

# Concreto Armado X Protendido

## Análise Estrutural e de Custo

Prof. Flávio Roberto Xavier de Oliveira
Curso de Sistemas Estruturais

estruturasonline.com

# Sumário


1 Conceitos Básicos . . . . . 5
1.1 Introdução 5
1.2 Definições de Norma 6

2 Estudo de Caso - Arquitetura . . . . . 7
2.1 Recomendações das Normas Relativas à Incêndio 8

3 Estudo de Caso: Solução 01 . . . . . 9
3.1 Sistema Estrutural em Concreto Armado com Lajes Maciças e Vigas 9

4 Estudo de Caso: Solução 02 . . . . . 13
4.1 Sistema Estrutural em Laje Lisa Protendida 13

5 Estudo de Caso: Solução 03 . . . . . 17
5.1 Sistema Estrutural em Laje Lisa Protendida com Alterações 17

6 Resultados e Comparações . . . . . 21
6.1 Resultados 21
6.1.1 Orçamento das Soluções Estruturais . . . . . 21
6.1.2 Taxas e Índices . . . . . 23
6.2 Comparações 26

Índice . . . . . 27

# 1. Conceitos Básicos

## 1.1 Introdução

A escolha do sistema estrutural é uma das etapas fundamentais no processo de concepção de projetos de edifícios. Essa decisão impacta não apenas a forma geométrica da arquitetura, mas também a segurança, viabilidade econômica e o desempenho global da estrutura.

O objetivo desse material é realizar uma avaliação preliminar de custo e desempenho entre dois sistemas estruturais: concreto armado, composto por lajes maciças e vigas, e o sistema em laje lisa protendida, em um projeto real de um edifício de 14 pavimentos.

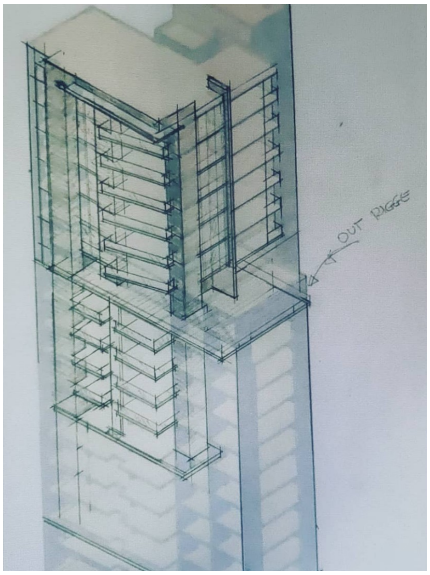


Figura 1.1: Concepção volumétrica de um projeto arquitetônico



Figura 1.2: Concepção em planta baixa de um projeto arquitetônico.

## 1.2 Definições de Norma

Antes de prosseguir com as análises, é importante ressaltar algumas definições que impactarão diretamente nos resultados que serão mostrados. A primeira abordagem trata-se da definição de "laje lisa" ou "cogumelo" da ABNT NBR 6118:2023[1], item 14.7.8, onde se diz que:

> "Lajes-cogumelo são lajes apoiadas diretamente em pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são apoiadas nos pilares sem capitéis."

E ainda:

> "A análise estrutural de lajes lisas e cogumelos deve ser realizadas mediante a utilização de procedimento numérico adequado, por exemplo, diferenças finitas, elementos finitos, grelha equivalente ou elementos de contorno."

Outra definição que deve ser muito bem observada é a da ABNT NBR 15200:2012[2], a qual versa sobre as dimensões mínimas dos elementos estruturais em função da exposição ao incêndio. O item 8.2 diz que:

> "Não é permitida a consideração do revestimento na determinação das dimensões mínimas da seção transversal de pilares e lajes lisas ou cogumelos."

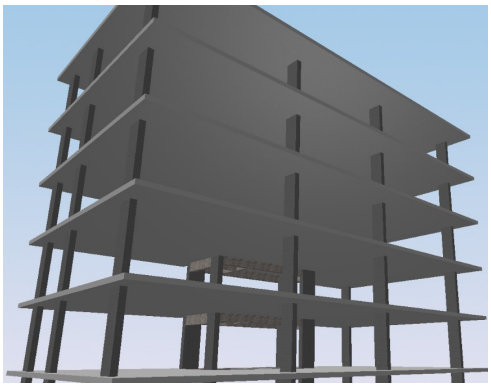


Figura 1.3: Laje lisa.

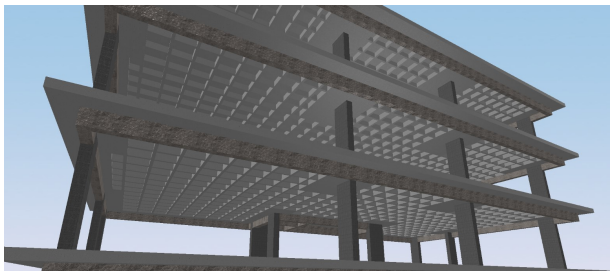


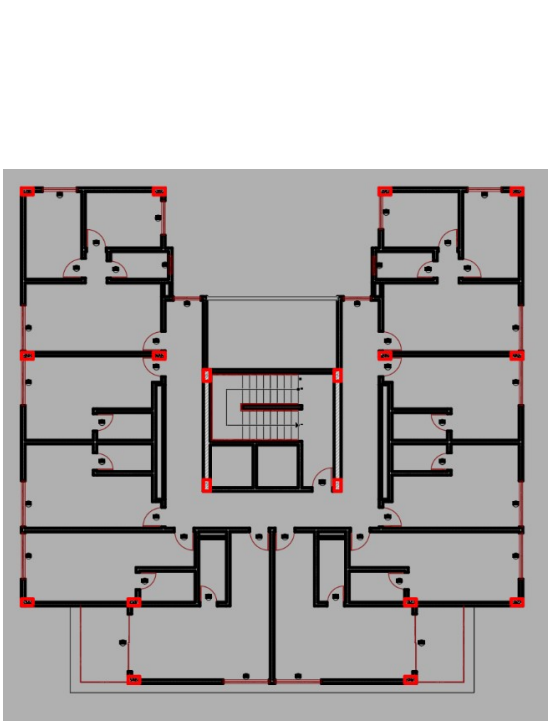
Figura 1.4: Laje cogumelo.

[1] ABNT NBR 6118:2023 — Projeto de estruturas de concreto.
[2] ABNT NBR 15200:2012 — Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.

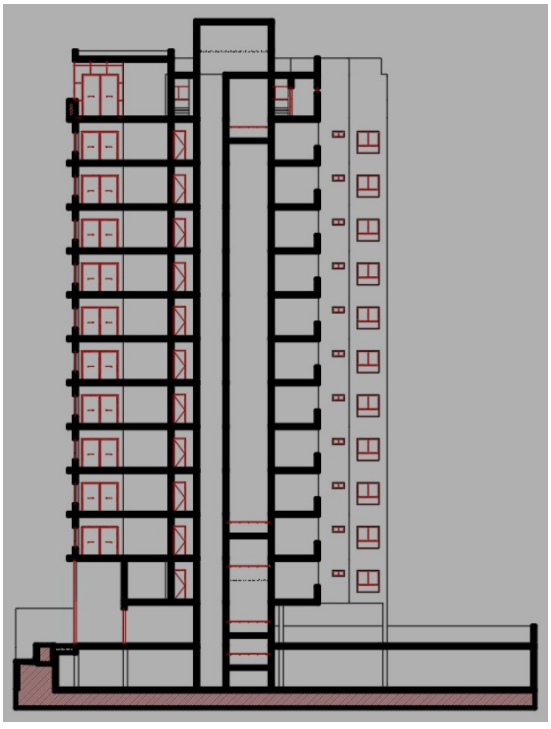
# 2. Estudo de Caso - Arquitetura

Existem diversos sistemas estruturais que poderiam ser avaliados neste estudo de caso. No entanto, nem todos garantiriam resultados satisfatórios, tanto em termos de viabilidade econômica quanto de exequibilidade. Portanto, a análise foi restrita aos dois sistemas mais comumente utilizados em edifícios residenciais: o sistema de concreto armado, composto por lajes maciças e vigas, e o sistema em laje lisa protendida.

O estudo em questão refere-se a um edifício residencial multifamiliar de 14 andares, localizado no município de Campina Grande, no estado de Paraíba, com uma altura total de 45 metros e uma área de projeção do pavimento tipo de 414 m². As subfiguras 2.1(a) e 2.1(b) da Figura 2.1, mostram a planta baixa do pavimento tipo e um corte da arquitetura.



(a) Planta baixa da arquitetura



(b) Corte da arquitetura

Figura 2.1: Projeto arquitetônico do estudo de caso.

## 2.1 Recomendações das Normas Relativas à Incêndio

Segundo a Tabela A.1 da ABNT NBR 14432:2001[1] a edificação do estudo em questão foi classificada como sendo do grupo A, divisão A-2, uso residencial e classe P5, como o TRRF[2] de 120 minutos. Esse valor foi reduzido em 30 minutos, conforme o Anexo A — Método do tempo equivalente da ABNT NBR 15200:2012. Portanto, o valor considerado do TRRF para o edifício foi de 90 minutos.

De acordo com o TRRF supramencionado e seguindo as prescrições do Método Tabular no seu item 8.2 da ABNT NBR 15200:2012, foram determinadas as espessuras mínimas utilizadas nos elementos estruturais. Portanto, tem-se::

- Laje lisa protendida: 20 cm;
- Vigas: 16 cm;
- Pilares: 14 cm;
- Laje nervurada capa/nervura: 10/12 cm;
- Laje maciça: 10 cm.

[1] ABNT NBR 14432:2001 — Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações — Procedimento.
[2] TRRF - Tempo requerido de resistência ao fogo.

# 3. Estudo de Caso: Solução 01

## 3.1 Sistema Estrutural em Concreto Armado com Lajes Maciças e Vigas

Um dos principais desafios no lançamento de estruturas de concreto armado reside na determinação das seções dos elementos estruturais. Essas seções devem possuir inércia adequada para ultrapassar os Estados Limites Últimos (ELU) e os Estados Limites de Serviço (ELS). Além disso, é pertinente mencionar o item 7.1 da ABNT NBR 15575-2:2013[1], que estabelece que a estrutura não pode gerar sensação de insegurança aos usuários. Nesse contexto, torna-se necessário verificar os seguintes estados limites para estruturas em concreto armado:

- ELS-W — Estado-limite de abertura de fissuras;
- ELS-DEF — Estado-limite de deformação excessiva;
- ELS-VE — Estado-limite de vibração excessiva.

No caso do ELS-DEF, é imprescindível não apenas verificar os limites de deslocamentos na estrutura, mas também as flechas na alvenaria, seguindo rigorosamente as combinações indicadas pela ABNT NBR 6118:2023. As alvenarias também são mencionadas na ABNT NBR 15575-2:2013, item 7.1, onde diz que as flechas na estrutura não pode repercutir em estados inaceitáveis de fissura de vedação e acabamentos.

Outro aspecto relevante consiste na análise da quantidade de barras fissuradas na grelha e no estágio onde a mesma se encontra. A boa prática da engenharia estrutural recomenda que não seja ultrapassado um limite de 20% de barras fissuradas no pavimento.

As Figuras 3.1 e 3.2 mostram. respectivamente, a forma do pavimento tipo e a perspectiva da estrutura, e a Figura 3.3 o gráfico de estabilidade global para o sistema estrutural em concreto armado composto por vigas e lajes.

As Figuras 3.5 e 3.4 mostram, respectivamente, as flechas não lineares, calculadas com a inércia da seção fissurada, e a perspectiva da estrutura com a localização das vedações do pavimento tipo.

[1] ABNT NBR 15575-2 - Edificações habitacionais — Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais.

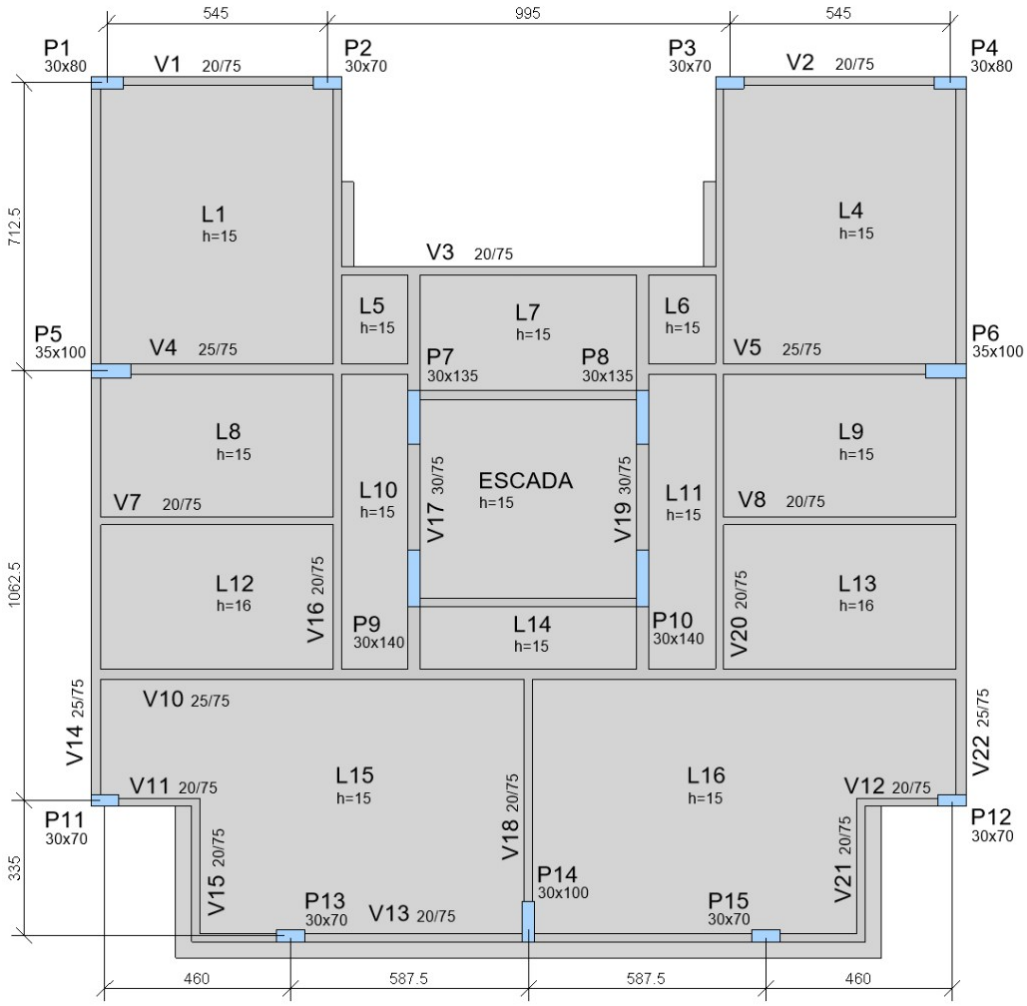



Figura 3.1: Forma do pavimento tipo da estrutura em concreto armado com lajes maciças e vigas

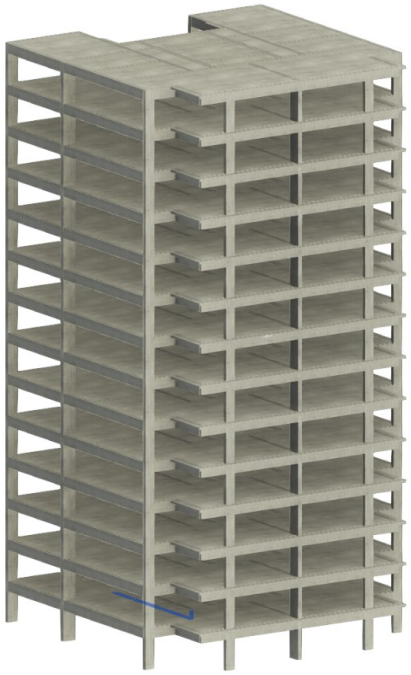


Figura 3.2: Perspectiva da estrutura da estrutura em concreto armado com lajes maciças e vigas

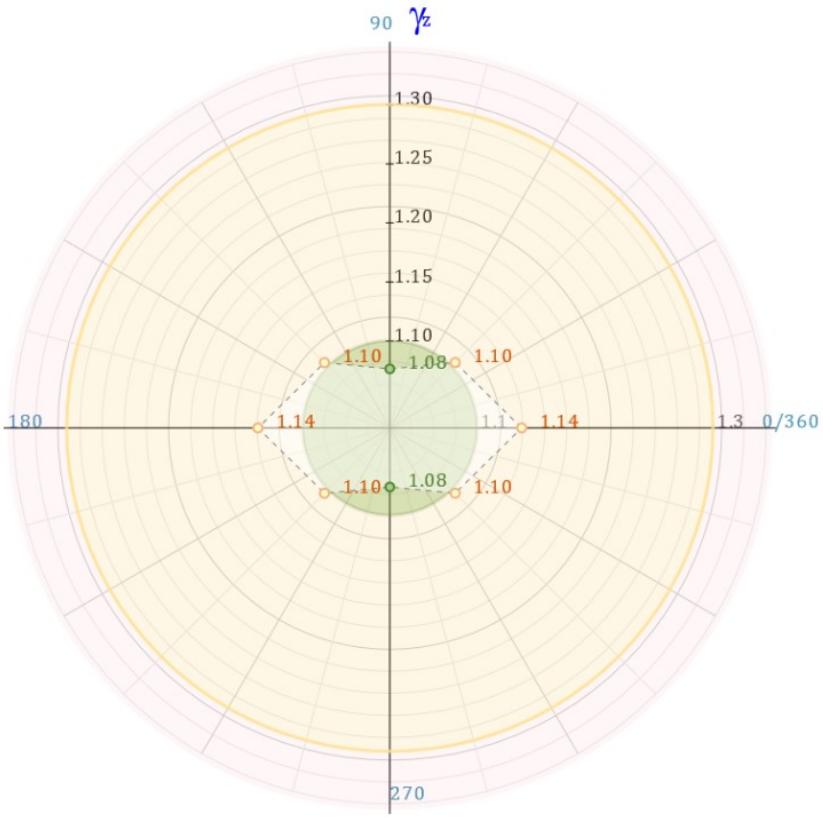



Figura 3.3: Estabilidade global — Coeficiente de importância dos esforços de segunda ordem ($\gamma_z$) da estrutura em concreto armado com lajes maciças e vigas

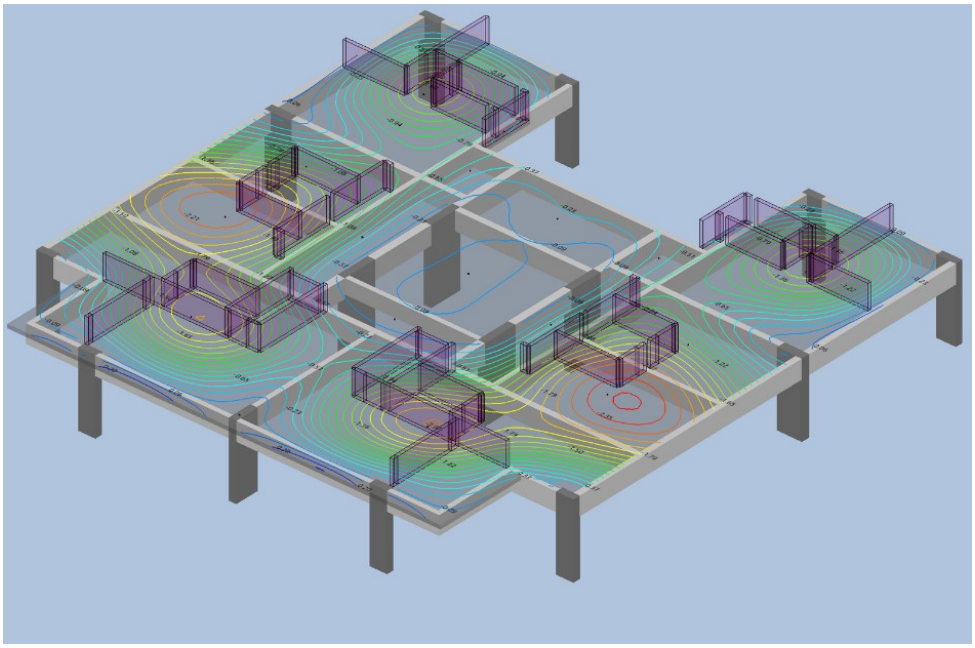


Figura 3.4: Perspectiva — flecha não-linear do pavimento tipo da estrutura em concreto armado com lajes maciças e vigas

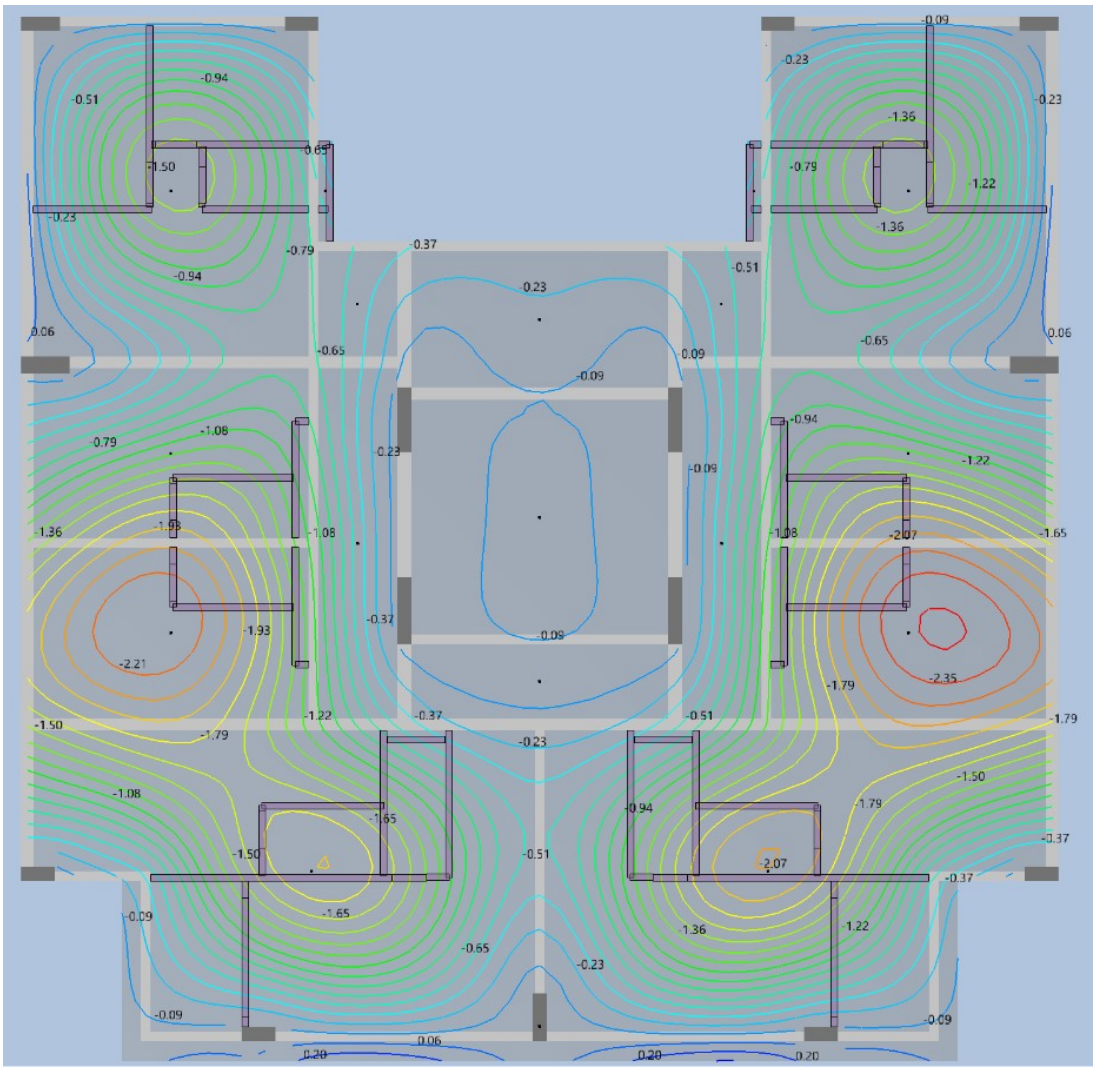



Figura 3.5: Flecha não-linear do pavimento tipo da estrutura em concreto armado com lajes maciças e vigas

# 4. Estudo de Caso: Solução 02

## 4.1 Sistema Estrutural em Laje Lisa Protendida

A outra opção proposta para o edifício foi um sistema em laje lisa protendida. Foram incorporadas duas vigas faixa longitudinais ao modelo para superar um vão ligeiramente superior a 10 metros, evitando assim a necessidade de aumentar a espessura da laje, como pode ser visto na Figura 4.1. A perspectiva da estrutura pode ser vista na Figura 4.2, assim como o gráfico do coeficiente de importância dos esforços de segunda ordem, na Figura 4.3.

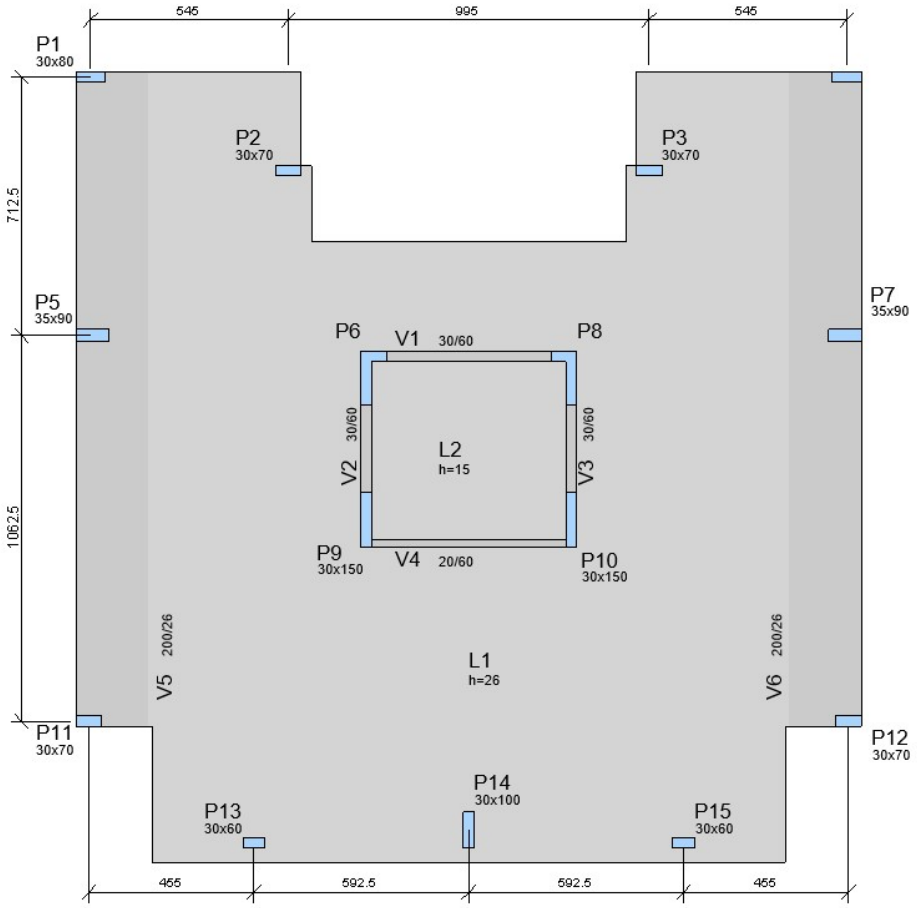



Figura 4.1: Forma do pavimento tipo em laje lisa protendida

As isocurvas de deformação e os resultados das flechas para as combinações sugeridas pela ABNT NBR 6118:2023 para o pavimento tipo da estrutura, estão mostradas, respectivamente, nas Figuras 4.6 e 4.5.

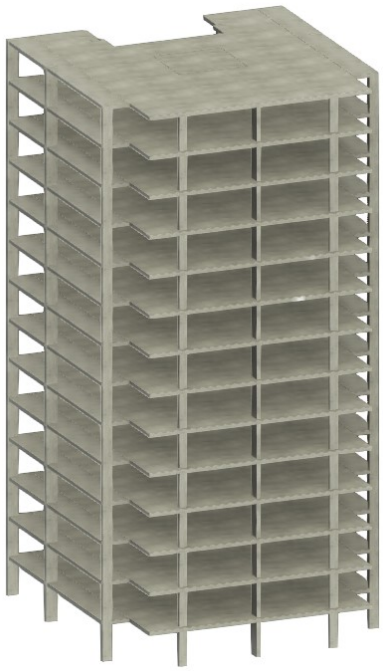


Figura 4.2: Perspectiva da estrutura em laje lisa protendida

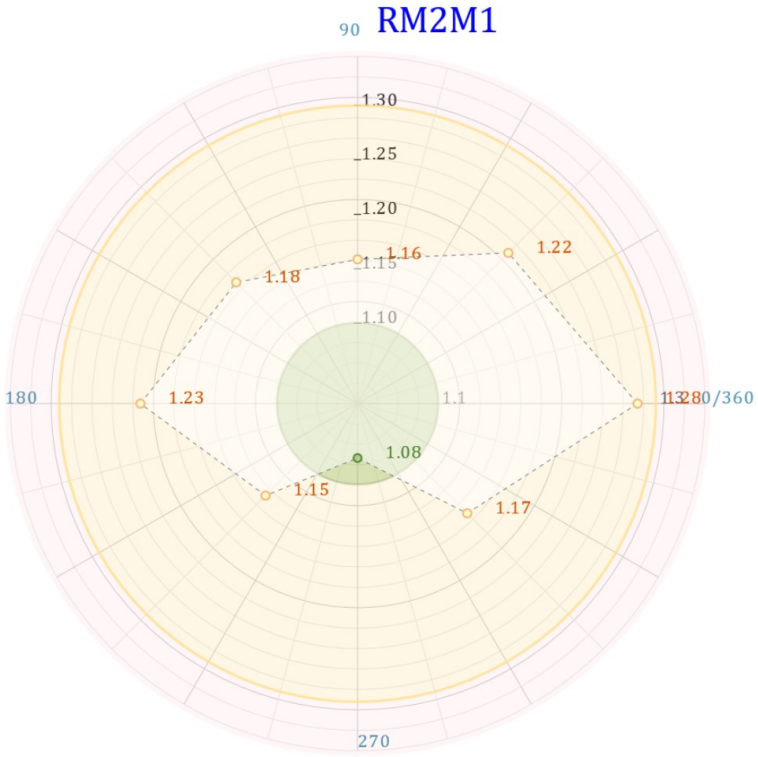



Figura 4.3: Coeficiente de importância dos esforços de segunda ordem, P-Δ, da estrutura em laje lisa protendida

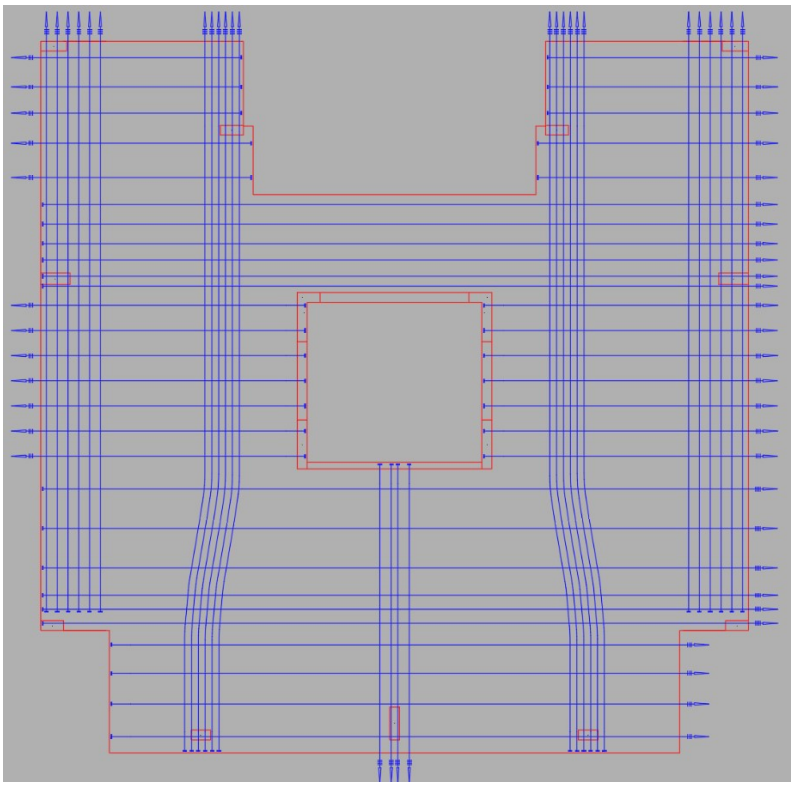


Figura 4.4: Distribuição dos cabos protendidos da estrutura em laje lisa protendida

LAJEPRO/DIFER/1.3PP_V+PERM_V+0.7ACID_V+1.3FORALI

LAJEPRO/LENTA/2.3PP_V+2PERM_V+0.7ACID_V+2.5FORALI

**Parâmetros de visualização**

**Verificar limites**

Lajes | Vigas | Alvenarias

| Laje | L (cm) | f. (cm) | f. lim (cm) | f/flim |
|---|---|---|---|---|
| L1 | 585 | -1.00 | 2.34 | -0.43 |
| L2 | 485 | 0.00 | 1.94 | 0 |

LAJEPRO/LENTA/2.3PP_V+2PERM_V+0.7ACID_V+2.5FORALI

**Parâmetros de visualização**

**Verificar limites**

Lajes | Vigas | Alvenarias

| Laje | L (cm) | f. (cm) | f. lim (cm) | f/flim |
|---|---|---|---|---|
| L1 | 585 | -1.73 | 2.34 | -0.74 |
| L2 | 485 | 0.00 | 1.94 | 0 |

Figura 4.5: Valores das flechas no pavimento tipo da estrutura em laje lisa protendida

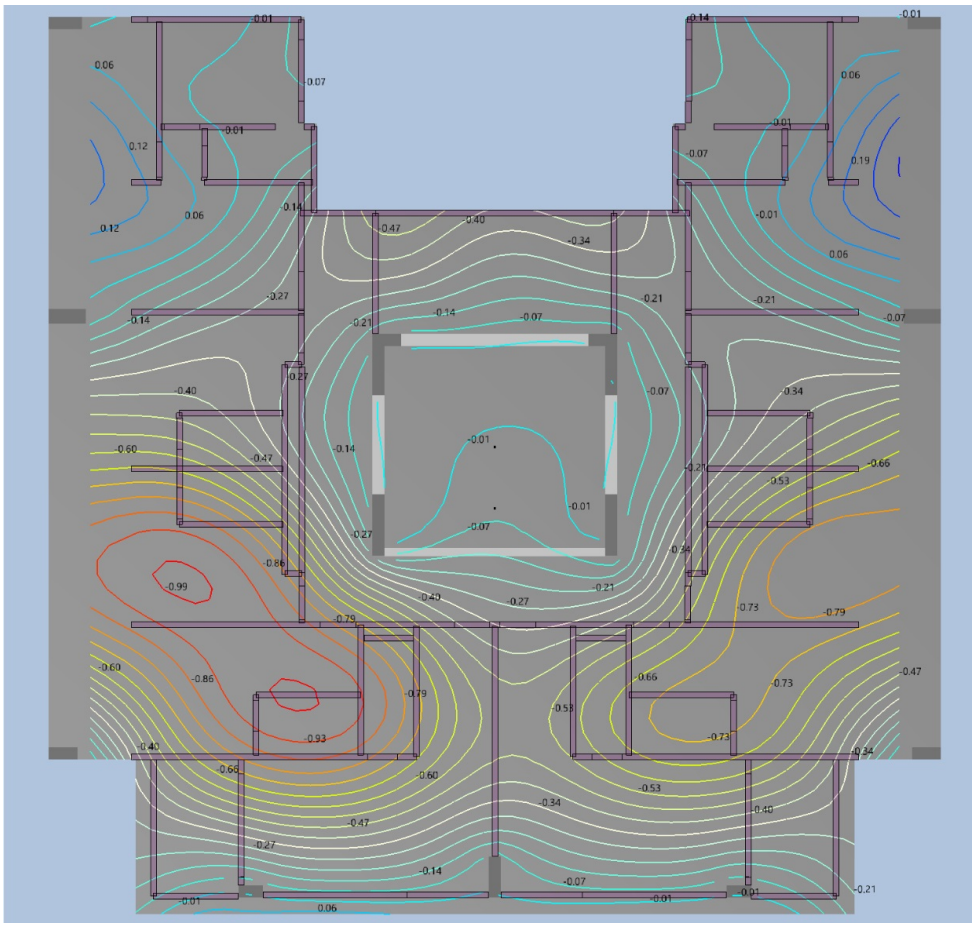


Figura 4.6: Isocurvas de deformação no pavimento tipo da estrutura em laje lisa protendida

# 5. Estudo de Caso: Solução 03

## 5.1 Sistema Estrutural em Laje Lisa Protendida com Alterações

Para a Solução 03, foram adicionados ao modelo dois pilares visando reduzir os vãos que estavam ocasionando a necessidade da inclusão das vigas faixa, bem como, do aumento da espessura da laje. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram, respectivamente, a forma do pavimento tipo e a perspectiva da estrutura.

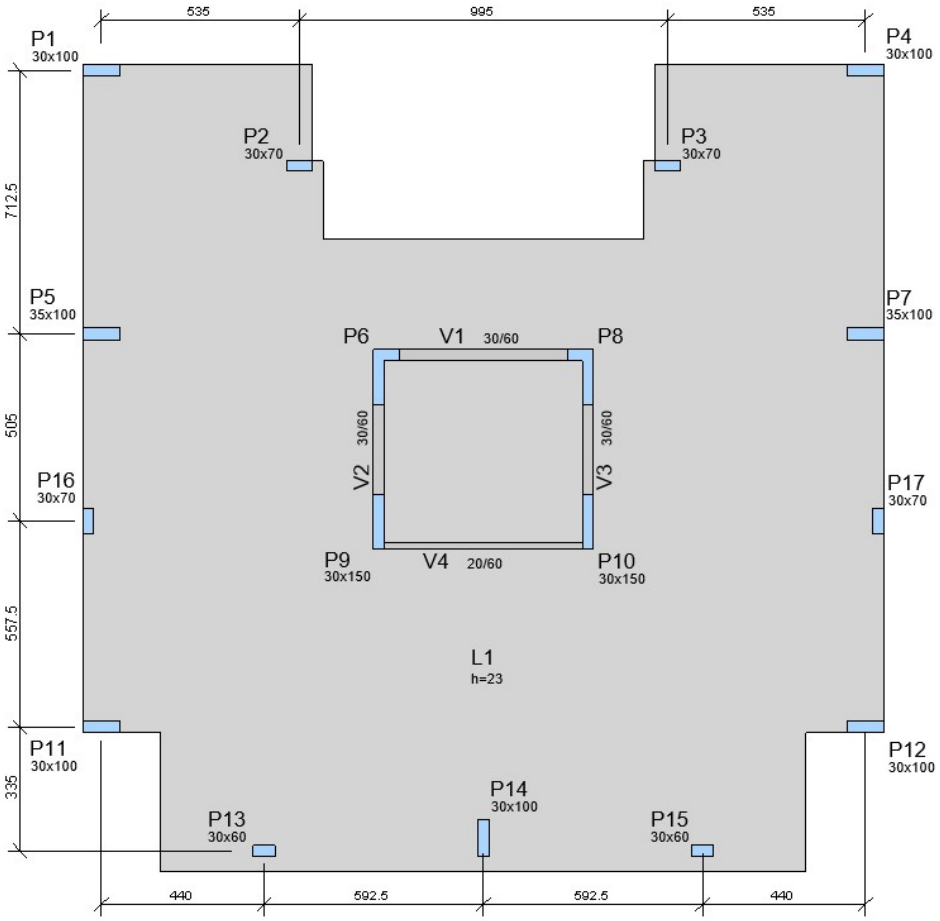



Figura 5.1: Forma do pavimento tipo em laje lisa protendida com alterações

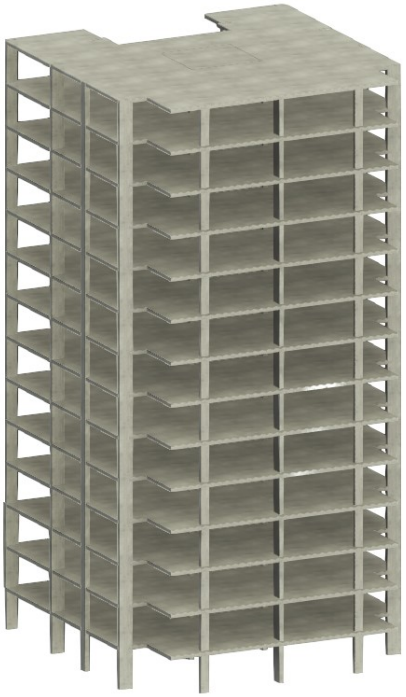


Figura 5.2: Perspectiva da estrutura em laje lisa protendida com alterações

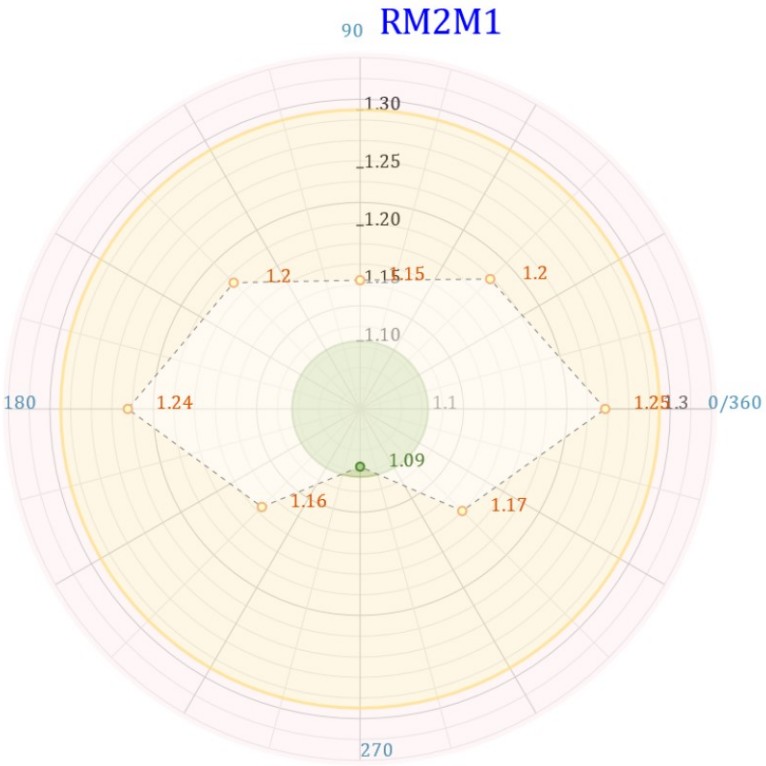



Figura 5.3: Coeficiente de importância dos esforços de segunda ordem, P-Δ, da estrutura em laje lisa protendida com alterações

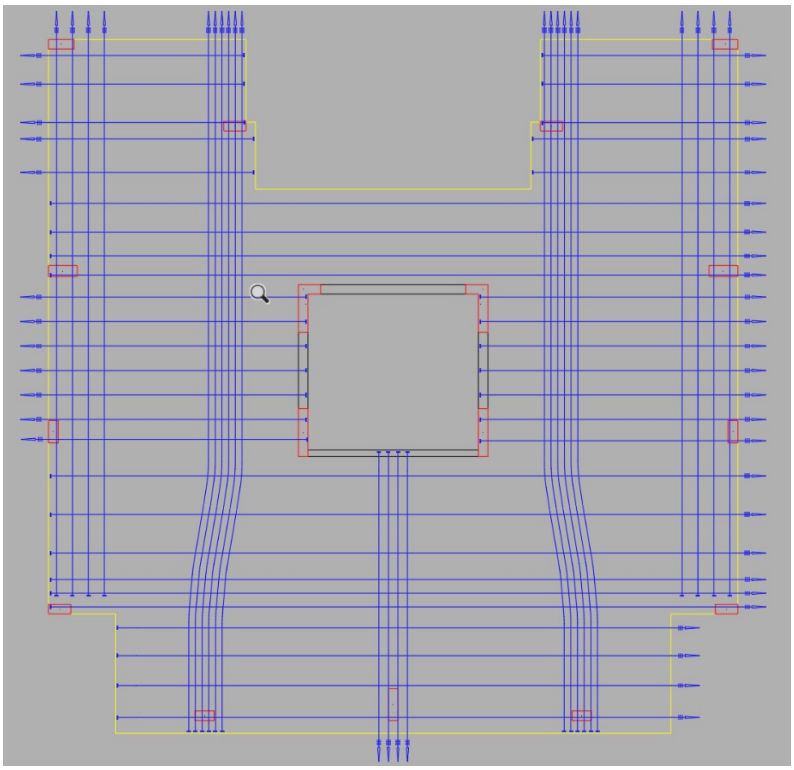


Figura 5.4: Distribuição dos cabos protendidos da laje lisa protendida com alterações

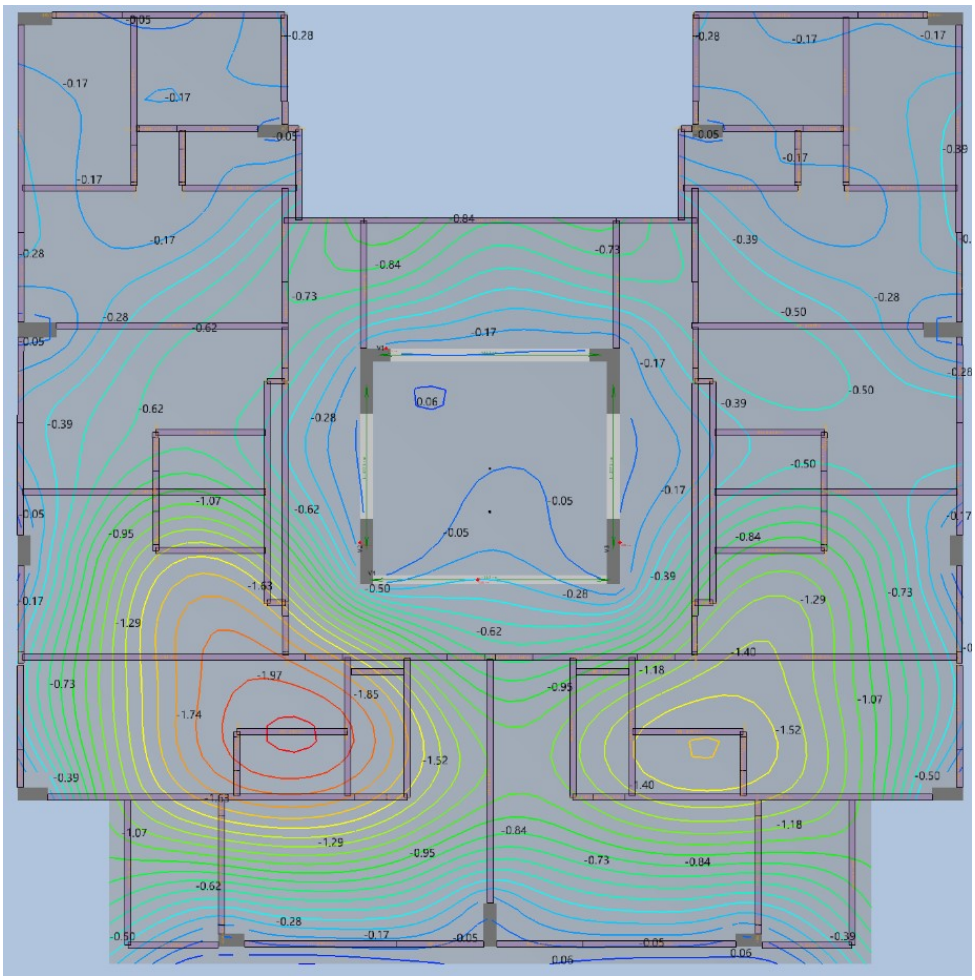
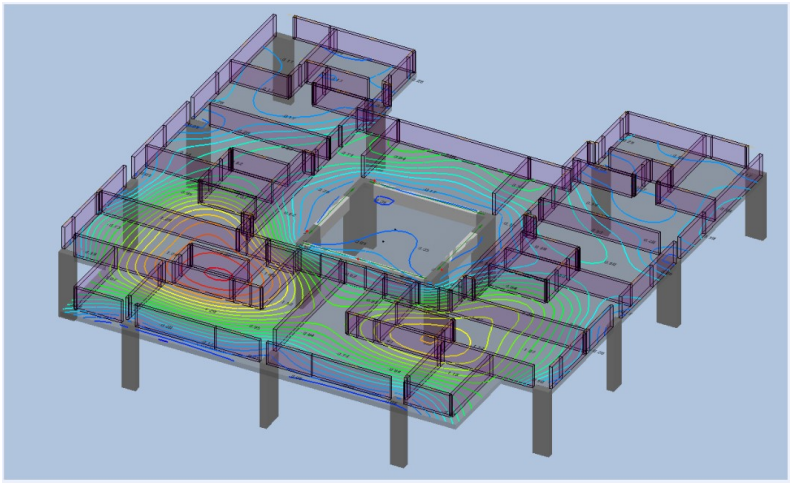


Figura 5.5: Isocurvas de deformação no pavimento tipo da estrutura em laje lisa protendida com alterações



Lajes | Vigas | Alvenarias

| Laje | L (cm) | f. (cm) | f. lim (cm) | f/flim |
|---|---|---|---|---|
| L1 | 785 | -2.10 | 3.14 | -0.67 |
| L2 | 485 | 0.00 | 1.94 | 0 |

Figura 5.6: Perspectiva das alvenarias e os valores das flechas no pavimento tipo da estrutura em laje lisa protendida com alterações

# 6. Resultados e Comparações

## 6.1 Resultados

### 6.1.1 Orçamento das Soluções Estruturais

Os orçamentos das soluções estruturais foram realizadas no OrçaFascio[1], segundo as composições do SINAPI[2] e o SBC[3].

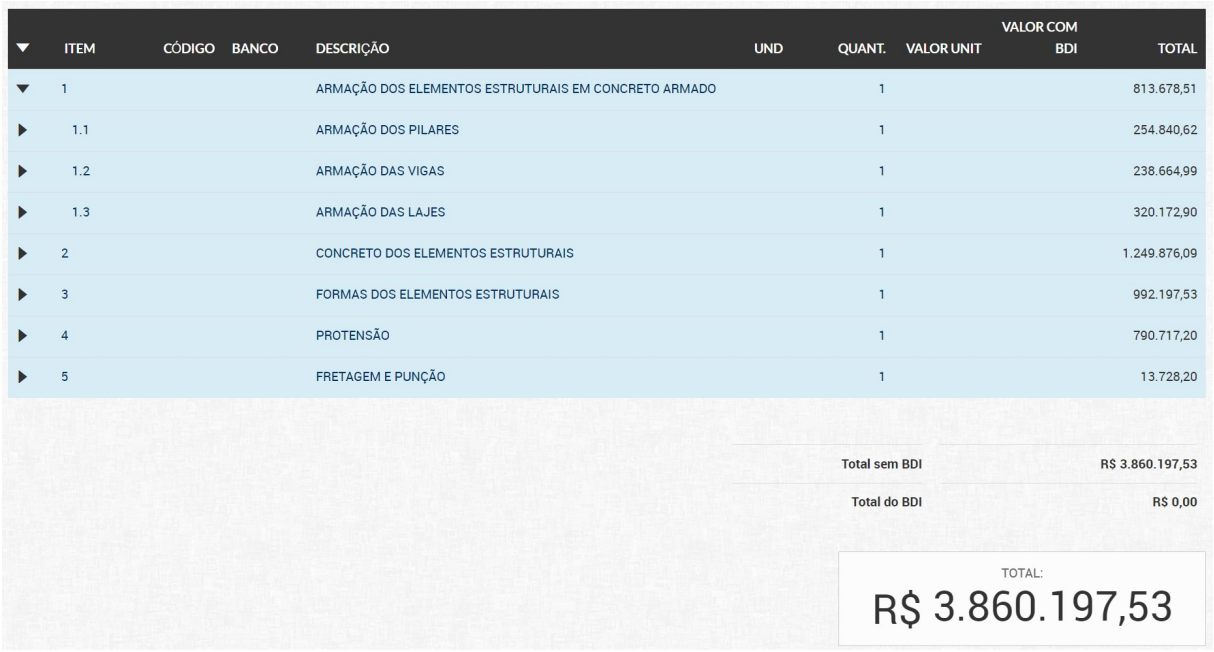
| ITEM | CÓDIGO | BANCO | DESCRIÇÃO | UND | QUANT. | VALOR UNIT | VALOR COM BDI | TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | ARMAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM CONCRETO ARMADO | | 1 | | | 1.515.132,20 |
| 1.1 | | | ARMAÇÃO DOS PILARES | | 1 | | | 188.414,44 |
| 1.2 | | | ARMAÇÃO DAS VIGAS | | 1 | | | 610.354,20 |
| 1.3 | | | ARMAÇÃO DAS LAJES | | 1 | | | 716.363,56 |
| 2 | | | CONCRETO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS | | 1 | | | 1.051.125,82 |
| 3 | | | FORMAS DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS | | 1 | | | 1.280.454,04 |
| 4 | | | PROTENSÃO | | 1 | | | 0,00 |
| 5 | | | FRETAGEM E PUNÇÃO | | 1 | | | 0,00 |

| | |
|---|---|
| Total sem BDI | R$ 3.846.712,06 |
| Total do BDI | R$ 0,00 |

TOTAL:
R$ 3.846.712,06

Figura 6.1: Orçamento da estrutura da Solução 01

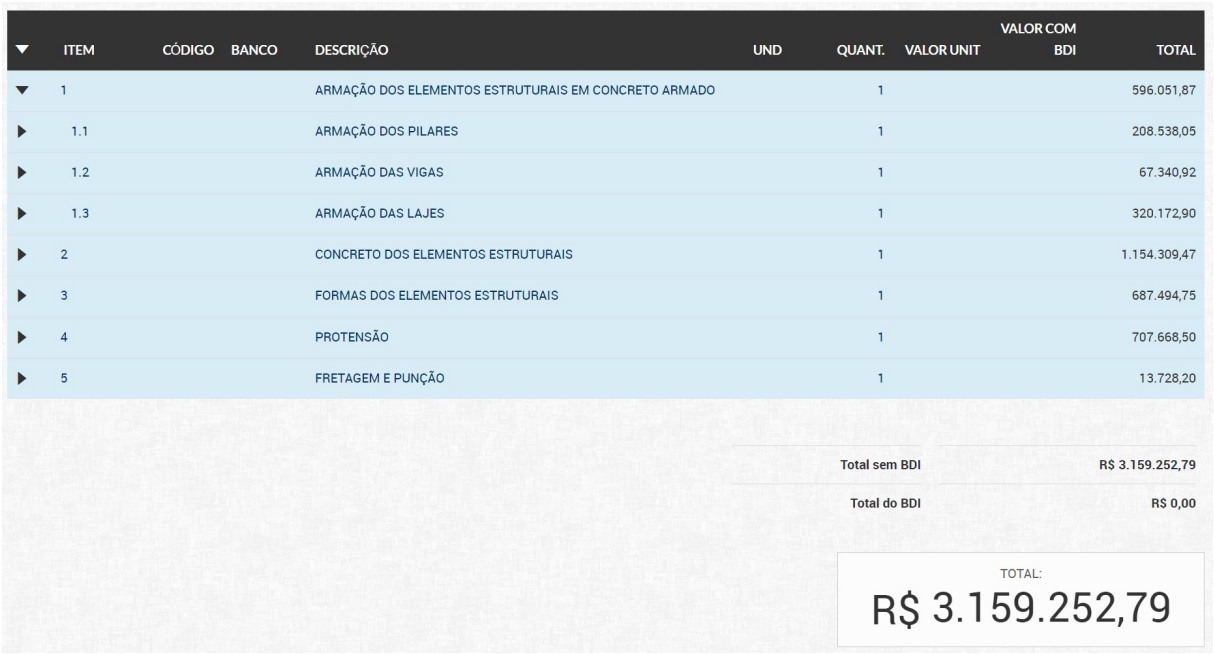
[1] Sistema de Gestão de Obra, https://orcafascio.com/.
[2] SINAPI — Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil, 11/2023, Paraíba.
[3] SBC — Base de dados Stabile, 12/2023, João Pessoa, Paraíba



| ITEM | CÓDIGO | BANCO | DESCRIÇÃO | UND | QUANT. | VALOR UNIT | VALOR COM BDI | TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | ARMAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM CONCRETO ARMADO | | 1 | | | 813.678,51 |
| 1.1 | | | ARMAÇÃO DOS PILARES | | 1 | | | 254.840,62 |
| 1.2 | | | ARMAÇÃO DAS VIGAS | | 1 | | | 238.664,99 |
| 1.3 | | | ARMAÇÃO DAS LAJES | | 1 | | | 320.172,90 |
| 2 | | | CONCRETO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS | | 1 | | | 1.249.876,09 |
| 3 | | | FORMAS DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS | | 1 | | | 992.197,53 |
| 4 | | | PROTENSÃO | | 1 | | | 790.717,20 |
| 5 | | | FRETAGEM E PUNÇÃO | | 1 | | | 13.728,20 |



Figura 6.2: Orçamento da estrutura da Solução 02



| ITEM | CÓDIGO | BANCO | DESCRIÇÃO | UND | QUANT. | VALOR UNIT | VALOR COM BDI | TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | ARMAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM CONCRETO ARMADO | | 1 | | | 596.051,87 |
| 1.1 | | | ARMAÇÃO DOS PILARES | | 1 | | | 208.538,05 |
| 1.2 | | | ARMAÇÃO DAS VIGAS | | 1 | | | 67.340,92 |
| 1.3 | | | ARMAÇÃO DAS LAJES | | 1 | | | 320.172,90 |
| 2 | | | CONCRETO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS | | 1 | | | 1.154.309,47 |
| 3 | | | FORMAS DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS | | 1 | | | 687.494,75 |
| 4 | | | PROTENSÃO | | 1 | | | 707.668,50 |
| 5 | | | FRETAGEM E PUNÇÃO | | 1 | | | 13.728,20 |



Figura 6.3: Orçamento da estrutura da Solução 03

### 6.1.2 Taxas e Índices

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Área de Projeção do pavimento tipo (m²) | 414,00 |
| 2 | Área estruturada de pilar (m²) | 4,39 |
| 3 | Número de lajes da estrutura | 14 |
| 4 | Área total da estrutura (m²) | 5.796,00 |
| 5 | Volume de concreto dos pilares (m³) | 184,38 |
| 6 | Volume de concreto das vigas (m³) | 435,54 |
| 7 | Volume de concreto das lajes (m³) | 779,91 |
| 8 | Aço total ativo (kgf) | 0,00 |
| 9 | Aço total dos pilares (kgf) | 18.756 |
| 10 | Aço total das vigas (kgf) | 48.422 |
| 11 | Aço total das lajes (kgf) | 68.369 |
| 12 | Volume de concreto total da estrutura (m³) | 1.399,83 |
| 13 | Aço total da estrutura (kgf) | 135.547 |

Figura 6.4: Quantitativos da estrutura da Solução 01

| | |
|---|---|
| **Índices de seção dos pilares (2/1)** | **1,06%** |
| | |
| **Quantidade de estrutura (%m³)** | |
| **Pilares (5/12)** | **13,17%** |
| **Vigas (6/12)** | **31,11%** |
| **Lajes (7/12)** | **55,71%** |
| **TAXA DE CONCRETO (m³/m²)** | **0,24** |
| | |
| **Quantidade de armaduras (%kgf)** | |
| **Pilares (9/13)** | **13,84%** |
| **Vigas (10/13)** | **35,72%** |
| **Lajes (12/13)** | **50,44%** |
| **TAXA DE AÇO (kgf/m²)** | **23,39** |
| | |
| **Taxa de armadura ativa (kgf/m²)** | **0** |
| | |
| **Custo total da estrutura** | **R$ 3.849.665,17** |
| | |
| **Custo da estrutura por metro quadrado (R$/m²)** | **R$ 664,19** |

Figura 6.5: Taxas e índices da estrutura da Solução 01

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Área de Projeção do pavimento tipo (m²) | 414,00 |
| 2 | Área estruturada de pilar (m²) | 4,65 |
| 3 | Número de lajes da estrutura | 14 |
| 4 | Área total da estrutura (m²) | 5.796,00 |
| 5 | Volume de concreto dos pilares (m³) | 185,47 |
| 6 | Volume de concreto das vigas (m³) | 272,52 |
| 7 | Volume de concreto das lajes (m³) | 1.202,27 |
| 8 | Aço total ativo (kgf) | 47.320,00 |
| 9 | Aço total dos pilares (kgf) | 25.454 |
| 10 | Aço total das vigas (kgf) | 22.063 |
| 11 | Aço total das lajes (kgf) | 31.865 |
| 12 | Volume de concreto total da estrutura (m³) | 1.660,26 |
| 13 | Aço total da estrutura (kgf) | 126.702 |

Figura 6.6: Quantitativos da estrutura da Solução 02

| | |
|---|---|
| **Índices de seção dos pilares (2/1)** | **1,12%** |
| | |
| **Quantidade de estrutura (%m³)** | |
| **Pilares (5/12)** | **11,17%** |
| **Vigas (6/12)** | **16,41%** |
| **Lajes (7/12)** | **72,41%** |
| **TAXA DE CONCRETO (m³/m²)** | **0,29** |
| | |
| **Quantidade de armaduras (%kgf)** | |
| **Pilares (9/13)** | **20,09%** |
| **Vigas (10/13)** | **17,41%** |
| **Lajes (12/13)** | **25,15%** |
| **TAXA DE AÇO (kgf/m²)** | **21,86** |
| | |
| **Taxa de armadura ativa (kgf/m²)** | **8,2** |
| | |
| **Custo total da estrutura** | **R$ 3.860.197,53** |
| | |
| **Custo da estrutura por metro quadrado (R$/m²)** | **R$ 666,01** |

Figura 6.7: Taxas e índices da estrutura da Solução 02

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Área de Projeção do pavimento tipo (m²) | 414,00 |
| 2 | Área estruturada de pilar (m²) | 5,44 |
| 3 | Número de lajes da estrutura | 14 |
| 4 | Área total da estrutura (m²) | 5.796,00 |
| 5 | Volume de concreto dos pilares (m³) | 219,79 |
| 6 | Volume de concreto das vigas (m³) | 20,30 |
| 7 | Volume de concreto das lajes (m³) | 1.294,91 |
| 8 | Aço total ativo (kgf) | 42.350,00 |
| 9 | Aço total dos pilares (kgf) | 20.604 |
| 10 | Aço total das vigas (kgf) | 8.087 |
| 11 | Aço total das lajes (kgf) | 31.865 |
| 12 | Volume de concreto total da estrutura (m³) | 1.535,00 |
| 13 | Aço total da estrutura (kgf) | 102.906 |

Figura 6.8: Quantitativos da estrutura da Solução 03

| | |
|---|---|
| Índices de seção dos pilares (2/1) | 1,31% |
| | |
| Quantidade de estrutura (%m³) | |
| Pilares (5/12) | 14,32% |
| Vigas (6/12) | 1,32% |
| Lajes (7/12) | 84,36% |
| TAXA DE CONCRETO (m³/m²) | 0,26 |
| | |
| Quantidade de armaduras (%kgf) | |
| Pilares (9/13) | 20,02% |
| Vigas (10/13) | 7,86% |
| Lajes (12/13) | 30,97% |
| TAXA DE AÇO (kgf/m²) | 17,75 |
| | |
| Taxa de armadura ativa (kgf/m²) | 7,3 |
| | |
| Custo total da estrutura | R$ 3.159.252,79 |
| | |
| Custo da estrutura por metro quadrado (R$/m²) | R$ 545,07 |

Figura 6.9: Taxas e índices da estrutura da Solução 03

## 6.2 Comparações

| | LAJE LISA PROTENDIDA COM ALTERAÇÕES | LAJE LISA PROTENDIDA | MACIÇAS COM VIGAS |
|---|---|---|---|
| Índice de seção de pilares | 1,31% | 1,12% | 1,06% |
| | | | |
| | Quantidade de estrutura (%m³) | | |
| PILARES | 14,32% | 11,17% | 13,17% |
| VIGAS | 1,32% | 16,41% | 31,11% |
| LAJES | 84,36% | 72,41% | 55,71% |
| | | | |
| CUSTO TOTAL EST. | R$ 3.159.252,79 | R$ 3.860.197,53 | R$ 3.846.712,06 |
| | | | |
| PREÇO EST/M² | R$ 545,07 | R$ 666,01 | R$ 663,68 |
| | | | |
| | Quantidade de armaduras (%kgf) | | |
| PILARES | 20,02% | 20,09% | 13,84% |
| VIGAS | 7,86% | 17,41% | 35,72% |
| LAJES | 30,97% | 25,15% | 50,44% |
| PROTENSÃO | 41,15% | 37,35% | 0,00% |
| | | | |
| TAXA DE CONCRETO (kgf/m²) | 0,26 | 0,29 | 0,24 |
| | | | |
| TAXA DE AÇO | 17,75 | 21,86 | 23,39 |

Figura 6.10: Análise comparativa entre as soluções

# Índice


C

Comparações . . . . . 26

D

Definições de Norma . . . . . 6

I

Introdução . . . . . 5

R

Recomendações das Normas Relativas à Incêndio 8
Resultados . . . . . 21

S

Sistema Estrutural em Concreto Armado com Lajes Maciças e Vigas . . . . . 9
Sistema Estrutural em Laje Lisa Protendida . . . 13
Sistema Estrutural em Laje Lisa Protendida com Alterações . . . . . 17