | 14,93       | 150,73   |
|               | 79,5            | 683,85      | 5447,29  | 80,47               | 488,93      | 5283,6   |

Fonte: Autor (2022)

Ao analisar a tabela 4, percebe-se que em relação ao uso de concreto armado os valores são próximos, porém o concreto protendido exige concretos usinados mais resistentes, ou seja, com preços bastantes elevados, sendo o concreto da estrutura protendida 23% mais cara que o da estrutura convencional. Um fato a se relevar na comparação dos métodos estruturais são as quantidades de formas em vigas e lajes, pois o custo do metro quadrado gastos em vigas é 29% mais elevados do que em lajes, além do tempo de fabricação ser mais rápido. Os custos em relação ao aço se baseiam na quantidade de elementos, no caso do imóvel apresentado conseguiu uma redução no número de pilar na estrutura em concreto protendido fazendo com que menos aço seja usado.

Outro fator que pode relevar é a existência de elementos estruturais aparentes no meio de cômodos, no caso do imóvel há um pilar no meio da garagem, diminuindo a quantidade de automóveis que a garagem pode abrigar, podendo gerar uma certa desvalorização no imóvel por consequência.

## 5 CONCLUSÃO

Depreende-se que para arquitetura do imóvel apresentado para ser executada na cidade de Palmas Tocantins, o sistema estrutural em laje maciça protendida demonstrou ter menores custos diretos do que a estrutura em concreto armado em laje maciça, principalmente na parte de mão de obra e materiais na carpintaria e na parte de armação de pilares, blocos e estacas, além de não invadir espaços livres impostos pela arquitetura.

Foi possível determinar que para a utilização do método estrutural concreto protendido com laje lisa, a estrutura necessita de menor número de pilares comparando com a estrutura em concreto armado com laje maciça, enquanto a primeira necessita de 13 pilares em sua base, a segunda necessita de 18 pilares, sendo uma redução bastante considerável de 27%. Esse fato se deve pelo resultado da concepção do método construtivo que suporta grandes vãos, diminuindo os gastos com serviços de carpintaria e de armação.

Outra grande vantagem que o método estrutural em concreto protendido com laje lisa ofereceu, foi na diminuição de vigas e por consequência o aumento da área de laje, enquanto a concepção do concreto protendido necessitou de vigas somente na divisa da laje e na região da escada, a concepção do concreto armado necessita de um número elevado de vigas por todo pavimento. Quando se analisa os custos com carpintaria em ambas as estruturas, conclui-se que quanto menor o número de viga e maior a área de laje, menor será os preços da estrutura além de diminuir o tempo da execução da estrutura.

Analisando por pavimento do imóvel, a estrutura em concreto armado em laje maciça apresentou menor custo do que a estrutura em concreto protendido em laje lisa no pavimento térreo. Enquanto o concreto protendido apresentou melhor desempenho de custos nos pavimentos com menores número de paredes, o pavimento térreo possui poucas divisões com paredes e o pavimento superior suporta uma área de lazer quase totalmente aberta.

Outros fatores que se deve considerar ao escolher a estrutura da casa além de quesitos econômico, é o estético, qualidade de mão de obra. Quando vai executar uma estrutura em concreto protendido exige um maior acompanhamento das fases de execução, ao contrário das estruturas em concreto armado, os colapsos das estruturas em concreto protendido pode vir com a estrutura não demonstrando patologias externas. Por esse fato é provável que os custos com engenheiro e encarregado para responsabilidade técnica e acompanhamento da execução em concreto protendido é mais elevado do que em concreto armado. Por esses motivos sempre é recomendado realizar um estudo geral antes de definir o modelo estrutural.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 (2014) – Projetos de estrutura de concreto.**

CHOLFE; L.; BONILHA, L. **Concreto Protendido: Teoria e prática.** São Paulo: Pini, 2013.  
COELHO, J.A. **MODELAGEM DE LAJES DE CONCRETO ARMADO POR ANALOGIA DE GRELHA.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

PASSAMANI, V. **ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO DIRETO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE LAJES DE CONCRETO ARMADO E CONCRETO PROTENDIDO PARA PAVIMENTOS TIPO DE EDIFICAÇÃO.** TCC (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

EMERICK, A. A. **Projeto e Execução de Lajes Protendidas,** Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

HANAI, J.B. **Fundamentos do concreto protendido.** São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2005

CARVALHO, R.C. **Estruturas em Concreto Protendido – Pré-tração, Pós-tensão, Cálculo e Detalhamento.** São Paulo, Ed. Pini, 2012.

BASTOS, P.S. **Fundamentos do Concreto Protendido.** Bauru-SP, Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2021.

LEONHARDT, F. **Construções de Concreto: Concreto Protendido.** Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

PINHEIRO, L.M.; MUZARDO, C.D.; SANTOS, S. P. **Apostila de estruturas de concreto – concepção estrutural.** São Paulo, 2003.

ALBUQUERQUE, A. T.; PINHEIRO, L. M. **Viabilidade econômica de alternativas estruturais de concreto armado para edifícios.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2002.

PINHEIRO, P.M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios.** São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2007.

REBELLO, Y. **Bases para Projeto Estrutural na Arquitetura.** Rio de Janeiro: Zigurate, 2007.

SANTOS, D. G. **ANÁLISE CONSTRUTIVA DOS TIPOS DE LAJES UTILIZADAS NOS SISTEMAS ESTRUTURAIS DAS EDIFICAÇÕES DE FLORIANÓPOLIS.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2000.

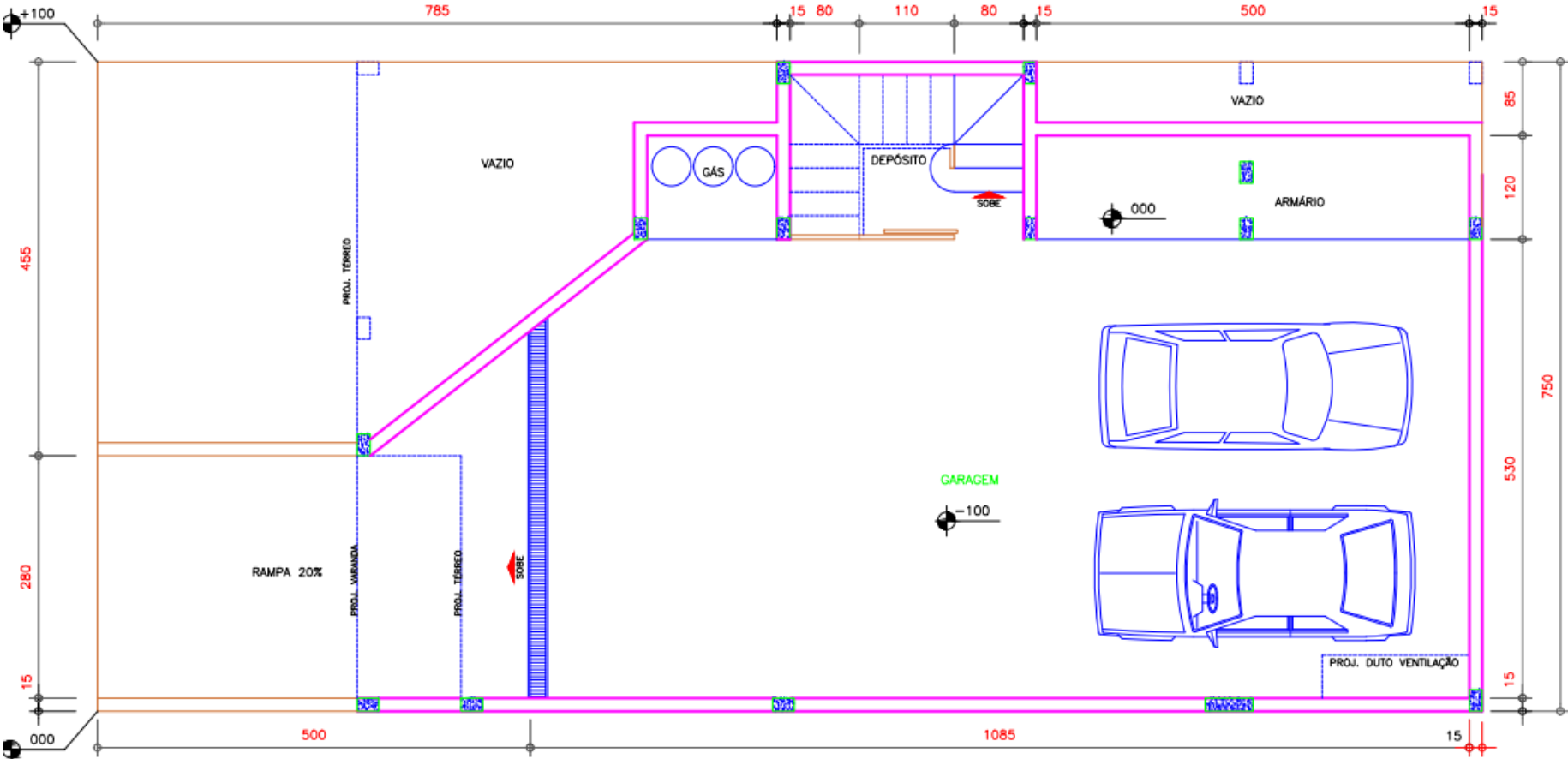
CASTRO, S.V. **CONCRETO PROTENDIDO – VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS DIFERENTES PROCESSOS DE PROTENSÃO DO CONCRETO NAS ESTRUTURAS.** TCC (Graduação) – Universidade Federal de Minas – UFMG, 2011.

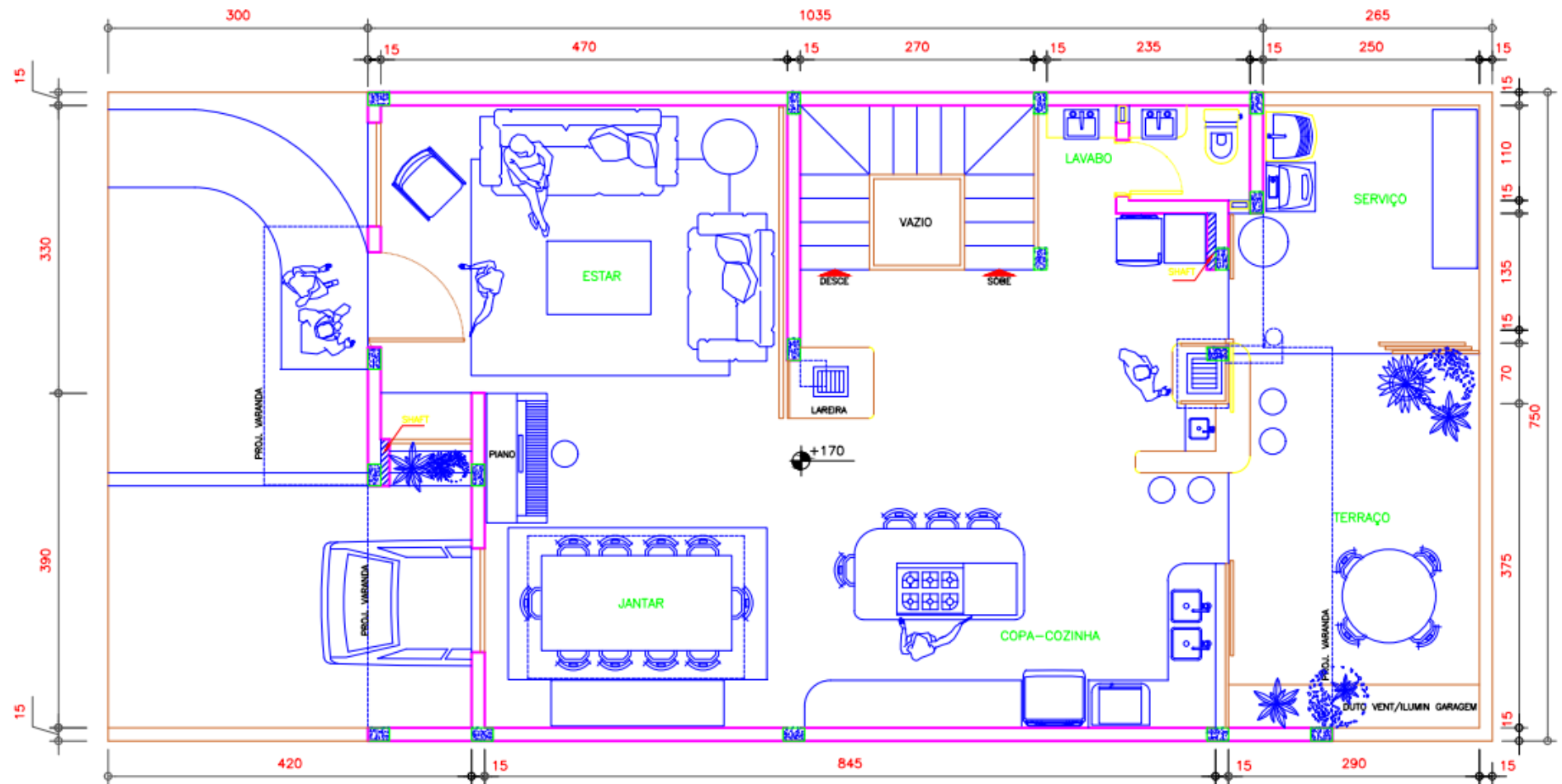
BARBOZA, T.S. **ESTUDO COMPARATIVO DO DIMENSIONAMENTO DE LAJES PROTENDIDAS COM USO DE PROGRAMAS COMPUTACIONAIS**. TCC (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2014.

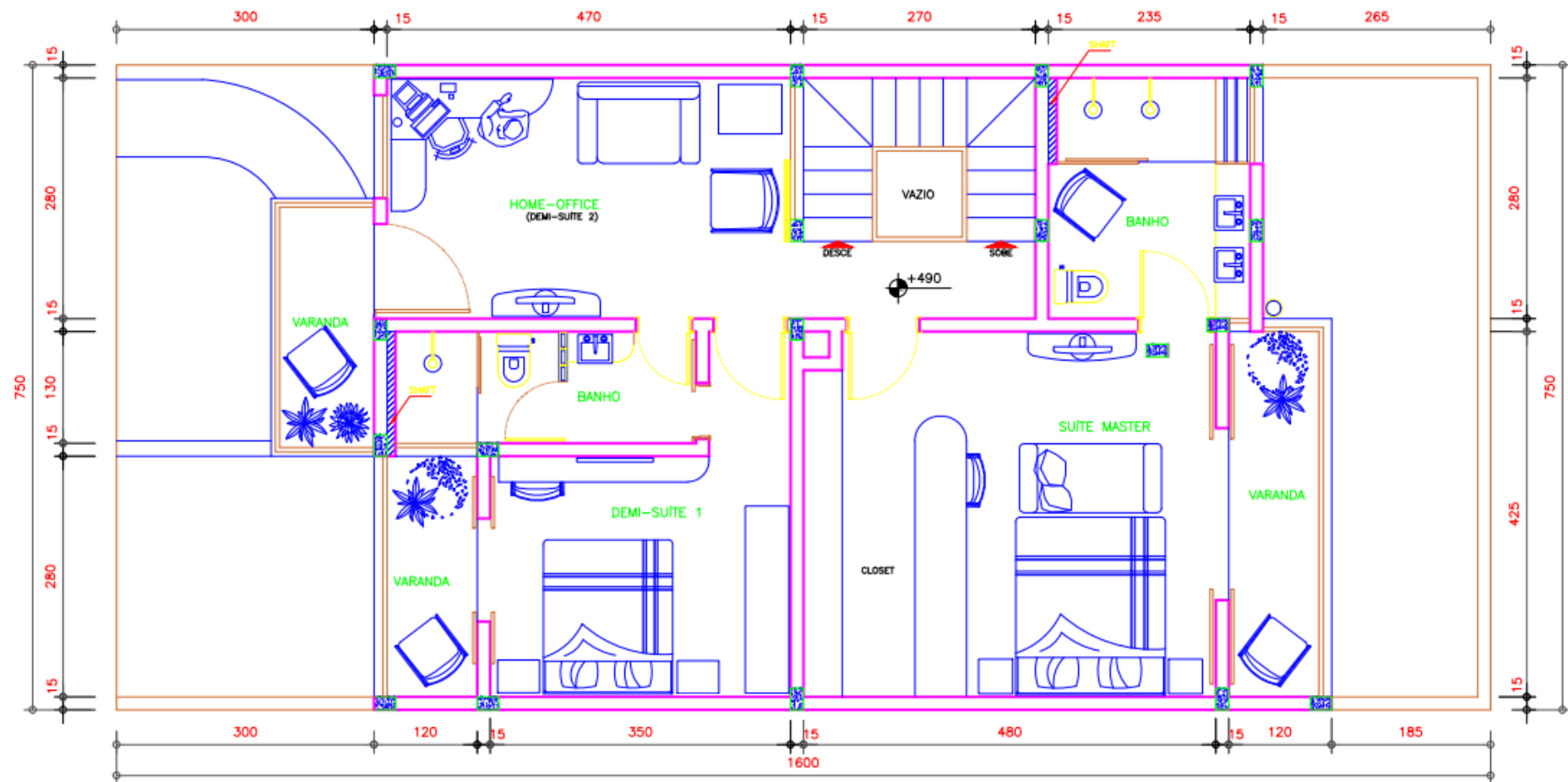
CARVALHO, R.C. **Estruturas em concreto protendido**. São Paulo, 2017.

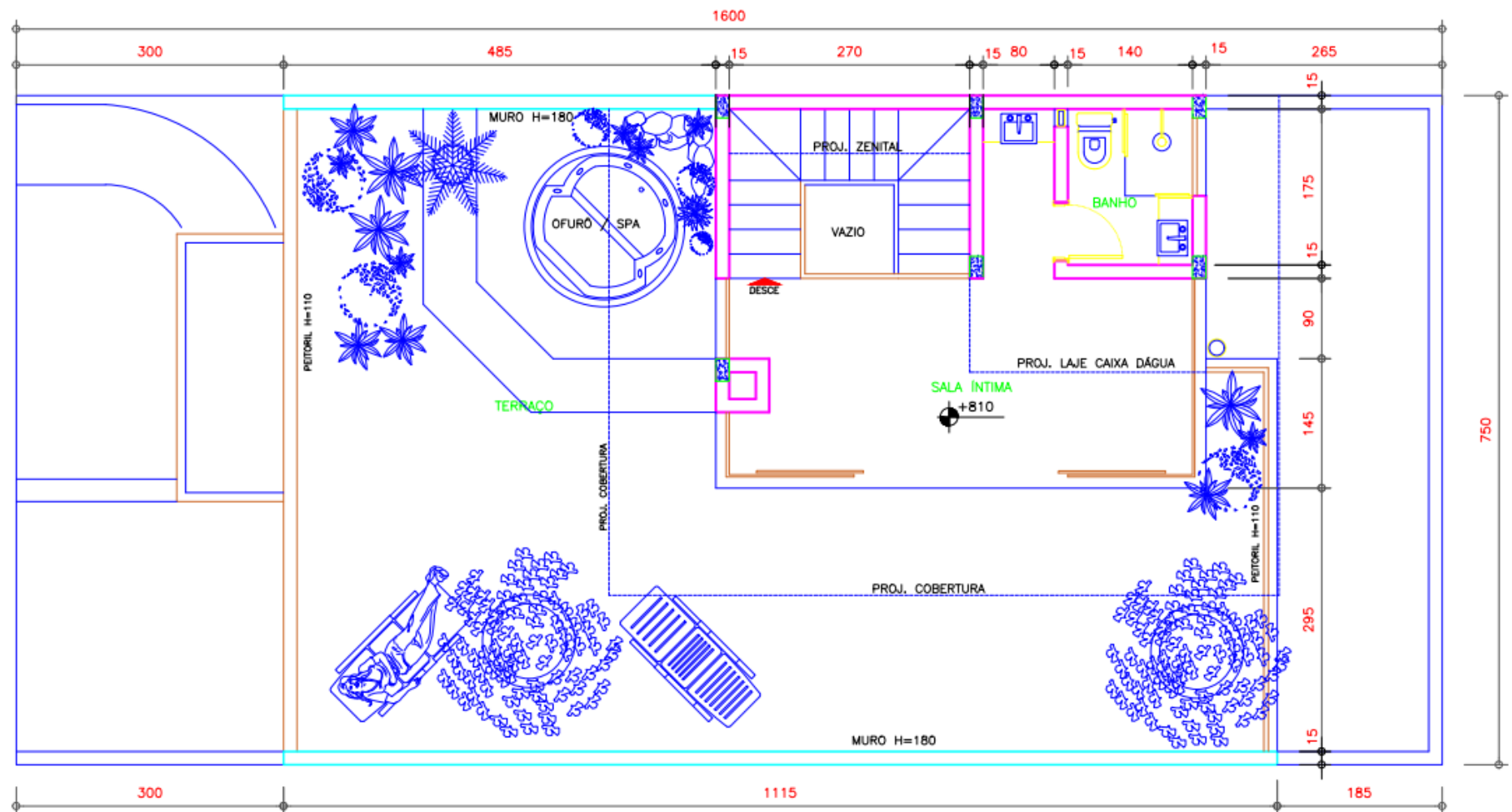
SCHMID, M. T. **Lajes Planas Protendidas**. São Paulo: Rudloff, 2009.

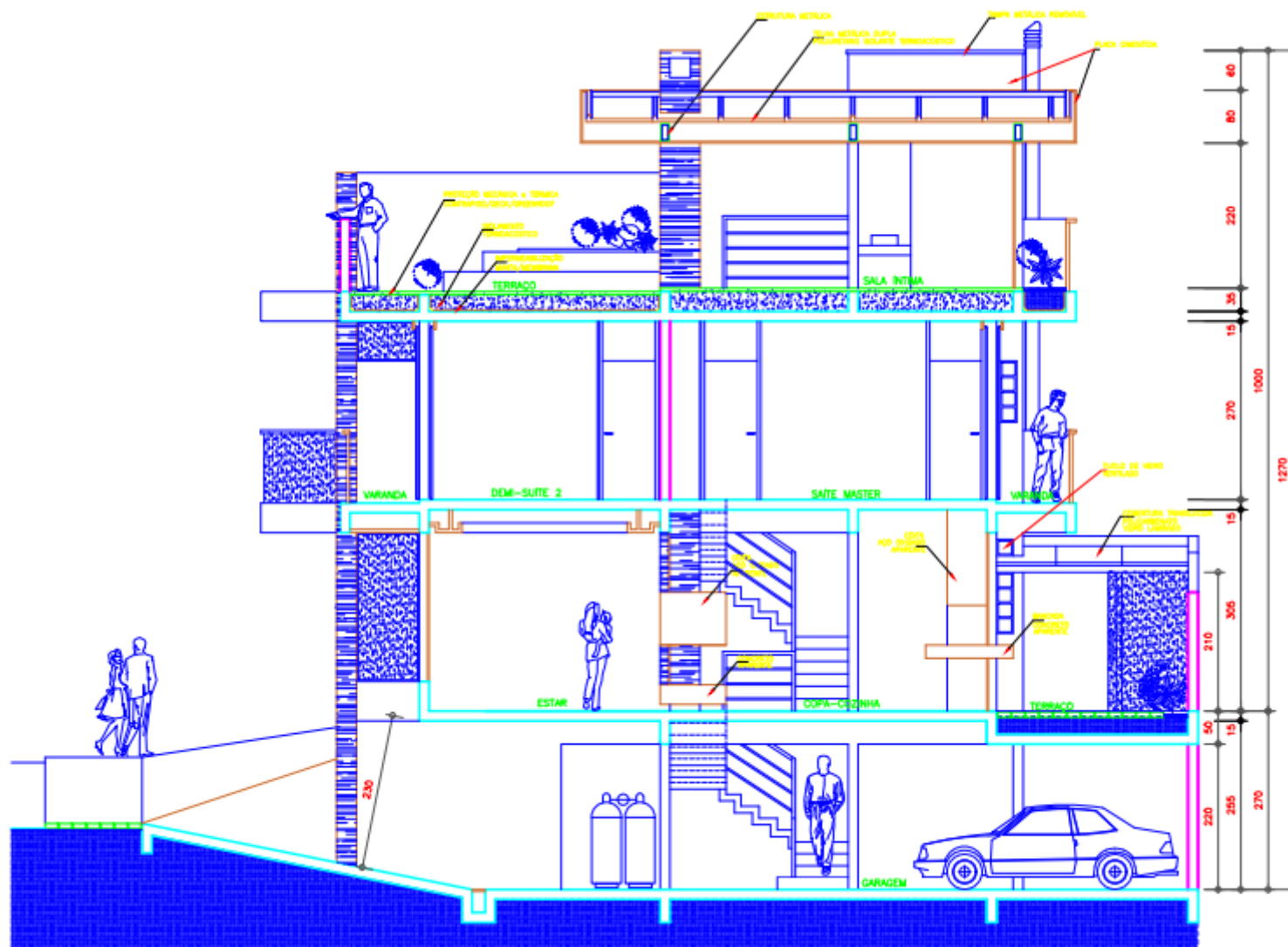
APENDICE A – PLANTAS BAIXA DOS PAVIMENTOS E CORTES DO EMPREENDIMENTO

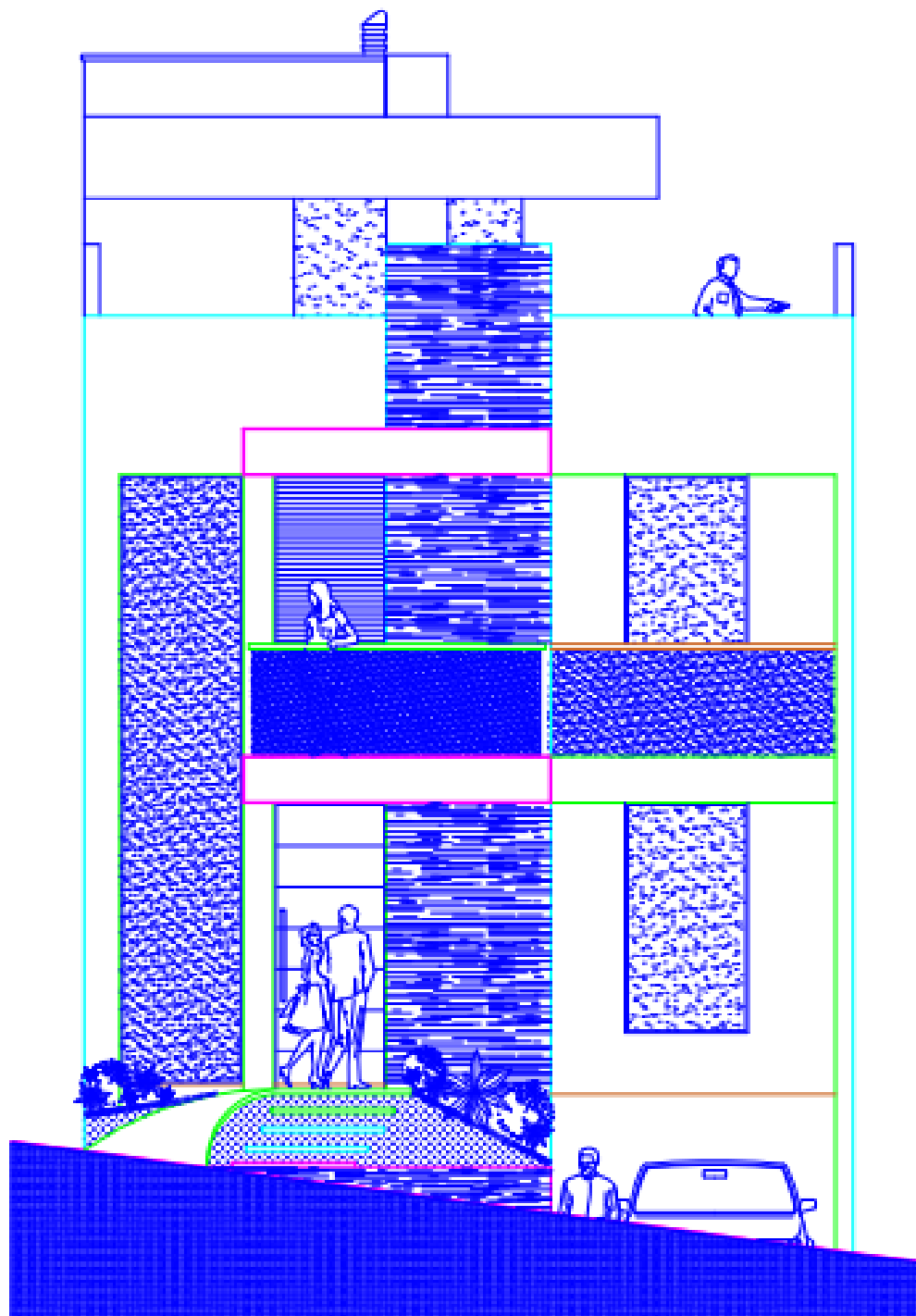












## APÊNDICE B – SONDAGEM DO SOLO DO EMPREENDIMENTO

| PERFIL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO SP-01                                                      |                     |                |       |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-------|---------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NÍVEL D'ÁGUA<br>24 HORAS (m)                                                              | PROF.<br>PERFIL (m) | GOLPES / 30 cm |       | ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À<br>PENETRAÇÃO (N)<br>QUEDA 75 cm<br>PESO DE 65 kg |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           |                     | INICIAL        | FINAL | 0                                                                         | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS                                                                                                         |
|  11,85 | ①                   | 05             | 06    |                                                                           |    |    |    |    |    | 0,00 - 0,80 m : ATERRO DE ARGILA SILTOSA COM AREIA FINA E MÉDIA, MARROM ESCURA.                                                 |
|                                                                                           | ②                   | 07             | 08    |                                                                           |    |    |    |    |    | 0,80 - 3,60 m : SILTE ARENOSO (GRÃOS FINOS E MÉDIOS), POUCO COMPACTO, AMARELO.                                                  |
|                                                                                           | ③                   | 07             | 10    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ④                   | 06             | 09    |                                                                           |    |    |    |    |    | 3,60 - 5,00 m : SILTE ARGILOSO COM AREIA FINA E MÉDIA, MÉDIO, AMARELO E VERMELHO.                                               |
|                                                                                           | ⑤                   | 08             | 14    |                                                                           |    |    |    |    |    | 5,00 - 5,90 m : SILTE ARGILOSO COM POUCA AREIA FINA, RIJO, AMARELO ALARANJADO.                                                  |
|                                                                                           | ⑥                   | 11             | 17    |                                                                           |    |    |    |    |    | 5,90 - 9,00 m : SILTE ARGILOSO COM AREIA FINA E MÉDIA, RIJO, MARROM AMARELADO COM PORÇÕES ROXAS.                                |
|                                                                                           | ⑦                   | 10             | 15    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑧                   | 09             | 11    |                                                                           |    |    |    |    |    | 9,00 - 10,80 m : SILTE ARGILOSO COM AREIA FINA E MÉDIA, MÉDIO, MARROM AMARELADO, AMARELO E VERMELHO COM VEIOS PRETOS.           |
|                                                                                           | ⑨                   | 07             | 09    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑩                   | 07             | 10    |                                                                           |    |    |    |    |    | 10,80 - 15,70 m : SILTE ARGILOSO COM AREIA FINA E MÉDIA, RIJO, VERMELHO E RÓSEO COM PORÇÕES MARROM AMARELADAS E ESBRAÑQUIÇADAS. |
|                                                                                           | ⑪                   | 08             | 11    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑫                   | 09             | 11    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑬                   | 09             | 11    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑭                   | 09             | 11    |                                                                           |    |    |    |    |    | 15,70 - 19,45 m : SILTE ARGILOSO COM POUCA AREIA FINA E MÉDIA, RIJO À DURO, MARROM AVERMELHADO COM VEIOS PRETOS.                |
|                                                                                           | ⑮                   | 12             | 15    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑯                   | 13             | 18    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑰                   | 22             | 31    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑱                   | 23             | 32    |                                                                           |    |    |    |    |    | LÍMITE DA SONDAGEM: 19,45 m<br>CONFORME NBR-6484                                                                                |
|                                                                                           | ⑲                   | 23             | 36    |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ⑳                   | -              | -     |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |
|                                                                                           | ㉑                   | -              | -     |                                                                           |    |    |    |    |    |                                                                                                                                 |