



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ENGENHARIAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EIKE ITALO SOUSA E SILVA

**APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) PARA PRÉ  
DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO UTILIZANDO  
LARGE LANGUAGE MODEL (LLM)**

ANGICOS

2025

EIKE ITALO SOUSA E SILVA

**APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) PARA PRÉ  
DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO UTILIZANDO  
LARGE LANGUAGE MODEL (LLM)**

Trabalho Final de Graduação apresentado a  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Kleber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr.

Co-orientador: Janaina Salustio da Silva, Prof<sup>a</sup>.  
Dra.

ANGICOS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725a Slva, Eike Italo Sousa e.  
Aplicação de inteligência artificial (IA) para  
pré dimensionamento de estruturas: estudo de  
caso utilizando large language model (LLM) /  
Eike Italo Sousa e Slva. - 2025.  
76 f. : il.

Orientador: Kleber Cavalcanti Cabral.  
Coorientador: Janaina Salusticio da Silva.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,  
2025.

1. Pré-dimensionamento. 2. Concreto armado.  
3. ChatGPT. 4. Large Language Model. 5.  
Estrutura. I. Cabral, Kleber Cavalcanti, orient.  
II. Silva, Janaina Salusticio da, co-orient. III.  
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos  
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte  
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

EIKE ITALO SOUSA E SILVA

**APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) PARA PRÉ  
DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO UTILIZANDO  
LARGE LANGUAGE MODEL (LLM)**

Trabalho Final de Graduação apresentado a  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 16/ 12 / 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Kleber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente

---

Janaina Salusticio da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

---

Arthur Gomes Dantas de Araujo, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

---

Luis Henrique Gonçalves Costa, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus em primeiro lugar por me proporcionar esse momento de vitória.

Agradeço a minha família, em especial meus pais, tios e avós que sempre me apoiaram.

Agradeço aos professores por esses longos anos de aprendizado, em especial, o professor Luiz, a professora Marcilene, a professora Janaina, o professor Arthur, o professor Osvaldo, a professora Roselene, entre muitos outros ótimos professores.

Agradeço Orientador Kleber Cavalcanti Cabral por me proporcionar um vasto conhecimento e por me orientar nessa jornada de conclusão de curso.

Agradeço a Banca Examinadora pela disponibilidade e atenção em participar da avaliação deste trabalho e pela colaboração na análise e discussão do mesmo.

Agradeço aos meus Amigos Lucas, Claudia, Izaque, Matheus, Carlos, Otacílio, Eluiza, Damires, Arimar, Amarildo, Willian, Melissa, aos amigos da CONSOLIDA e aos demais por me apoiarem sempre nessa vida acadêmica.

“O ódio é o lugar para onde vai o  
homem que não consegue suportar a tristeza.”  
Godo

## RESUMO

O pré-dimensionamento de estruturas em concreto armado é uma etapa crucial no projeto estrutural, pois estabelece as dimensões iniciais dos elementos, servindo de base para análises subsequentes e minimizando a incidência de erros. Atualmente, este processo é predominantemente manual e demanda esforço considerável dos projetistas para otimizar os parâmetros definidos, exceto quando empregada a Metodologia BIM. Nesse contexto, o presente trabalho propôs-se a analisar a aplicação de Large Language Models (LLMs), especificamente o ChatGPT, como ferramenta de apoio ao pré-dimensionamento de estruturas de concreto armado. O objetivo central foi investigar o potencial real das LLMs na automação dessa fase inicial do projeto, por meio de um estudo comparativo rigoroso. A pesquisa confrontou os resultados obtidos pelo método convencional consolidado com aqueles gerados pelo ChatGPT, avaliando a precisão e a confiabilidade da Inteligência Artificial. Embora a ferramenta demonstre potencial para agilizar a geração de dados preliminares, o estudo revelou limitações significativas. As falhas identificadas incluem a dificuldade da IA em interpretar corretamente a planta arquitetônica, dificuldade na interpretação de um roteiro sequencial, erro na análise de tabelas, o lançamento incorreto das lajes, além de outras significativas falhas. Tais inconsistências comprometem a precisão dos resultados estruturais, indicando que, apesar da promessa de automação, o uso do ChatGPT nesta etapa ainda exige cautela e validação profissional.

**Palavras-chave:** Pré-dimensionamento. Concreto armado. ChatGPT. Large Language Model. Estrutura. Métodos.

## **ABSTRACT (OPCIONAL)**

Preliminary dimensioning of reinforced concrete structures is a crucial step in structural design, as it establishes the initial dimensions of the elements, serving as a basis for subsequent analyses and minimizing the incidence of errors. Currently, this process is predominantly manual and demands considerable effort from designers to optimize the defined parameters, except when employing the BIM methodology. In this context, this work aimed to analyze the application of Large Language Models (LLMs), specifically ChatGPT, as a tool to support the preliminary dimensioning of reinforced concrete structures. The central objective was to investigate the real potential of LLMs in automating this initial phase of the project, through a rigorous comparative study. The research compared the results obtained by the consolidated conventional method with those generated by ChatGPT, evaluating the accuracy and reliability of Artificial Intelligence. Although the tool demonstrates potential to expedite the generation of preliminary data, the study revealed significant limitations. The identified flaws include the AI's difficulty in correctly interpreting the architectural plan, difficulty in interpreting a sequential roadmap, errors in table analysis, incorrect slab placement, and other significant flaws. These inconsistencies compromise the accuracy of the structural results, indicating that, despite the promise of automation, the use of ChatGPT at this stage still requires caution and professional validation.

**Keywords:** Preliminary design. Reinforced concrete. ChatGPT. Large Language Model. Structure. Methods.

## **LISTA DE FIGURAS**

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Fluxograma de etapas de pesquisa ..... | 30 |
| Figura 2 – Planta baixa.....                      | 43 |
| Figura 3 – Corte .....                            | 43 |
| Figura 4 – Lançamento estrutural .....            | 44 |
| Figura 5 – Detalhamento .....                     | 56 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Determinação da espessura da laje.....                                | 45 |
| Tabela 2 – Carregamento .....                                                    | 47 |
| Tabela 3 – Alvenaria.....                                                        | 47 |
| Tabela 4 – Momentos Positivos.....                                               | 49 |
| Tabela 5 – Momentos Negativos .....                                              | 50 |
| Tabela 6 – Área das Armaduras Positivas.....                                     | 52 |
| Tabela 7 – Área das Armaduras Negativas .....                                    | 52 |
| Tabela 8 – Armadura Positiva.....                                                | 53 |
| Tabela 9 – Armadura Negativa .....                                               | 54 |
| Tabela 10 – Comprimentos Utilizados .....                                        | 54 |
| Tabela 11 – Espessura da laje por ChatGPT, primeira tentativa .....              | 57 |
| Tabela 12 – Carregamentos pelo ChatGPT, primeira tentativa .....                 | 58 |
| Tabela 13 – Alvenaria pelo ChatGPT, primeira tentativa.....                      | 58 |
| Tabela 14 – Momentos positivos pelo ChatGPT, primeira tentativa .....            | 59 |
| Tabela 15 – Momentos Negativos pelo ChatGPT, primeira tentativa .....            | 59 |
| Tabela 16 – Área das Armaduras Positivas pelo ChatGPT, primeira tentativa .....  | 60 |
| Tabela 17 – Área das Armaduras Negativas pelo ChatGPT, primeira tentativa.....   | 60 |
| Tabela 18 – Armaduras Positivas pelo ChatGPT, primeira tentativa .....           | 61 |
| Tabela 19 – Armaduras Negativas direção x pelo ChatGPT, primeira tentativa ..... | 62 |
| Tabela 20 – Armaduras Negativas direção y pelo ChatGPT, primeira tentativa ..... | 62 |
| Tabela 21 – Comprimentos utilizados por ChatGPT, primeira tentativa.....         | 63 |
| Tabela 22 – Espessura da laje, segunda tentativa .....                           | 65 |
| Tabela 23 – Carregamentos e Alvenaria por ChatGPT, segunda tentativa.....        | 65 |
| Tabela 24 – Momentos positivos pelo ChatGPT, segunda tentativa .....             | 66 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 25 – Momentos positivos ChatGPT, segunda tentativa .....             | 66 |
| Tabela 26 – Área de Armadura Positiva pelo ChatGPT, segunda tentativa ..... | 67 |
| Tabela 27 – Área de Armadura Negativa pelo ChatGPT, segunda tentativa.....  | 67 |
| Tabela 28 – Armadura Positiva pelo ChatGPT, segunda tentativa.....          | 68 |
| Tabela 29 – Armadura Negativa pelo ChatGPT, segunda tentativa .....         | 68 |
| Tabela 30 – Comprimentos utilizados pelo ChatGPT, segunda tentativa.....    | 69 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |                                                              |
|---------|--------------------------------------------------------------|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                     |
| ELU     | Estado Limite Último                                         |
| ELS     | Estado Limite de Serviço                                     |
| IA      | Inteligência Artificial                                      |
| LLM     | Large Language Model                                         |
| LLMs    | Large Language Models                                        |
| NBR     | Norma Brasileira (Norma Brasileira Regulamentadora, da ABNT) |
| AA      | Aprendizagem Automática                                      |
| MEF     | Método dos Elementos Finitos                                 |
| RNA     | Redes Neurais Artificiais                                    |
| BIM     | Building Information Modeling                                |
| SHM     | Structural Health Monitoring                                 |
| PLN     | Processamento de Linguagem Natural                           |
| XAI     | Explainable Artificial Intelligence                          |
| TQS     | Tecnologia, Qualidade e Sistema, software brasileiro         |
| SAP2000 | Structural Analysis Program 2000                             |
| ML      | Machine Learning                                             |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |                                            |
|---------------|--------------------------------------------|
| $\lambda$     | Lambda, Índice geométrico                  |
| $\varnothing$ | Diâmetro                                   |
| $\rho$        | Rho                                        |
| $\mu$         | Mi                                         |
| $\omega$      | Ômega                                      |
| $\gamma$      | Gama                                       |
| $l$           | Dimensão do vão                            |
| $t$           | Espessura da parede                        |
| $l^*$         | Comprimento efetivo                        |
| $n$           | Número de engastes                         |
| $d$           | Altura útil                                |
| $h$           | Espessura da laje                          |
| $c$           | Cobrimento nominal do concreto             |
| $\gamma$      | Peso específico                            |
| $f_{cd}$      | Resistência de cálculo do concreto         |
| $f_{yd}$      | Resistência de cálculo do aço              |
| $q$           | Carga                                      |
| $P$           | Peso                                       |
| $A$           | Área                                       |
| $L$           | Comprimento                                |
| $p$           | Carregamento                               |
| $m_x$         | Coeficiente tabelado para momento positivo |
| $m_y$         | Coeficiente tabelado para momento positivo |
| $n_x$         | Coeficiente tabelado para momento negativo |
| $n_y$         | Coeficiente tabelado para momento negativo |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                               | <b>17</b> |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>                                                                                                | <b>19</b> |
| <b>2.2 OBJETIVO GERAL.....</b>                                                                                         | <b>19</b> |
| 1.1.1 Objetivos Específicos.....                                                                                       | 19        |
| <b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                                                                     | <b>20</b> |
| <b>3.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO ARMADO .....</b>                                                             | <b>20</b> |
| <b>3.2 IMPORTÂNCIA DO PRÉ-DIMENSIONAMENTO NA ENGENHARIA CIVIL .....</b>                                                | <b>20</b> |
| 3.2.1 Relação Entre Pré-Dimensionamento e Etapas Subsequentes Do Projeto Estrutural<br>.....                           | 21        |
| 3.2.2 Parâmetros de Pré-Dimensionamento dos Elementos Estruturais Principais.....                                      | 21        |
| 3.2.3 Métodos Tradicionais de Cálculo e Suas Limitações.....                                                           | 22        |
| <b>3.3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS NA ENGENHARIA ESTRUTURAL.....</b>                                                          | <b>23</b> |
| 3.3.1 Histórico da Evolução do Cálculo Estrutural .....                                                                | 23        |
| 3.3.2 O Papel da Modelagem Computacional e da Automação de Processos.....                                              | 23        |
| <b>3.4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ENGENHARIA CIVIL .....</b>                                                           | <b>24</b> |
| 3.4.1 Conceitos Fundamentais de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina .....                                 | 24        |
| 3.4.1 Principais Aplicações da IA na Engenharia Civil.....                                                             | 25        |
| 3.4.1.1 Previsão de Comportamento de Materiais .....                                                                   | 25        |
| 3.4.1.2 Otimização de Projetos e Processos Construtivos .....                                                          | 25        |
| 3.4.1.3 Análise de Desempenho Estrutural e Detecção de Falhas.....                                                     | 25        |
| 3.4.2 Benefícios e Limitações da IA na Prática Profissional.....                                                       | 26        |
| <b>3.5 LARGE LANGUAGE MODELS (LLMs) E O CHATGPT NA ENGENHARIA .....</b>                                                | <b>26</b> |
| 3.5.1 Potencial dos LLMS como Ferramentas de Apoio ao Cálculo, Análise e<br>Documentação Técnica .....                 | 27        |
| 3.5.2 Aplicações Recentes de LLMS na Engenharia: Revisão de Literatura com<br>Aplicabilidade em Estruturas de CA ..... | 27        |
| 3.5.3 Vantagens e Limitações no uso do Chatgpt em Tarefas Técnicas.....                                                | 28        |
| 3.5.4 Desafios Éticos e Profissionais na Aplicação da IA.....                                                          | 28        |
| 3.5.5 O Papel do Engenheiro na Era da Inteligência Artificial: Novas Competências e<br>Perspectivas .....              | 29        |
| <b>4 METODOLOGIA.....</b>                                                                                              | <b>30</b> |

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.1 ETAPAS DA PESQUISA .....</b>                                        | <b>31</b> |
| 4.1.1 Objeto de Estudo .....                                               | 31        |
| 4.1.2 Pré-dimensionamento Tradicional.....                                 | 31        |
| 4.1.3 Pré-Dimensionamento Auxiliado por LLM .....                          | 37        |
| 4.1.3.1 Primeira Tentativa .....                                           | 38        |
| 4.1.3.2 Segunda Tentativa .....                                            | 39        |
| <b>5 PROCEDIMENTOS DE PARTIDA.....</b>                                     | <b>42</b> |
| <b>5.1 ESCOLHA DO PROJETO .....</b>                                        | <b>42</b> |
| <b>5.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS LAJES .....</b>                             | <b>43</b> |
| 5.2.1 Determinação da Espessura da Laje .....                              | 44        |
| 5.2.2 Determinação dos Carregamentos e Alvenaria .....                     | 46        |
| 5.2.3 Determinação dos Momentos Positivos e Negativos .....                | 47        |
| 5.2.3.1 Momento Positivo.....                                              | 48        |
| 5.2.3.2 Momento Negativo .....                                             | 49        |
| 5.2.4 Dimensionamento das Áreas das Armaduras .....                        | 50        |
| 5.2.4.1 Área da Armadura Positiva.....                                     | 51        |
| 5.2.4.2 Área da Armadura Negativa.....                                     | 52        |
| 5.2.5 Dimensionamento das Armaduras Positivas e Negativas.....             | 52        |
| 5.2.5.1 Armadura Positiva .....                                            | 53        |
| 5.2.5.2 Armadura Negativa.....                                             | 54        |
| 5.2.6 Detalhamento.....                                                    | 54        |
| 5.2.6.1 Lançamento do Detalhamento em Software.....                        | 55        |
| <b>6 RESULTADOS .....</b>                                                  | <b>56</b> |
| <b>6.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO COM INTELIGENCIA ARTIFICIAL (CHATGPT) .....</b> | <b>56</b> |
| 6.3.1 Primeira Tentativa .....                                             | 56        |
| 6.3.1.1 Espessura Da Laje.....                                             | 56        |
| 6.3.1.2 Carregamentos e Alvenaria.....                                     | 57        |
| 6.3.1.3 Momentos Positivos e Negativos.....                                | 58        |
| 6.3.1.4 Área das Armaduras Positivas e Negativas .....                     | 59        |
| 6.3.1.5 Armaduras Positivas e Negativas.....                               | 61        |
| 6.3.1.6 Detalhamento .....                                                 | 63        |
| 6.3.1.7 Discussões da Primeira Tentativa.....                              | 63        |
| 6.3.2 Segunda Tentativa .....                                              | 64        |

|          |                                                |           |
|----------|------------------------------------------------|-----------|
| 6.3.2.1  | Espessura da Laje .....                        | 64        |
| 6.3.2.2  | Carregamentos e Alvenaria.....                 | 65        |
| 6.3.2.3  | Momentos Positivos e Negativos.....            | 66        |
| 6.3.2.4  | Área das Armaduras Positivas e Negativas ..... | 66        |
| 6.3.2.5  | Armaduras Positivas e Negativas.....           | 67        |
| 6.3.2.6  | Detalhamento .....                             | 68        |
| 6.3.2.7  | Discussões da Segunda Tentativa.....           | 69        |
| <b>7</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>               | <b>70</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                        | <b>72</b> |
|          | <b>ANEXOS.....</b>                             | <b>76</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Civil, disciplina fundamental para o desenvolvimento e sustentabilidade das sociedades, tem sido historicamente impulsionada por avanços tecnológicos. Nas últimas décadas, a Quarta Revolução Industrial, marcada pela crescente digitalização e informatização, tem transformado a concepção, projeto e implementação de obras. Neste cenário de inovação contínua, a Inteligência Artificial (IA) emerge como um catalisador de uma nova revolução na área, redefinindo a forma como os projetos civis são abordados e executados (Dias et al., 2023).

A aplicação da IA na engenharia estrutural representa uma mudança significativa, prometendo superar desafios como a ineficiência de custos, atrasos em projetos, baixa qualidade e decisões desinformadas (Silva E Miranda, 2024). A IA, por meio de algoritmos e modelos matemáticos, permite simular o raciocínio humano e resolver problemas complexos, sendo amplamente aplicada em otimizações estruturais, minimização de peso e melhoria de desempenho (Soares Jr., 2024). O crescente interesse na aplicação de IA e Aprendizagem Automática (AA) no cálculo de estruturas abrange não apenas a viabilidade técnica, mas também a otimização de etapas cruciais como a concepção estrutural e o pré-dimensionamento (Soares Jr., 2024).

Um dos processos cruciais na fase inicial de um projeto estrutural é o pré-dimensionamento. Esta etapa é fundamental para o planejamento econômico do empreendimento, pois possibilita estimativas de custos mais precisas e confiáveis, conferindo vantagem competitiva durante a licitação e assegurando um melhor aproveitamento dos recursos (Mundim, 2025). O pré-dimensionamento, especialmente em estruturas de concreto armado, é um processo que envolve cálculos complexos e iterativos, fundamentados em normas técnicas como a NBR 6118 (ABNT, 2023), descrito por Glória (2005). Tradicionalmente, este processo envolve cálculos analíticos e numéricos convencionais, baseados em princípios da mecânica estrutural e resistência dos materiais, frequentemente realizados de forma manual ou com o auxílio de planilhas de cálculo (Mundim, 2025).

Embora consolidado, o método tradicional é suscetível a erros humanos, exige tempo considerável e depende fortemente do conhecimento empírico e da experiência profissional do engenheiro para a tomada de decisões e otimização dos parâmetros (Glória, 2005; Mundim, 2025). A subjetividade inerente ao processo, onde o engenheiro precisa conciliar a experiência com o rigor técnico, torna-o um ponto de estrangulamento na eficiência do projeto (Mundim, 2025).

A busca por soluções que atendam aos desafios da engenharia civil moderna, enfatizando a diversidade e a otimização de processos, tem impulsionado a adoção de novas tecnologias (Pereira e Costa, 2024). A integração da IA permite uma análise mais robusta e precisa, superando algumas das limitações dos métodos tradicionais, como a dificuldade em lidar com incertezas de parâmetros de entrada e condições de carga (Soares Jr., 2024).

Neste contexto de inovação, a ascensão dos Large Language Models (LLMs), como o ChatGPT, introduz uma nova fronteira para a aplicação da IA na Engenharia Civil. Os LLMs são modelos de aprendizado de máquina treinados em vastos volumes de dados textuais, capazes de compreender, raciocinar e gerar linguagem natural (Coelho, 2025; Soares Jr., 2024). No contexto do pré-dimensionamento, estas ferramentas surgem como aliadas poderosas para agilizar e aprimorar as decisões de projeto, permitindo a simulação de múltiplos cenários e a otimização da entrada de informações (Mundim, 2025).

A capacidade dos LLMs de processar e sintetizar grandes volumes de informações textuais, incluindo normas técnicas, manuais e artigos científicos, sugere um potencial significativo para auxiliar o engenheiro na fase de pré-dimensionamento. Ao atuar como um assistente inteligente, o LLM pode fornecer suporte ágil, sugerindo parâmetros iniciais e realizando verificações preliminares, o que pode reduzir o tempo de execução e os erros (Mundim, 2025). Apesar do potencial transformador, a integração de LLMs em tarefas técnicas de engenharia não está isenta de desafios.

A precisão e a confiabilidade dos resultados gerados por LLMs em contextos estruturais ainda são objeto de investigação, e a ferramenta pode apresentar limitações, como a geração de informações fictícias, conhecidas como "alucinações" (Mundim, 2025). Além disso, a complexidade estrutural dos problemas de engenharia exige que o uso de LLMs seja acompanhado de uma validação rigorosa, respeitando os limites normativos (Oliveira, 2025). A necessidade de Engenharia de Prompt e a variação de desempenho entre diferentes LLMs também são fatores que exigem cautela e estudo aprofundado (Nascimento, 2024).

Neste cenário de rápida evolução tecnológica e de desafios persistentes no processo de pré-dimensionamento, o presente trabalho se insere como um estudo exploratório e comparativo. Propõe-se uma análise comparativa entre o método tradicional de pré-dimensionamento de estruturas de concreto armado de pequeno porte, fundamentado na NBR 6118 (ABNT, 2023), e a abordagem utilizando um Large Language Model (LLM) como ferramenta de Inteligência Artificial.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho define objetivos que orientam a avaliação do uso de Inteligência Artificial no pré-dimensionamento de estruturas de concreto armado. Partindo do procedimento tradicional previsto na NBR 6118 (ABNT, 2023) e da necessidade de métodos mais ágeis e reprodutíveis para edificações de pequeno porte. Assim, propõe-se comparar o desempenho do método convencional com uma abordagem baseada em Large Language Models (LLM), especificamente o ChatGPT, em um estudo de caso representativo. O objetivo geral e os objetivos específicos detalham as etapas de análise, experimentação e avaliação (precisão, tempo e consistência), bem como os limites e implicações práticas para a engenharia estrutural, fornecendo evidências para o uso responsável da IA nessa fase do projeto.

### 2.2 Objetivo Geral

Realizar um estudo comparativo entre o método tradicional de pré-dimensionamento de estruturas de concreto armado, fundamentado na NBR 6118 (ABNT, 2023), e a abordagem utilizando o modelo de linguagem ChatGPT como ferramenta de Inteligência Artificial.

#### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Aplicar o método tradicional de pré-dimensionamento de estruturas de concreto armado, voltado para lajes, em um estudo de caso representativo, estabelecendo-o como referencial de comparação para a ferramenta de Inteligência Artificial.
- Investigar, com base na literatura técnica e científica, o potencial da Inteligência Artificial, em especial os Large Language Models (ChatGPT), para a otimização do pré-dimensionamento estrutural.
- Comparar sistematicamente a eficiência e a precisão do método tradicional e da ferramenta de IA selecionada em estudo de caso representativo.
- Avaliar o desempenho da Inteligência Artificial em relação ao método convencional, analisando o impacto na eficiência e na confiabilidade dos resultados.
- Validar o potencial da Inteligência Artificial como um recurso transformador na engenharia estrutural, especialmente na fase de pré-dimensionamento.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

O projeto de estruturas de concreto armado é uma das áreas mais tradicionais e críticas da Engenharia Civil. A segurança, a durabilidade e a economia de uma edificação dependem diretamente da correta concepção e dimensionamento de seus elementos estruturais.

#### **3.1 Comportamento Mecânico do Concreto Armado**

O concreto armado é um material compósito que combina o concreto simples e o aço, aproveitando as propriedades complementares de cada um. O concreto, material de baixo custo e alta resistência à compressão, é deficiente em resistência à tração. O aço, por sua vez, possui alta resistência à tração e ductilidade. A combinação desses materiais resulta em um elemento estrutural capaz de resistir a todos os tipos de esforços solicitantes (Fugiyama, 2022; Matildes, 2024).

O comportamento mecânico do concreto armado é complexo e não-linear, sendo tradicionalmente analisado em três estádios: Estádio I (antes da fissuração), Estádio II (após a fissuração, com o concreto ainda contribuindo na zona de tração) e Estádio III (após a fissuração, com o concreto na zona de tração desconsiderado e o aço absorvendo toda a tração) (Soares Jr., 2024). A consideração da não-linearidade física é crucial, pois o concreto não apresenta um comportamento elástico-linear até a ruptura, e a fissuração altera significativamente a rigidez da peça. A análise não-linear de vigas e colunas, por exemplo, é essencial para simular o comportamento real da estrutura, especialmente sob carregamentos extremos ou em elementos esbeltos (Melo, 2019; Cardoso, 2024).

A análise do comportamento dos estados-limites últimos (ELU) e de serviço (ELS) é fundamental para garantir que a estrutura atenda aos requisitos de segurança e funcionalidade ao longo de sua vida útil (ABNT NBR 6118, 2023). A verificação simultânea dos ELU e ELS em análises não-lineares é um desafio constante na pesquisa acadêmica, dada a complexidade de modelar a degradação da rigidez e a redistribuição de esforços (Vasconcelos, 2005).

#### **3.2 Importância do Pré-Dimensionamento na Engenharia Civil**

O pré-dimensionamento estrutural é a etapa inicial e crucial do projeto, consistindo na estimativa das dimensões preliminares dos elementos estruturais (pilares, vigas e lajes) antes da análise estrutural detalhada (Melo, 2013).

O conceito de pré-dimensionamento está ligado à necessidade de fornecer ao arquiteto e ao projetista uma base geométrica para o lançamento da estrutura, garantindo que as dimensões iniciais sejam razoáveis e compatíveis com a arquitetura e os requisitos normativos. As etapas envolvem a definição do sistema estrutural (concepção estrutural), a estimativa das cargas e a aplicação de métodos simplificados ou empíricos para determinar as dimensões iniciais. O principal objetivo é garantir a viabilidade técnica e econômica do projeto desde o início, evitando retrabalhos onerosos nas fases posteriores (Glória, 2005).

Um pré-dimensionamento bem-feito é aquele que se aproxima o máximo possível do resultado final do dimensionamento, otimizando o uso de materiais e o tempo de projeto (Martins, 2024). A importância do pré-dimensionamento reside no fato de que ele é o primeiro filtro de otimização, onde o engenheiro utiliza seu conhecimento e experiência para evitar soluções estruturais ineficientes que seriam detectadas apenas na fase de análise computacional (Mundim, 2025).

### 3.2.1 Relação Entre Pré-Dimensionamento e Etapas Subsequentes Do Projeto Estrutural

O pré-dimensionamento é o elo entre a concepção arquitetônica e a análise estrutural. As dimensões preliminares definidas nesta fase são a entrada para a modelagem e análise computacional. Se o pré-dimensionamento for inadequado, com elementos muito pequenos ou muito grandes, as etapas subsequentes serão comprometidas. Elementos subdimensionados resultarão em esforços excessivos, levando a um longo processo de iteração no software de cálculo, com a necessidade de aumentar as dimensões e refazer a modelagem, o que gera atrasos e custos. Por outro lado, elementos superdimensionados resultarão em um projeto antieconômico, com desperdício de material (concreto e aço) e aumento do peso próprio da estrutura, o que pode impactar negativamente as fundações (Glória, 2005).

Portanto, a qualidade do pré-dimensionamento influencia diretamente a eficiência do processo de dimensionamento final, a economia da obra e a satisfação do cliente. A precisão desta fase inicial é um fator multiplicador de eficiência, pois reduz o número de ciclos de análise e otimização necessários para se chegar a um projeto final seguro e econômico (Trento, 2023).

### 3.2.2 Parâmetros de Pré-Dimensionamento dos Elementos Estruturais Principais

O pré-dimensionamento de pilares, vigas e lajes é guiado por critérios de rigidez, resistência e durabilidade. O pré-dimensionamento de lajes é determinado principalmente pela

espessura mínima, que é função do tipo de laje (maciça, nervurada), do vão e das condições de apoio, visando o controle de flechas e vibrações.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) é a norma técnica brasileira que rege o projeto de estruturas de concreto. Ela estabelece os requisitos básicos para o projeto, incluindo critérios para o pré-dimensionamento. A norma não fornece fórmulas diretas para o pré-dimensionamento, mas impõe limites mínimos e critérios de verificação que indiretamente guiam a escolha das dimensões iniciais. Por exemplo, os limites de esbeltez e as condições de durabilidade (cobrimento mínimo) influenciam diretamente as dimensões mínimas dos elementos, garantindo que a estrutura atenda aos requisitos de segurança e vida útil (NBR 6118, ABNT 2023).

A versão de 2023 da norma trouxe atualizações importantes, especialmente no que tange aos critérios de durabilidade e aos requisitos de detalhamento, que devem ser considerados desde a fase de pré-dimensionamento. A norma exige que o engenheiro utilize seu conhecimento e experiência para a concepção estrutural, sendo o pré-dimensionamento o primeiro passo para a verificação da conformidade com os requisitos de segurança e serviço (Silva, 2023).

### 3.2.3 Métodos Tradicionais de Cálculo e Suas Limitações

Os métodos tradicionais de cálculo estrutural foram, e continua sendo, a base do projeto estrutural por décadas. Esses métodos, embora fundamentais para a compreensão da mecânica estrutural, são trabalhosos e demorados, especialmente para estruturas complexas com múltiplos pavimentos e irregularidades geométricas (Marinho, 2020).

As limitações desses métodos são evidentes. A primeira e mais crítica é a complexidade e o tempo demandado. O cálculo manual de estruturas hiperestáticas complexas é extremamente propenso a erros e exige um tempo de dedicação inviável para os prazos atuais de projeto. A segunda limitação reside nas simplificações excessivas necessárias para tornar o cálculo manual viável, o que pode levar a resultados distantes do comportamento real da estrutura, especialmente em relação à rigidez e à distribuição de esforços. Por fim, a dificuldade em considerar não-linearidades, como os efeitos de segunda ordem (P-Delta) e a não-linearidade física do material (comportamento do concreto após a fissuração), é um obstáculo intransponível para os métodos tradicionais (Fontana, 2006). A superação dessas limitações impulsionou a busca por ferramentas que pudessem automatizar e refinar o processo de cálculo, marcando o início da era tecnológica na Engenharia Estrutural.

### 3.3 Avanços Tecnológicos na Engenharia Estrutural

A Engenharia Estrutural tem sido um campo de constante evolução tecnológica, impulsionada pela necessidade de projetar estruturas mais complexas, seguras e econômicas. Nesse contexto, o papel do engenheiro estrutural amplia-se, exigindo constante atualização profissional e domínio de tecnologias emergentes. Assim, a Engenharia Estrutural consolida-se como uma área estratégica para o desenvolvimento da infraestrutura e para a garantia da segurança e durabilidade das edificações e obras de arte especiais.

#### 3.3.1 Histórico da Evolução do Cálculo Estrutural

O histórico da evolução do cálculo estrutural é marcado por uma transição do método manual para o computacional. Na primeira metade do século XX, o cálculo era predominantemente manual, utilizando ferramentas como a régua de cálculo e métodos simplificados (Carvalho, 2016). O engenheiro dependia de tabelas, ábacos e métodos aproximados, como o Método de Cross, para resolver problemas de estruturas hiperestáticas (Marinho, 2020).

A revolução começou com o advento dos computadores na segunda metade do século XX. A capacidade de processamento permitiu a aplicação de métodos mais rigorosos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), que se tornou o padrão-ouro para a análise estrutural (Soares Jr., 2024). O MEF, cuja teoria básica foi publicada em 1943, consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos interconectados, permitindo a simulação de geometrias complexas e a consideração de não-linearidades com precisão sem precedentes (Lotti, 2006; Azevedo, 2003). O desenvolvimento do MEF foi o catalisador para a criação dos softwares de análise estrutural modernos.

#### 3.3.2 O Papel da Modelagem Computacional e da Automação de Processos

A modelagem computacional e a automação de processos transformaram o projeto estrutural. Softwares especializados, como TQS, Eberick e SAP2000, permitem que o engenheiro modele a estrutura em um ambiente virtual, aplique as cargas e realize a análise e o dimensionamento de acordo com as normas vigentes (Rachadel, 2012).

O papel da modelagem computacional é permitir a análise de estruturas complexas em 3D, considerando a interação entre todos os elementos e os efeitos de segunda ordem. A automação de processos engloba desde a geração automática de combinações de carga até o detalhamento final das armaduras e a emissão de relatórios (Carvalho, 2016). O uso desses softwares não apenas aumenta a velocidade do projeto, mas também a segurança, ao reduzir a probabilidade de erros humanos inerentes ao cálculo manual (Miranda e Silva, 2022). No entanto, a dependência excessiva desses softwares pode levar à perda da intuição estrutural do engenheiro, reforçando a importância do pré-dimensionamento manual como etapa de verificação e concepção (Branchier e Gauer, 2020).

### **3.4 Inteligência Artificial na Engenharia Civil**

A Inteligência Artificial (IA) representa um marco na evolução tecnológica da Engenharia Civil, sendo um dos pilares da chamada Indústria 4.0. Sua aplicação transcende a simples automação, promovendo uma reconfiguração estrutural do próprio fazer da engenharia (Silva, 2025).

Nesse contexto, a atuação do engenheiro civil passa a exigir novas competências digitais, bem como uma postura crítica frente às recomendações geradas pelos modelos computacionais, consolidando a IA como ferramenta estratégica para a inovação e a tomada de decisão na Engenharia Civil contemporânea.

#### **3.4.1 Conceitos Fundamentais de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina**

A Inteligência Artificial pode ser definida como a capacidade de sistemas computacionais de simular a inteligência humana para realizar tarefas como aprendizado, raciocínio, percepção e tomada de decisão (Barboza e Aguiar, 2025). Dentro do vasto campo da IA, o Aprendizado de Máquina (Machine Learning - ML) é a subárea que permite aos sistemas aprenderem a partir de dados, identificar padrões e fazer previsões ou tomar decisões com mínima intervenção humana (Soares Jr., 2024). O ML é o motor por trás de muitas aplicações na engenharia, utilizando algoritmos como Redes Neurais Artificiais (RNA), Algoritmos Genéticos e Lógica Fuzzy para resolver problemas complexos de otimização e classificação (Krusche, 2023). A capacidade de processar grandes volumes de dados (Big Data) e extrair conhecimento útil é o que torna o ML uma ferramenta indispensável para a otimização de projetos e processos construtivos.

### 3.4.1 Principais Aplicações da IA na Engenharia Civil

A IA tem se mostrado versátil na área da Engenharia Civil, com aplicações em diversas fases do ciclo de vida de um projeto, desde a sua criação até todo o seu processo construtivo.

#### 3.4.1.1 Previsão de Comportamento de Materiais

A IA é amplamente utilizada para prever o comportamento de materiais de construção, como a resistência à compressão do concreto, a durabilidade e a vida útil de componentes estruturais (Silva, 2025). Modelos de ML podem analisar a composição do concreto, as condições de cura e as variáveis ambientais para prever com precisão suas propriedades mecânicas, permitindo um controle de qualidade mais rigoroso e a otimização do mix design (Silva, et al, 2022). Além disso, a IA auxilia na detecção precoce de patologias e na previsão da degradação de materiais ao longo do tempo, contribuindo para a manutenção preventiva e a segurança estrutural (Palomino, 2012).

#### 3.4.1.2 Otimização de Projetos e Processos Construtivos

A otimização é uma das aplicações mais significativas da IA na engenharia estrutural. Algoritmos de otimização buscam a solução mais eficiente em termos de custo, material e desempenho, considerando milhares de variáveis e restrições normativas (Silva e Miranda, 2024). No projeto, a IA pode sugerir a geometria ideal de elementos estruturais, minimizando o volume de concreto e aço. Nos processos construtivos, a IA otimiza o planejamento, a alocação de recursos e a logística do canteiro de obras, reduzindo o tempo de execução e os custos operacionais (Barboza e Aguiar, 2025). A integração da IA com a Modelagem da Informação da Construção (BIM) potencializa essa otimização, criando gêmeos digitais que permitem simulações precisas antes da execução física (Zhang, 2025).

#### 3.4.1.3 Análise de Desempenho Estrutural e Detecção de Falhas

A IA desempenha um papel crucial na análise de desempenho estrutural e na detecção de falhas. Por meio do Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM - Structural Health Monitoring), sensores instalados nas estruturas coletam dados em tempo real. Algoritmos de ML processam esses dados para identificar padrões anômalos que possam indicar danos, trincas

ou falhas estruturais incipientes (Palomino, 2012). Essa capacidade de diagnóstico precoce é vital para a segurança, permitindo intervenções rápidas e direcionadas, o que é especialmente importante em estruturas críticas como pontes e edifícios altos. A IA, portanto, transforma a manutenção de reativa para preditiva, aumentando a segurança e a vida útil da estrutura (Silva, 2025).

### 3.4.2 Benefícios e Limitações da IA na Prática Profissional

A adoção da IA na Engenharia Civil traz benefícios inegáveis, como o aumento da eficiência e da velocidade na elaboração de projetos, a melhoria da segurança estrutural através da otimização e da detecção de falhas, e a redução de custos por meio da minimização do desperdício de materiais (Barboza e Aguiar, 2025).

No entanto, a IA também apresenta limitações que precisam ser gerenciadas. A principal delas é a dependência de dados de alta qualidade para o treinamento dos modelos; dados incompletos ou viesados podem levar a resultados que não satisfaçam a sua aplicabilidade, levando a erros. Outra limitação é a "caixa preta" (Black Box) de alguns modelos de ML, que dificulta a compreensão de como a decisão foi tomada, o que é inaceitável em um campo onde a responsabilidade técnica é primordial. Além disso, a IA não substitui a intuição e o conhecimento tácito do engenheiro, sendo uma ferramenta de apoio e não um substituto para o julgamento profissional (Branchier e Gauer, 2020).

## 3.5 Large Language Models (LLMs) e o ChatGPT na Engenharia

Os Large Language Models (LLMs) representam a vanguarda da Inteligência Artificial, com potencial disruptivo para o processamento de informações textuais e a interação humana-máquina na engenharia.

Os LLMs, como o ChatGPT, são modelos de IA baseados na arquitetura Transformer, que utilizam mecanismos de atenção para processar e gerar linguagem natural (Ufrn, 2023). Eles são treinados em datasets massivos de texto, o que lhes confere a capacidade de compreender o contexto, gerar textos coerentes, resumir documentos e responder a perguntas complexas (Futago, 2025). O Processamento de Linguagem Natural (PLN) é o campo da IA que permite essa interação, e os LLMs são a sua manifestação mais avançada. Seu funcionamento se baseia na probabilidade de ocorrência de palavras e sequências, o que lhes permite simular a linguagem humana com alta fidelidade.

### 3.5.1 Potencial dos LLMS como Ferramentas de Apoio ao Cálculo, Análise e Documentação Técnica

O potencial dos LLMs na engenharia reside na sua capacidade de atuar como um assistente de conhecimento multifuncional. Embora não sejam softwares de cálculo estrutural, esses modelos podem apoiar o cálculo e a análise ao interpretar e traduzir requisitos normativos complexos em parâmetros de cálculo, auxiliando o engenheiro especialmente na fase de pré-dimensionamento (Mundim, 2025).

Além disso, sua capacidade de resumir informações e gerar textos coerentes mostra-se particularmente valiosa na elaboração de relatórios técnicos, especificações de projeto e documentação de conformidade, contribuindo para a agilização de etapas burocráticas e para a padronização da comunicação técnica (Belarmino, 2025).

No âmbito da gestão do conhecimento, os LLMs podem processar grandes volumes de dados provenientes de projetos anteriores, como relatórios, memoriais de cálculo e registros técnicos, organizando-os e transformando-os em conhecimento acessível. Dessa forma, atuam como um repositório inteligente de “lições aprendidas”, permitindo a recuperação rápida de referências e boas práticas para subsidiar decisões em novos projetos (Zhang, 2025).

### 3.5.2 Aplicações Recentes de LLMS na Engenharia: Revisão de Literatura com Aplicabilidade em Estruturas de CA

A literatura recente tem explorado ativamente a aplicabilidade dos LLMs em estruturas de Concreto Armado (CA), evidenciando seu potencial como ferramenta de apoio ao engenheiro estrutural. Estudos indicam que LLMs, como o ChatGPT, podem ser empregados no pré-dimensionamento auxiliado, por meio da comparação entre resultados obtidos por métodos tradicionais e aqueles gerados com suporte de um modelo de linguagem, demonstrando que a ferramenta é capaz de fornecer sugestões iniciais razoáveis, ainda que dependentes de rigorosa validação por parte do engenheiro responsável (Mundim, 2025).

Além disso, LLMs têm sido testados na interpretação de cláusulas específicas da NBR 6118, funcionando como um motor de busca semântico capaz de localizar e explicar requisitos complexos, o que contribui para a verificação de conformidade normativa e para a redução de ambiguidades na leitura da norma (Zhang, 2025).

No campo da análise de risco, modelos de linguagem também vêm sendo utilizados para examinar relatórios de inspeção, identificar padrões de vulnerabilidade em estruturas existentes

e sugerir prioridades de manutenção, apoiando, assim, decisões estratégicas na gestão da durabilidade e segurança das construções (Erfani, 2025).

### 3.5.3 Vantagens e Limitações no uso do ChatGPT em Tarefas Técnicas

O uso de LLMs como o ChatGPT em tarefas técnicas apresenta vantagens claras, como a rapidez na obtenção de informações, a democratização do acesso a ferramentas de PLN e a eficiência na síntese de grandes volumes de texto.

Contudo, as limitações são críticas no contexto da engenharia. A principal é a propensão a "alucinações", onde o modelo gera informações factualmente incorretas, mas apresentadas de forma convincente (Mundim, 2025). No cálculo estrutural, um erro de interpretação normativa ou de cálculo pode ter consequências catastróficas. Outra limitação é a falta de rastreabilidade e a dificuldade em verificar a fonte primária da informação gerada, o que compromete a conformidade com normas e a responsabilidade técnica. Portanto, o ChatGPT deve ser visto como um assistente de primeira linha, e não como uma fonte final de verdade técnica.

### 3.5.4 Desafios Éticos e Profissionais na Aplicação da IA

A crescente integração da IA e dos LLMs na Engenharia Civil levanta questões éticas e profissionais que exigem reflexão e regulamentação. A responsabilidade técnica constitui um ponto central desse debate, uma vez que, em caso de erro no cálculo estrutural que venha a resultar em falha, a responsabilidade recai integralmente sobre o engenheiro, mesmo que o equívoco tenha sido originado por um algoritmo de IA (Barboza e Aguiar, 2025).

Esse cenário impõe limites claros à automação: a decisão final e a validação do projeto devem permanecer sob o controle e o julgamento crítico do profissional, de modo que a IA seja entendida como um instrumento de apoio para aumento de eficiência, e não como substituto da responsabilidade legal e ética do engenheiro. Nesse sentido, torna-se fundamental que o profissional compreenda, ao menos em nível conceitual, o funcionamento dos algoritmos utilizados, de forma a ser capaz de auditar, questionar e validar os resultados obtidos.

Paralelamente, emergem questões relacionadas à confiabilidade, transparência e validação dos modelos. A confiabilidade da IA está diretamente associada ao grau de transparência de seus modelos, e a utilização de estruturas de "caixa preta" em projetos estruturais representa um risco ético relevante, pois inviabiliza a plena compreensão do processo decisório (Barboza e Aguiar, 2025). Nesse contexto, a busca por abordagens de IA

Explicável (XAI - Explainable Artificial Intelligence) surge como uma tendência necessária, pois visa tornar mais claros os critérios e relações internas que conduzem às soluções sugeridas, permitindo ao engenheiro avaliar sua coerência técnica.

A validação dos modelos deve configurar-se como um processo contínuo e rigoroso, baseado em dados reais, comparações com métodos consolidados e testes em diferentes cenários de carregamento e condições de contorno, assegurando que o comportamento do algoritmo seja seguro, previsível e adequado às exigências normativas e de segurança estrutural (Silva, et al, 2022).

### 3.5.5 O Papel do Engenheiro na Era da Inteligência Artificial: Novas Competências e Perspectivas

Na era da Inteligência Artificial, o papel do engenheiro não é diminuído, mas sim transformado. As novas competências exigidas incluem a capacidade de interagir com sistemas de IA, a proficiência em Engenharia de Prompt para extrair o máximo de valor dos LLMs, e um aprofundamento na ciência de dados para auditar e validar os resultados (Mundim, 2025).

A perspectiva é que o engenheiro se mova de um executor de cálculos para um gestor de conhecimento e um tomador de decisão estratégica, utilizando a IA para liberar tempo para a concepção estrutural criativa e a resolução de problemas complexos que exigem julgamento humano (Branchier e Gauer, 2020). O futuro da engenharia é colaborativo, onde a expertise humana e a capacidade de processamento da máquina se complementam para elevar o padrão de segurança e eficiência da construção civil.

## 4 METODOLOGIA

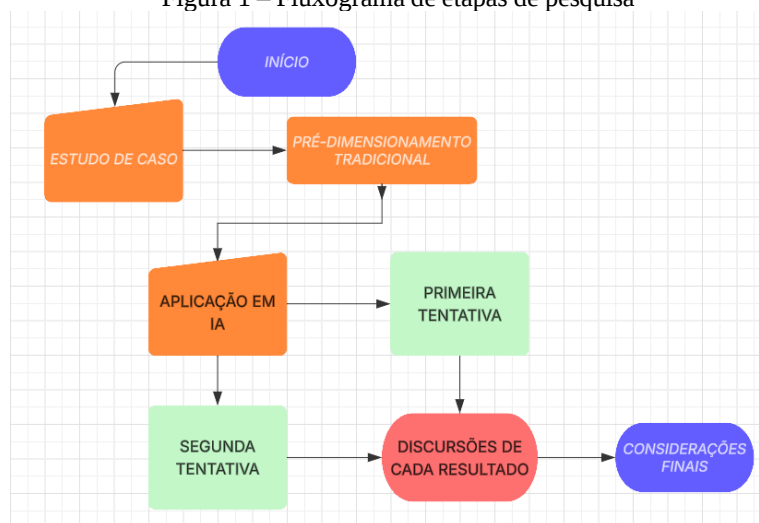
O tipo de pesquisa caracteriza-se como aplicada e de caráter experimental, pois será realizada a aplicação controlada de dois métodos de pré-dimensionamento estrutural — (I) método tradicional e (II) método assistido por LLM (ChatGPT) sobre o mesmo objeto de estudo, permitindo observar e comparar os resultados obtidos sob premissas equivalentes.

A abordagem da pesquisa é mista (quantitativa e qualitativa). A etapa quantitativa envolverá a coleta e análise de dados numéricos, como a espessura de laje, vão efetivos, levantamentos de cargas, além do tempo despendido na execução de cada método. A etapa qualitativa abarcará a análise da eficiência do processo e da qualidade das respostas do LLM, considerando critérios como clareza, consistência, rastreabilidade das premissas e o papel da engenharia de prompt, além da discussão de aspectos éticos e de confiabilidade.

Quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória e comparativa. É exploratória por investigar a aplicação de uma tecnologia emergente (LLMs) no contexto do pré-dimensionamento estrutural, buscando compreender potencialidades e limitações. É comparativa por analisar diferenças e similaridades entre os resultados produzidos pelo método tradicional e pelo método com LLM, utilizando métricas e critérios previamente definidos.

O método que orienta o trabalho é o estudo de caso, aplicado a uma planta baixa de uma edificação multifamiliar, associado à comparação de desempenho entre as duas abordagens, que fundamentará a análise crítica dos resultados e a síntese das conclusões. O fluxograma da Figura 1, representa as etapas que serão seguidas para as pesquisas realizadas nesse estudo:

Figura 1 – Fluxograma de etapas de pesquisa



Fonte: Autoria própria.

## 4.1 Etapas da Pesquisa

O presente estudo de caso visa estabelecer uma análise comparativa robusta entre duas abordagens distintas para a fase de pré-dimensionamento de elementos estruturais: o método tradicional, baseado em relações empíricas e normativas consolidadas, e o método assistido por Inteligência Artificial (IA), especificamente por meio de um Large Language Model (LLM, ChatGPT). A relevância desta comparação reside na avaliação da eficiência, precisão e conformidade normativa que a IA pode oferecer na otimização da etapa inicial do projeto estrutural. A pesquisa está estruturada em etapas sequenciais que garantem a replicabilidade e a validade dos resultados obtidos, conforme detalhado a seguir.

### 4.1.1 Objeto de Estudo

Como objeto de estudo, utilizou-se o caso de um edifício residencial multifamiliar com área construída de 124,34 m<sup>2</sup>, de geometria regular e características construtivas típicas.

O estudo de caso foi detalhado com as seguintes informações de entrada:

1. Planta Baixa Arquitetônica: Definição da geometria.
2. Planta Baixa Arquitetônica: Definição das cotas.
3. Layout dos elementos estruturais: Definição das lajes identificadas.
4. Planta de Corte: Definição das cotas de corte.

A estrutura selecionada serviu como base para a aplicação das duas metodologias de pré-dimensionamento a serem comparadas.

### 4.1.2 Pré-dimensionamento Tradicional

Esta etapa consistiu na aplicação dos métodos tradicionais e empíricos de pré-dimensionamento. O procedimento será realizado e documentado em um memorial de cálculo.

O método tradicional será focado exclusivamente no pré-dimensionamento de lajes, e incluirá: O pré-dimensionamento das lajes será realizado pela utilização de relações empíricas entre o vão e a espessura mínima, determinação dos carregamentos, determinação das armaduras positivas e negativas, tudo isso com a devida verificação dos limites mínimos estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023). O procedimento será aplicado a todas as lajes do pavimento tipo do estudo de caso.

As formulas utilizadas para cada etapa são especificadas a seguir:

## DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DA LAJE:

Determinação dos vão corrigidos, Equação 1:

$$l_{corrigido} = l_{livre} + \frac{t}{2} + \frac{t}{2} \quad (1)$$

Onde:

- $l_{livre}$  = Dimensão do vão livre;
- $t$  = espessura da parede;

Determinação do índice geométrico, Equação 2:

$$\lambda = \frac{l_{maior}}{l_{menor}} \quad (2)$$

Onde:

- $\lambda$  = índice geométrico do painel;
- $l_{maior}$  = maior vão efetivo;
- $l_{menor}$  = menor vão efetivo;

Determinação do comprimento efetivo, Equação 3:

$$l^* = \min(l_{menor}, 0,7 \cdot l_{maior}) \quad (3)$$

Onde:

- $l^*$  = comprimento efetivo;
- $l_{maior}$  = maior vão efetivo da laje;

Determinação da altura útil, Equação 4:

$$d = \frac{(2,5 - 0,1n) \cdot l^*}{100} \quad (4)$$

Onde:

- $d$  = altura útil;
- $n$  = número de engastes  $n$ ;

Determinação da espessura total da laje, Equação 5:

$$h = d + \frac{\phi}{2} + c \quad (5)$$

Onde:

- $h$  = espessura total da laje;
- $\varnothing$  = diâmetro da barra tracionada;
- $c$  = cobrimento nominal do concreto;

Determinação da espessura efetiva adotada em projeto, Equação 6:

$$h_{utilizado} = [h] \quad (6)$$

Onde:

- $h_{utilizado}$  = espessura adotada/compatibilizada;
- $[h]$  = espessura calculada/arredondada;

Determinação da espessura padrão do pavimento, Equação 7:

$$h_{adotado} = \max (h_{utilizado}) \quad (7)$$

Onde:

- $h_{adotado}$  = espessura padrão;
- $h_{utilizado}$  = espessura adotada/compatibilizada;

## DETERMINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS E ALVENARIA:

Determinação do peso próprio por área, Equação 8:

$$q_{pp} = \left( \frac{n}{100} \right) \cdot \gamma_{concreto} \quad (8)$$

Onde:

- $q_{pp}$  = carga permanente de peso próprio kgf/m<sup>2</sup>;
- $h$  = espessura da laje (m);
- $\gamma_{concreto}$  = peso específico do concreto (kgf/m<sup>3</sup>);

Determinação do peso de contribuição da alvenaria, Equação 9:

$$P_{alv} = L \cdot h_{pd} \cdot e \cdot \gamma_{alv} \quad (9)$$

Onde:

- $P_{alv}$  = peso total da alvenaria (kgf);
- $L$  = comprimento total de paredes sobre a laje (m);

- $h_{pd}$  = pé-direito/altura da parede (m);
- $e$  = espessura da parede (m);
- $\gamma_{alv}$  = peso específico da alvenaria (kgf/m<sup>3</sup>);

Determinação da carga superficial equivalente, Equação 10:

$$q_{alv} = \frac{P_{alv}}{A_{laje}} \quad (10)$$

Onde:

- $P_{alv}$  = carga equivalente de alvenaria na laje (kgf/m<sup>2</sup>);
- $q_{alv}$  = peso total de alvenaria (kgf);
- $A_{laje}$  = área da laje (m<sup>2</sup>);

Determinação de carga mínima de alvenaria, Equação 11:

$$q_{alv,cons} = \max(q_{alv}, 100) \quad (11)$$

Onde:

- $q_{alv,cons}$  = carga de alvenaria considerada no dimensionamento (kgf/m<sup>2</sup>);
- $q_{alv}$  = peso total de alvenaria (kgf);

Determinação do carregamento total atuante na laje, Equação 12:

$$q_{total} = q_{pp} + q_{pav} + q_{teto} + q_{alv,cons} + q_{acid} \quad (12)$$

Onde:

- $q_{total}$  = carregamento total por área (kgf/m<sup>2</sup>);
- $q_{pp}$  = carga permanente de peso próprio kgf/m<sup>2</sup>;
- $q_{pav}$  = carga permanente de piso/revestimento (kgf/m<sup>2</sup>);
- $q_{teto}$  = carga permanente de teto/revestimento inferior (kgf/m<sup>2</sup>);
- $q_{alv,cons}$  = carga de alvenaria considerada no dimensionamento (kgf/m<sup>2</sup>);

MOMENTO POSITIVO:

Determinação do comportamento da laje, Equação 13:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \quad (13)$$

Onde:

- $\lambda$  = coeficiente de comportamento da laje;
- $l_x$  = maior vão efetivo (m);
- $l_y$  = menor vão efetivo (m);

Determinação do momento positivo na direção x, Equação 14:

$$M_x^+ = \frac{p \cdot (l_x^2)}{m_x} \quad (14)$$

Onde:

- $M_x^+$  = momento positivo na direção x (kgf·m);
- $p$  = carregamento total (kgf/m²);
- $m_x$  = coeficiente tabelado para momento positivo em x;

Determinação do momento positivo na direção y, Equação 15:

$$M_y^+ = \frac{p \cdot (l_y^2)}{m_y} \quad (15)$$

Onde:

- $M_y^+$  = momento positivo na direção y (kgf·m);
- $p$  = carregamento total (kgf/m²);
- $m_y$  = coeficiente tabelado para momento positivo em y;

#### MOMENTO NEGATIVO:

Determinação do momento negativo na direção x, Equação 16:

$$M_x^- = \frac{p \cdot (l_x^2)}{n_x} \quad (16)$$

Onde:

- $M_x^-$  = momento negativo na direção x (kgf·m);
- $p$  = carregamento total (kgf/m²);
- $n_x$  = coeficiente tabelado para momento negativo em x;

Determinação do momento negativo na direção y, Equação 17:

$$M_y^- = \frac{p \cdot (l_y^2)}{n_y} \quad (17)$$

Onde:

- $M_y^-$  = momento negativo na direção y (kgf·m);
- $p$  = carregamento total (kgf/m²);
- $n_y$  = coeficiente tabelado para momento negativo em y;

#### ÁREA DA ARMADURA POSITIVA:

Determinação do momento reduzido, Equação 18:

$$\mu_o = \frac{M_d}{fcd \cdot b \cdot d^2} \quad (18)$$

Onde:

- $\mu_o$  = momento reduzido;
- $M_d$  = momento de cálculo (kgf·cm);
- $fcd$  = resistência de cálculo do concreto (kgf/cm²);
- $b$  = largura de cálculo (cm);
- $d^2$  = altura útil adotada (cm);

Determinação do coeficiente de momento fletor, Equação 19:

$$\omega_o = 0,85 \cdot \sqrt{0,85^2 - 1,7 \cdot \mu_o} \quad (19)$$

Onde:

- $\omega_o$  = parâmetro mecânico de armadura;

Determinação da área de aço tracionado por metro de laje, Equação 20:

$$A_s = \frac{\omega_o \cdot fcd \cdot b \cdot d}{fyd} \quad (20)$$

Onde:

- $A_s$  = área de aço necessária (cm²/m);
- $fyd$  = resistência de cálculo do aço (kgf/cm²);

Determinação da área de aço mínima. Equação 21:

$$A_{smin} = h(utornado) \cdot \rho \text{ (min, armadura positiva)} \quad (21)$$

Onde:

- $A_{smin}$  = área mínima de armadura ( $\text{cm}^2/\text{m}$ );
- $h(\text{utilizado})$  = resistência de cálculo do aço ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ );
- $\rho (\text{min})$  = taxa mínima de armadura;

#### ARMADURA POSITIVA:

Determinação da área da seção de uma barra, Equação 22:

$$A_{\emptyset} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{\emptyset}{10}\right)^2}{4} \quad (22)$$

Onde:

- $A_{\emptyset}$  = área da seção de uma barra ( $\text{cm}^2$ );
- $\pi$  = constante;
- $\emptyset$  = diâmetro da barra (mm);

Determinação do espaçamento teórico entre barras. Equação 23:

$$E = \frac{100 \cdot A_{\emptyset}}{A_{sdim}} \quad (23)$$

Onde:

- $E$  = espaçamento teórico entre barras (cm);
- $A_{sdim}$  = área dimensionada ( $\text{cm}^2/\text{m}$ );

#### 4.1.3 Pré-Dimensionamento Auxiliado por LLM

Nesta etapa, o mesmo objeto de estudo será submetido ao pré-dimensionamento com o auxílio do ChatGPT plus, versão 5.0. O procedimento será conduzido por meio de uma metodologia de Engenharia de Prompt estruturada e replicável.

A metodologia de interação incluirá: A primeira etapa é a Definição do Prompt, que consiste na elaboração de prompts claros e específicos, fornecendo ao LLM as informações de entrada (geometria, cargas, medidas), de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023) e solicitando as dimensões preliminares das lajes. O prompt que servirá de base para o estudo foi desenvolvido mais a frente nos resultados, ou seja, será usado o roteiro detalhado do pré-

dimensionamento tradicional, onde, esse roteiro será inserido na memória do chatGPT o que faz com que ele possa trabalhar e realizar os devidos cálculos. A ideia dessa primeira tentativa é ter o mínimo de interações com a ferramenta, fazendo ela dimensionar tudo sozinha.

#### 4.1.3.1 Primeira Tentativa

A primeira etapa da aplicação do método assistido por Inteligência Artificial consistiu em estruturar integralmente o procedimento de pré-dimensionamento convencional, já calculado previamente pelo método tradicional. Todo o roteiro utilizado no processo manual, incluindo todas as etapas, foi organizado de forma sequencial e inserido no ChatGPT como um conjunto unificado de instruções. Esse roteiro serviu como base para que o modelo pudesse replicar o processo de cálculo exatamente como seria realizado por um engenheiro durante o pré-dimensionamento inicial.

Para garantir a paridade na comparação, o roteiro de cálculo empregado foi idêntico ao utilizado no pré-dimensionamento manual, mantendo-se as mesmas premissas e considerações normativas em estrita observância às prescrições da norma brasileira (ABNT NBR 6118, 2023).

Adicionalmente ao roteiro, foi fornecida ao modelo a documentação técnica completa do projeto, que incluiu:

- A planta baixa, com as dimensões geométricas;
- A planta de corte;
- O esquema de lançamento estrutural.

Após a elaboração desse roteiro, ele foi fornecido ao ChatGPT em uma única interação, sem esclarecimentos adicionais, ajustes intermediários ou correções durante o processo. Dessa forma, a intenção foi avaliar a capacidade da ferramenta de interpretar as informações recebidas, aplicar as relações normativas e executar todos os cálculos de forma totalmente autônoma.

É importante destacar que, nesta primeira tentativa, não houve qualquer intervenção do usuário após o envio do roteiro. O ChatGPT realizou todas as operações matemáticas e tomou todas as decisões de cálculo com base exclusivamente no conteúdo previamente disponibilizado. Não foram feitos ajustes, validações, correções ou complementações durante a execução. Portanto, os resultados apresentados refletem integralmente a interpretação e o processamento automático da ferramenta diante do roteiro fornecido, caracterizando uma etapa de análise puramente exploratória sobre o desempenho da IA quando operando sem o suporte de interações humanas complementares.

#### 4.1.3.2 Segunda Tentativa

A segunda tentativa do pré-dimensionamento assistido por Inteligência Artificial foi conduzida de forma distinta da etapa anterior, adotando uma abordagem interativa e incremental. Nessa fase, o processo foi dividido em etapas correspondentes ao roteiro tradicional de cálculo, permitindo controlar e corrigir possíveis desvios interpretativos do ChatGPT ao longo da execução. Diferentemente da primeira tentativa, na qual o modelo executou todo o procedimento de forma totalmente autônoma, nesta etapa houve intervenções pontuais do usuário, restritas exclusivamente à correção de parâmetros de entrada, ao esclarecimento de dúvidas surgidas durante a aplicação do roteiro e ao alinhamento metodológico previsto pelas normas vigentes.

Antes de iniciar o processo, assim como na primeira tentativa, também foi adicionado parâmetros de entrada, como os modelos de documentação técnica completa do projeto, que incluiu:

- A planta baixa, com as dimensões geométricas;
- A planta de corte;
- O esquema de lançamento estrutural.

O processo teve início com a etapa de determinação da espessura da laje. Após o envio do roteiro correspondente, o ChatGPT manifestou algumas dúvidas iniciais acerca dos parâmetros necessários para iniciar o cálculo, questionando qual versão da norma deveria ser utilizada, como deveria interpretar os vãos presentes na planta baixa, qual bitola deveria ser adotada na armadura tracionada e se todas as paredes do pavimento possuíam espessura de 12 cm. Essas dúvidas foram esclarecidas e orientadas para que o modelo utilize a NBR 6118 (ABNT, 2023), extraia diretamente da planta os vãos necessários, empregar a bitola de 5 mm e a considerar que todas as paredes possuíam espessura uniforme de 12 cm. Uma vez sanadas essas questões, o ChatGPT prosseguiu com os cálculos e apresentou a espessura estimada para cada uma das lajes do pavimento.

Na etapa seguinte, referente ao cálculo dos carregamentos e da alvenaria, foi inserido um roteiro específico contemplando o cálculo do peso próprio, das cargas permanentes e variáveis e da transformação do peso linear das paredes em carga superficial equivalente. Diferentemente do que ocorreu na etapa anterior, o ChatGPT não apresentou dúvidas adicionais, realizando os cálculos de forma direta e apresentando os resultados sem necessidade de intervenções corretivas.

O procedimento avançou para a determinação dos momentos positivos e negativos. Nessa etapa, apesar da estruturação do roteiro, o ChatGPT registrou novas dúvidas relacionadas à obtenção dos coeficientes de momento ( $m_x$  e  $m_y$ ), que não haviam sido explicitamente informados, além de questionar os tipos de engaste presentes em cada laje. Diante dessas lacunas, foi fornecida ao modelo a Tabela de Marcus, permitindo que ele próprio identificasse os parâmetros adequados conforme o índice geométrico  $\lambda$  de cada painel. Também foi solicitado que analisasse cuidadosamente a planta de lançamento estrutural para determinar os tipos de engastes entre as lajes. Para o cálculo dos momentos negativos, dúvidas semelhantes surgiram em relação aos coeficientes  $n_x$  e  $n_y$ , sendo adotado o mesmo procedimento de esclarecimento e fornecimento dos parâmetros normativos e geométricos necessários. Após esses ajustes, o modelo conseguiu prosseguir com a etapa e apresentou os momentos fletores resultantes.

A etapa de cálculo das áreas de armadura positiva e negativa, embora realizada a partir do mesmo princípio das demais, com o envio de um roteiro estruturado, apresentou maior complexidade. O ChatGPT inicialmente gerou um quadro de resultados sem questionar parâmetros intermediários, porém omitiu informações essenciais e suprimiu etapas significativas do procedimento, além de cometer erros de interpretação nos cálculos apresentados. Mesmo após sucessivas tentativas de correção, ajustes de diálogo e reforço das instruções, os resultados continuaram apresentando inconsistências e imprecisões relevantes. Dessa forma, optou-se por registrar nos quadros correspondentes apenas os valores que se mostraram coerentes com a metodologia adotada e mais próximos dos resultados esperados teoricamente.

Por fim, nas etapas de determinação das armaduras positivas e negativas e no detalhamento das peças, o ChatGPT não apresentou dúvidas adicionais. Uma vez fornecidos os roteiros correspondentes, o modelo executou as operações e apresentou os resultados de forma direta, sem necessidade de correções ou esclarecimentos complementares, porém, assim como na etapa anterior, também apresentou diversas dúvidas além de omissões de resultados e dados incorretos. Após várias tentativas de correções e ajustes, os resultados obtidos foram apresentados em quadros.

Assim, a segunda tentativa caracterizou-se como um processo colaborativo entre o usuário e a Inteligência Artificial, no qual as intervenções foram estritamente técnicas e necessárias para garantir a aderência da ferramenta ao método tradicional de pré-dimensionamento. Essa abordagem possibilitou avaliar não apenas a capacidade do modelo em realizar cálculos estruturais, mas também sua sensibilidade às ambiguidades e lacunas de

informação, permitindo observar seu comportamento em um contexto de refinamento iterativo alinhado às normas da engenharia estrutural.

## 5 PROCEDIMENTOS DE PARTIDA

O pré-dimensionamento tradicional constitui uma etapa fundamental do processo de concepção estrutural, na qual são definidos os principais parâmetros de entrada que servirão de base para o desenvolvimento do projeto executivo. Nessa fase, estabelecem-se dimensões iniciais dos elementos estruturais, hipóteses de carregamento e critérios de análise, os quais influenciam diretamente o comportamento global da estrutura e a confiabilidade dos resultados finais.

Em razão de sua relevância, o pré-dimensionamento exige extremo cuidado por parte do projetista, demandando a realização de análises consecutivas e iterativas, de modo a assegurar que as soluções adotadas atendam simultaneamente aos requisitos de segurança, desempenho estrutural, viabilidade construtiva e conformidade com as normas técnicas vigentes. Um pré-dimensionamento bem executado contribui significativamente para a redução de retrabalhos nas etapas subsequentes, além de proporcionar maior eficiência e precisão ao projeto executivo.

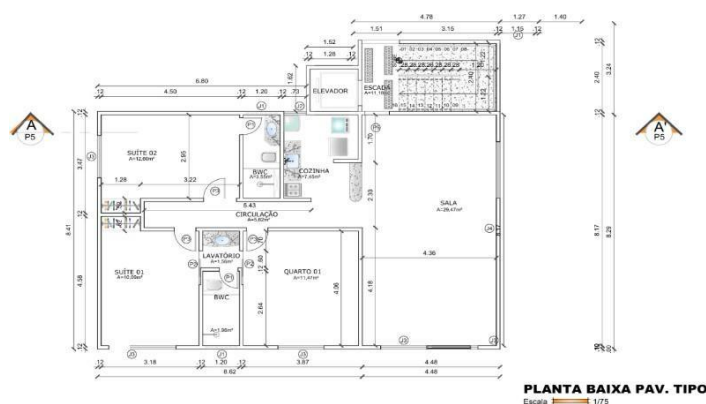
### 5.1 Escolha do Projeto

O objeto de estudo para a presente análise consiste em uma planta baixa de um edifício residencial multifamiliar de três pavimentos, conforme ilustrado na Figura 2 e 3. A estrutura vertical do edifício é composta por três unidades habitacionais idênticas, dispostas em pavimentos sobrepostos, além de uma área de lazer na cobertura.

A planta baixa tipo do edifício, que se repete nos pavimentos intermediários, apresenta uma distribuição funcional e compacta dos espaços. O acesso vertical a cada unidade é garantido por uma escada e um elevador, que conduzem à circulação interna. A unidade habitacional é composta por uma sala e uma cozinha que integram a área social e de serviço, complementadas por um lavatório. A área íntima é configurada com três dormitórios, sendo duas suítes (Suíte 01 e Suíte 02) e um quarto simples. As áreas molhadas incluem os BWC (Banheiros) das suítes e o lavatório de uso comum.

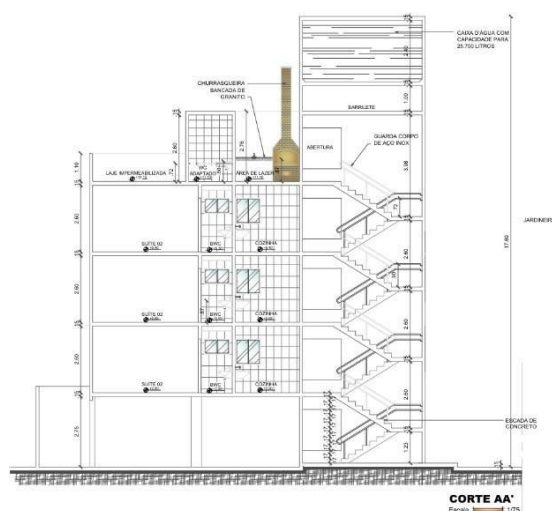
A escolha desta planta se justifica primordialmente pela sua simplicidade e clareza arquitetônica. Por se tratar de um projeto com um número limitado de pavimentos e uma repetição de layout nos andares tipo, é possível obter um melhor controle das variáveis e, conseqüentemente, das respostas e resultados da análise a ser realizada.

Figura 2 – Planta Baixa



Fonte: Autoria Própria

Figura 3 – Corte



Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Pré-Dimensionamento das Lajes

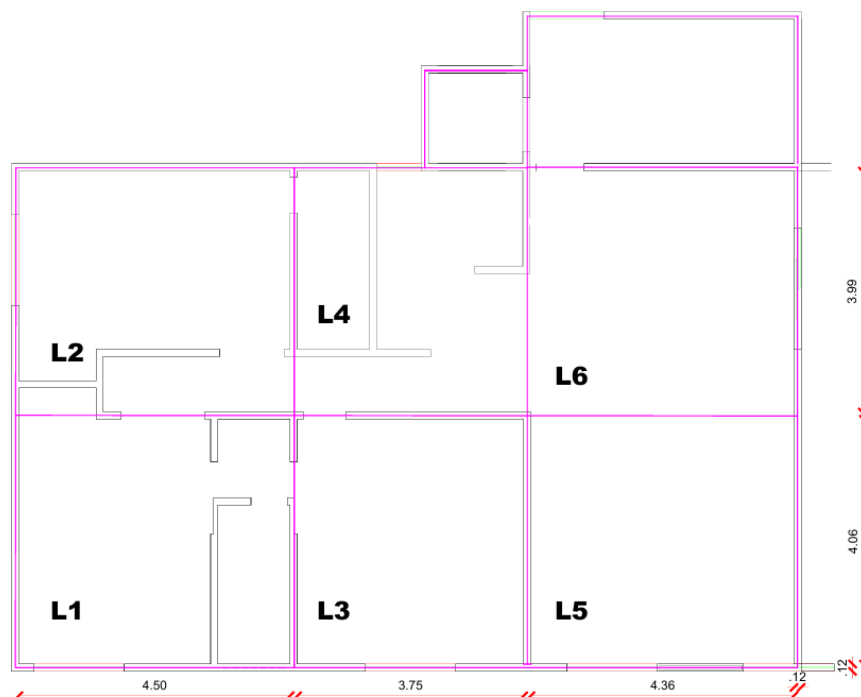
Antes de realizar o pré-dimensionamento, é necessário realizar o lançamento estrutural das lajes.

O lançamento estrutural das lajes é o procedimento técnico que, em sua essência, define a setorização do pavimento, ou seja, a delimitação de cada painel de laje que será dimensionado individualmente.

A delimitação das lajes é feita, portanto, em função dos eixos de apoio. Em uma abordagem convencional, cada compartimento principal (como a sala, a cozinha e os dormitórios) poderia ser considerado um painel de laje, desde que delimitado por vigas. No entanto, é comum que áreas contíguas com o mesmo nível de piso e que compartilham o mesmo apoio (vigas) sejam tratadas como um único painel de laje para fins de cálculo, desde que a

geometria e as condições de contorno permitam. Portanto, o lançamento estrutural ficou subdividido conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Lançamento Estrutural



#### LANÇAMENTO A SER UTILIZADO

Fonte: Autoria própria

Com o lançamento feito, totalizando 6 lajes, o próximo passo é realizar os cálculos de pré-dimensionamento.

##### 5.2.1 Determinação da Espessura da Laje

A determinação da espessura da laje maciça foi realizada por meio de um procedimento de pré-dimensionamento baseado na geometria dos painéis e nas condições de vinculação entre lajes adjacentes. Inicialmente, as lajes do pavimento foram identificadas e numeradas (por exemplo, L1, L2, ..., Ln), mostrado na Figura 4, e para cada painel foram obtidos os vãos nas duas direções ortogonais (horizontal e vertical) a partir da planta baixa. Como critério geométrico, os vãos foram corrigidos considerando que a laje se apoia na metade da espessura das paredes em cada extremidade. Assim, para uma parede de espessura  $t$ , adotou-se o vão corrigido, Equação 1.

Em seguida, para cada laje determinou-se o maior e o menor vão corrigido, dados por  $l_{maior}$  e  $l_{menor}$  respectivamente. Com esses valores, calculou-se o índice geométrico, Equação 2.

A definição do comportamento estrutural (laje armada em uma ou em duas direções) foi feita com base no valor de  $\lambda$ : quando  $\lambda > 2$ , a laje foi classificada como unidirecional (armadura principal em uma direção); quando  $\lambda \leq 2$ , a laje foi classificada como bidirecional (armadura em duas direções). Em paralelo, foi calculado o parâmetro  $0,7 \cdot l_{maior}$  e definido o comprimento efetivo  $l^*$  como o menor entre o vão menor e 70% do vão maior, estimado na Equação 3.

Para considerar o grau de restrição do painel, determinou-se o número de engastes  $n$ , definido como a quantidade de encontros diretos do painel analisado com lajes vizinhas (isto é, cada ligação entre lajes adjacentes foi contabilizada como um engaste). Com o valor de  $l^*$  e do número de engastes  $n$ , a altura útil  $d$  foi estimada pela Equação 4.

A espessura total da laje  $h$  foi então calculada por meio da soma da altura útil com a metade do diâmetro da barra adotada e o cobrimento nominal do concreto, Equação 5.

Em que  $\emptyset$  representa o diâmetro da armadura (em centímetros) e  $c$  o cobrimento nominal (em centímetros). Por fim, a espessura efetivamente adotada em projeto para cada laje foi definida por arredondamento para cima do valor obtido na Equação 6.

Como critério de padronização construtiva e execução, a espessura do pavimento foi tomada como o maior valor de  $h_{utilizado}$  dentre todas as lajes analisadas, Equação 7.

Dessa forma, após a aplicação do procedimento descrito, de acordo com os dados calculados e organizados na Tabela 1. conclui-se que a espessura adotada para a laje do pavimento é  $h=11\text{cm}$ .

Tabela 1 – Determinação da espessura da laje.

| Lajes                                                              | $l$<br>maior | $l$<br>menor | $0,7 \cdot l$<br>(maior) | $\lambda = l$<br>(maior) / $l$<br>(menor) | Armadura<br>01 ou 02<br>direções | Menor<br>entre<br>os vãos | nº<br>engaste | $d$<br>cm | $h$ (cm) | $h$<br>(utilizado) |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------|-----------|----------|--------------------|
| L1                                                                 | 462,0        | 418,0        | 323,40                   | 1,11                                      | Bidirecional                     | 323,40                    | 2             | 7,44      | 10,34    | 11,00              |
| L2                                                                 | 462,0        | 411,0        | 323,40                   | 1,12                                      | Bidirecional                     | 323,40                    | 2             | 7,44      | 10,34    | 11,00              |
| L3                                                                 | 418,0        | 387,0        | 292,60                   | 1,08                                      | Bidirecional                     | 292,60                    | 3             | 6,44      | 9,34     | 10,00              |
| L4                                                                 | 411,0        | 387,0        | 287,70                   | 1,06                                      | Bidirecional                     | 287,70                    | 3             | 6,33      | 9,23     | 10,00              |
| L5                                                                 | 448,0        | 418,0        | 313,60                   | 1,07                                      | Bidirecional                     | 313,60                    | 2             | 7,21      | 10,11    | 11,00              |
| L6                                                                 | 448,0        | 411,0        | 313,60                   | 1,09                                      | Bidirecional                     | 313,60                    | 2             | 7,21      | 10,11    | 11,00              |
| <b>Valor de <math>h</math> (espessura da laje) a ser utilizado</b> |              |              |                          | <b>=</b>                                  | <b>11 cm</b>                     |                           |               |           |          |                    |

Fonte: Autoria própria.

### 5.2.2 Determinação dos Carregamentos e Alvenaria

No pré-dimensionamento das lajes, essa segunda etapa consiste em definir os carregamentos atuantes por unidade de área ( $\text{kgf/m}^2$ ), pois é esse valor que será utilizado nas verificações iniciais de espessura ( $h$ ), flechas e esforços solicitantes. Conforme a Tabela 2 e 3 apresentadas, os carregamentos são organizados em ações permanente (peso próprio, revestimentos e alvenaria) e ação variável (carga acidental), sendo ao final somados para obter o carregamento total de cada laje.

Inicialmente, define-se a espessura preliminar da laje ( $h$ ), calculada anteriormente, e calcula-se o peso próprio, adotando-se o peso específico do concreto de aproximadamente  $\gamma_{\text{concreto}} = 2500 \text{ kgf/m}^3$ . Assim, o peso próprio por área é obtido pela Equação 8.

O que resulta, por exemplo, em  $275 \text{ kgf/m}^2$  para  $h = 11$  e  $250 \text{ kgf/m}^2$  para  $h = 10$ . Em seguida, são adicionadas as cargas permanentes de acabamento, lançadas diretamente como distribuição superficial, como pavimentação ( $100 \text{ kgf/m}^2$ ) e revestimento de teto ( $50 \text{ kgf/m}^2$ ).

A contribuição da alvenaria é tratada à parte, pois a parede é um elemento linear que precisa ser convertida em uma carga equivalente distribuída na laje. Para isso, calcula-se primeiramente o peso total da parede (em  $\text{kgf}$ ) a partir do seu comprimento, do pé-direito e dos parâmetros do material (peso específico,  $\gamma = 1300 \text{ kgf/m}^3$ ), além da espessura adotada. Equação 9.

onde  $L$  é o comprimento da parede (m),  $h_{pd}$  o pé-direito (m), e a espessura (m) e o peso específico  $\gamma_{alv}$  (adotado  $1300 \text{ kgf/m}^3$ ). Com o peso da parede determinado, ele é transformado em carga superficial equivalente dividindo-se pela área da laje. Equação 10.

Esse procedimento permite comparar lajes com áreas diferentes, mantendo o carregamento na unidade coerente com os demais itens ( $\text{kgf/m}^2$ ). Na tabela, por exemplo, a L1 apresenta  $P_{alv} = 2133,46 \text{ kgf}$  e  $A = 18,27 \text{ m}^2$ , resultando em  $q_{alv} = 116,77 \text{ kgf/m}^2$ .

Para evitar subestimação em lajes onde não há paredes apoiadas diretamente (ou onde o valor calculado seja muito baixo), adota-se uma carga mínima de alvenaria, definida como  $100 \text{ kgf/m}^2$ . Assim, a carga considerada de alvenaria é dada pela Equação 11.

Logo, mesmo quando o comprimento de alvenaria é zero (caso de algumas lajes), a tabela mantém  $q_{alv,cons} = 100$ , garantindo uma abordagem conservadora para o pré-dimensionamento.

Por fim, soma-se a ação variável correspondente à carga acidental (adotada como  $150 \text{ kgf/m}^2$  na tabela) e obtém-se o carregamento total atuante na laje. Equação 12.

Como resultado, cada laje possui um valor final de carregamento ( $\text{kgf/m}^2$ ) que consolida todas as ações relevantes para a etapa preliminar de dimensionamento apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Carregamento

| Laje | Espessura<br>h (cm) | Peso<br>Próprio( $\text{kgf/m}^2$ ) | Pavimentação<br>( $\text{kgf/m}^2$ ) | Revestimento<br>Teto( $\text{kgf/m}^2$ ) | Alvenaria<br>( $\text{kgf/m}^2$ ) | Acidental<br>( $\text{kgf/m}^2$ ) | Total<br>( $\text{kgf/m}^2$ ) |
|------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| L1   | 11,00               | 275,00                              | 100,00                               | 50,00                                    | 116,77                            | 150,00                            | 691,77                        |
| L2   | 11,00               | 275,00                              | 100,00                               | 50,00                                    | 122,44                            | 150,00                            | 697,44                        |
| L3   | 10,00               | 250,00                              | 100,00                               | 50,00                                    | 100,00                            | 150,00                            | 650,00                        |
| L4   | 10,00               | 250,00                              | 100,00                               | 50,00                                    | 161,56                            | 150,00                            | 711,56                        |
| L5   | 11,00               | 275,00                              | 100,00                               | 50,00                                    | 100,00                            | 150,00                            | 675,00                        |
| L6   | 11,00               | 275,00                              | 100,00                               | 50,00                                    | 100,00                            | 150,00                            | 675,00                        |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 3 - Alvenaria

| Laje | Comprimento<br>(m) | Pé<br>direito | Y<br>( $\text{kgf/m}^3$ ) | Peso<br>Alvenaria<br>(Kgf) | Área da<br>Laje ( $\text{m}^2$ ) | Carga na<br>Laje<br>( $\text{kgf/m}^2$ ) | Carga<br>mínima<br>( $\text{kgf/m}^2$ ) | Carga na<br>Laje<br>Considerada<br>( $\text{kgf/m}^2$ ) |
|------|--------------------|---------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| L1   | 5,26               | 2,60          | 1300,00                   | 2133,46                    | 18,27                            | 116,77                                   | 100,00                                  | 116,77                                                  |
| L2   | 5,42               | 2,60          | 1300,00                   | 2198,35                    | 17,96                            | 122,44                                   | 100,00                                  | 122,44                                                  |
| L3   | 0,00               | 2,60          | 1300,00                   | 0,00                       | 15,23                            | 0,00                                     | 100,00                                  | 100,00                                                  |
| L4   | 5,96               | 2,60          | 1300,00                   | 2417,38                    | 14,96                            | 161,56                                   | 100,00                                  | 161,56                                                  |
| L5   | 0,00               | 2,60          | 1300,00                   | 0,00                       | 17,70                            | 0,00                                     | 100,00                                  | 100,00                                                  |
| L6   | 0,00               | 2,60          | 1300,00                   | 0,00                       | 17,40                            | 0,00                                     | 100,00                                  | 100,00                                                  |

Fonte: Autoria Própria.

### 5.2.3 Determinação dos Momentos Positivos e Negativos

A terceira etapa do método de pré-dimensionamento estrutural consiste na determinação dos momentos fletores positivos e negativos atuantes nos elementos analisados. Inicialmente, procede-se à definição dos vãos efetivos, considerando-se as dimensões geométricas reais, os comprimentos livres entre apoios e as condições de apoio existentes, conforme recomendações normativas.

Na sequência, é realizada a composição do carregamento total atuante, contemplando as ações permanentes e variáveis incidentes sobre a estrutura. Destaca-se, nesse contexto, a contribuição das alvenarias, cujo peso próprio exerce influência relevante nos esforços solicitantes e deve ser devidamente considerada na análise.

Com base nos vãos efetivos e nos carregamentos definidos, aplicam-se coeficientes tabelados provenientes de normas técnicas e literatura especializada, os quais permitem a estimativa dos momentos fletores máximos positivos e negativos. A escolha desses coeficientes é realizada em função da razão geométrica  $\lambda$ , que expressa a relação entre os comprimentos dos vãos, bem como das condições de continuidade e vinculação estrutural. Esse procedimento possibilita a obtenção de resultados coerentes com o nível de precisão esperado para a etapa de pré-dimensionamento.

#### 5.2.3.1 Momento Positivo

Inicialmente, as lajes do pavimento foram setorizadas e identificadas (L1, L2, ..., L6). Para cada laje, consideraram-se duas direções ortogonais de cálculo:

- Direção x: associada ao menor vão, indicado como  $l_x$ ;
- Direção y: associada ao maior vão, indicado como  $l_y$ .

Essa separação é necessária porque lajes em concreto armado podem apresentar comportamento bidirecional, distribuindo esforços em ambas as direções, dependendo da geometria e das condições de contorno.

Os vãos foram definidos a partir da planta arquitetônica/estrutural, considerando o conceito de vão efetivo, isto é, a distância útil de trabalho entre apoios. Em situações usuais de apoio sobre paredes ou vigas, admite-se o ajuste do vão geométrico para contemplar a participação do apoio, adotando critérios como a consideração de parte da largura do elemento de apoio (por exemplo, metade da largura da parede). Ao final, para cada laje obtiveram-se:

- $l_x$  (m): menor vão efetivo (dimensão da laje + (metade da largura da parede x 2));
- $l_y$  (m): maior vão efetivo (dimensão da laje + (metade da largura da parede x 2)).

Com os vãos definidos, calculou-se a razão pela Equação 13.

Esse parâmetro é utilizado para caracterizar o comportamento da laje e, principalmente, para selecionar coeficientes de cálculo (momentos positivos e negativos) em tabelas. Na tabela, observa-se  $\lambda$  próximo de 1, o que é típico de lajes com geometria próxima do quadrado e, portanto, com tendência a trabalhar em duas direções.

Para a determinação dos coeficientes  $m_x$  e  $m_y$  foi utilizado a Tabela de Marcus, Anexo 1, onde através do tipo de laje e do valor de  $\lambda$ , são obtidos os parâmetros a serem utilizados.

Por fim, para calcular o momento positivo nas duas direções, será utilizado o carregamento ( $p$ ), os vãos efetivos  $l_x$  e  $l_y$  e os coeficientes  $m_x$  e  $m_y$ , representados na Tabela 4, utilizando as Equações 14 e 15 para as obtenções dos momentos em x e y:

Tabela 4 – Momentos Positivos.

| Laje | Direção | Carregamento Total<br>(kgf.m <sup>2</sup> ) | $l_x$ (m) | $l_y$ (m) | $\lambda=l_y/l_x$ | Coeficientes | Momento (kgf.m) |
|------|---------|---------------------------------------------|-----------|-----------|-------------------|--------------|-----------------|
| L1   | x       | 691,77                                      | 4,18      | 4,62      | 1,11              | $m_x$ 30     | 402,898         |
|      | y       | 691,77                                      | 4,18      |           |                   | $m_y$ 38     | 318,078         |
| L2   | x       | 697,44                                      | 4,11      | 4,62      | 1,12              | $m_x$ 30     | 392,706         |
|      | y       | 697,44                                      | 4,11      |           |                   | $m_y$ 38     | 310,031         |
| L3   | x       | 650,00                                      | 3,87      | 4,18      | 1,08              | $m_x$ 40     | 243,375         |
|      | y       | 650,00                                      | 3,87      |           |                   | $m_y$ 53     | 183,679         |
| L4   | x       | 711,56                                      | 3,87      | 4,11      | 1,06              | $m_x$ 41     | 259,927         |
|      | y       | 711,56                                      | 3,87      |           |                   | $m_y$ 52     | 204,942         |
| L5   | x       | 675,00                                      | 4,18      | 4,48      | 1,07              | $m_x$ 32     | 368,558         |
|      | y       | 675,00                                      | 4,18      |           |                   | $m_y$ 37     | 318,753         |
| L6   | x       | 675,00                                      | 4,11      | 4,48      | 1,09              | $m_x$ 31     | 367,812         |
|      | y       | 675,00                                      | 4,11      |           |                   | $m_y$ 38     | 300,057         |

Fonte: Autoria própria.

### 5.2.3.2 Momento Negativo

Em lajes contínuas, ocorrem momentos negativos sobre os apoios e nas linhas de continuidade entre painéis adjacentes. Para essa verificação, a tabela considera pares de lajes (ex.: L1/L2, L1/L3 etc.), aplicando coeficientes indicados como  $n_x$  ou  $n_y$ , conforme a direção do apoio.

O cálculo segue a mesma lógica dos momentos positivos, Equações 16 e 17, alterando-se apenas os coeficientes ( $n_x$  ou  $n_y$ ):

Como duas lajes compartilham a mesma linha de apoio, os momentos negativos obtidos de cada lado precisam ser compatibilizados, garantindo coerência estrutural e evitando descontinuidades no dimensionamento. Na tabela, a compatibilização foi feita comparando: (I) a média entre os dois momentos calculados e (II) 80% do maior valor entre eles. A tabela adota como “Momento Compatibilizado” o maior entre essas duas referências, Tabela 5.

Tabela 5 – Momentos Negativos.

| Laje  | Direção | Carregame-<br>nto Total<br>(kgf.m <sup>2</sup> ) | lx<br>(m) | ly<br>(m) | $\lambda=ly/lx$ | Coefici-<br>entes | Momento<br>(kgf.m) | Média  | 80%<br>maior | Momento<br>Compatibili-<br>zado |
|-------|---------|--------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|--------------------|--------|--------------|---------------------------------|
| L1/L2 | L1      | 691,77                                           | 4,18      | 4,62      | 1,11            | nx                | 1<br>3 929,77      | 918,00 | 743,81       | 918,00                          |
|       | L2      | 697,44                                           | 4,11      | 4,62      | 1,12            | nx                | 1<br>3 906,24      |        |              |                                 |
| L1/L3 | L1      | 691,77                                           | 4,18      | 4,62      | 1,11            | ny                | 1<br>6 755,43      | 681,94 | 604,35       | 681,94                          |
|       | L3      | 650,00                                           | 3,87      | 4,18      | 1,08            | nx                | 1<br>6 608,44      |        |              |                                 |
| L2/L4 | L2      | 697,44                                           | 4,11      | 4,62      | 1,12            | ny                | 1<br>7 736,32      | 681,60 | 589,06       | 681,60                          |
|       | L4      | 711,56                                           | 3,87      | 4,11      | 1,06            | nx                | 1<br>7 626,88      |        |              |                                 |
| L3/L4 | L3      | 650,00                                           | 3,87      | 4,18      | 1,08            | ny                | 2<br>6 374,42      | 400,35 | 341,02       | 400,35                          |
|       | L4      | 711,56                                           | 3,87      | 4,11      | 1,06            | ny                | 2<br>5 426,28      |        |              |                                 |
| L3/L5 | L3      | 650,00                                           | 3,87      | 4,18      | 1,08            | nx                | 1<br>6 608,44      | 672,78 | 589,69       | 672,78                          |
|       | L5      | 675,00                                           | 4,18      | 4,48      | 1,07            | ny                | 1<br>6 737,12      |        |              |                                 |
| L4/L6 | L4      | 711,56                                           | 3,87      | 4,11      | 1,06            | nx                | 1<br>7 626,88      | 720,66 | 651,55       | 720,66                          |
|       | L6      | 675,00                                           | 4,11      | 4,48      | 1,09            | nx                | 1<br>4 814,44      |        |              |                                 |
| L5/L6 | L5      | 675,00                                           | 4,18      | 4,48      | 1,07            | nx                | 1<br>4 842,42      | 777,53 | 673,94       | 777,53                          |
|       | L6      | 675,00                                           | 4,11      | 4,48      | 1,09            | ny                | 1<br>6 712,64      |        |              |                                 |

Fonte: Autoria própria.

#### 5.2.4 Dimensionamento das Áreas das Armaduras

Para a determinação das armaduras positivas e negativas, inicialmente foram definidos os parâmetros de materiais, geométricos e normativos utilizados no dimensionamento:

- Concreto:  $f_{ck} = 30 \text{ MPa} = 300 \text{ kgf/cm}^2$ ;
- Aço CA-50:  $f_{yk} = 500 \text{ MPa} = 5000 \text{ kgf/cm}^2$ ;
- Cobrimento nominal das armaduras:  $c = 2,5 \text{ cm}$ ;
- Diâmetro das barras tracionadas:  $\phi = 8 \text{ mm}$ ;
- Largura de cálculo da laje:  $b = 1,00 \text{ m} = 100 \text{ cm}$ ;
- $\rho (\text{min})$  = a taxa de armadura mínima de acordo com a norma, é estabelecida a partir do  $F_{ck}$ , onde, para um  $F_{ck} = 30 \text{ Mpa}$ , adota-se um  $\rho (\text{min}, \text{armadura positiva}) = 0,016$  e um  $\rho (\text{min}, \text{armadura negativa}) = 0,173$ ;
- Maior momento positivo da tabela de momentos:  $M^+ = 402,90 \text{ kgf/m}$ ;

- Maior momento negativo da tabela de momentos:  $= M^- = 918 \text{ kgf.m}$ ;
- Momento total é o maior momento entre os positivo e negativo  $= 918 \text{ Kgf.m} = 91800,46 \text{ Kgf.cm}$ ;
- $F_{cd} = \frac{E_{ck}}{1,4} = 214,29 \text{ Kgf/cm}^2$ ;
- $F_{yd} = \frac{E_{yk}}{1,15} = 4348 \text{ Kgf/cm}^2$ ;
- $d (\text{min}) = \sqrt{\frac{M^+}{(F_{cd} \cdot 100 \cdot 0,2509)}} = 0,41 \text{ cm}$ ;
- $h (\text{min}) = (c + \frac{1}{2} + d_{\text{min}}) = 3,41 \text{ cm}$ ;
- $h (\text{utilizado}) = \text{determinado na tabela de espessura da laje} = 11 \text{ cm}$ ;
- $d (\text{utilizado}) = (h (\text{utilizado}) - \frac{1}{2} - c) = 8 \text{ cm}$ ;

Após definir os parâmetros de entrada, calcula-se então as áreas das armaduras positivas e negativas.

#### 5.2.4.1 Área da Armadura Positiva

Para cada laje, foram considerados os momentos fletores positivos nas direções x e y, fornecidos pela análise estrutural, na unidade  $\text{kgf.m}$  (coluna “Momentos (kgf.m)” da tabela 6). Esses momentos representam a solicitação típica de vão, associada à armadura inferior, onde posteriormente, os valores foram convertidos para  $\text{kgf.cm}$ , registrado na coluna “Momentos (kgf.cm)”.

Em seguida, os momentos de cálculos ( $M_d$ ) foram estabelecidos dotando-se o coeficiente  $\gamma = 1,4$ . Com o momento de cálculo ( $M_d$ ), calcula-se o momento reduzido ( $\mu_o$ ) segundo a Equação 18

O valor de  $\mu_o$  é então associado ao parâmetro  $\omega_o$ , obtido pelas relações de equilíbrio da seção em flexão (bloco comprimido equivalente). Na prática, a tabela encontra  $\omega_o$  a partir de  $\mu_o$  (por fórmula direta/solução de Equação), e esse resultado é apresentado na coluna “ $\omega_o$ ”. Observa-se na tabela que, para os níveis de solicitação obtidos,  $\omega_o$  fica próximo de  $\mu_o$ , o que é esperado quando os momentos reduzidos são pequenos. Equação 19.

Com  $\omega_o$  definido, calcula-se a área de aço tracionado por metro de laje. Equação 20. Calcula-se também o  $A_{s\text{min}}$ , dado pela Equação 21.

Logo, o  $A_s$  dimensionado, vai ser o máximo entre o  $A_s$  e o  $A_{s\text{min}}$ . Os resultados são registrados na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Área das armaduras positivas.

| Lajes | Direção | Momentos<br>kgf.m | Momentos<br>kgf.cm | Momento<br>de Cálculo<br>kgf.cm | $\mu$  | $\omega$ | As<br>m <sup>2</sup> /m | As<br>(min)<br>cm <sup>2</sup> /m | As<br>(Dimens.)<br>cm <sup>2</sup> /m |
|-------|---------|-------------------|--------------------|---------------------------------|--------|----------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| L1    | x       | 402,90            | 40289,82           | 56405,75                        | 0,0411 | 0,042    | 1,663                   | 1,276                             | 1,66                                  |
|       | y       | 318,08            | 31807,76           | 44530,86                        | 0,0325 | 0,033    | 1,306                   | 1,276                             | 1,31                                  |
| L2    | x       | 392,71            | 39270,57           | 54978,80                        | 0,0401 | 0,041    | 1,620                   | 1,276                             | 1,62                                  |
|       | y       | 310,03            | 31003,08           | 43404,32                        | 0,0316 | 0,032    | 1,272                   | 1,276                             | 1,28                                  |
| L3    | x       | 243,37            | 24337,46           | 34072,45                        | 0,0248 | 0,025    | 0,994                   | 1,276                             | 1,28                                  |
|       | y       | 183,68            | 18367,90           | 25715,05                        | 0,0188 | 0,019    | 0,748                   | 1,276                             | 1,28                                  |
| L4    | x       | 259,93            | 25992,68           | 36389,75                        | 0,0265 | 0,027    | 1,063                   | 1,276                             | 1,28                                  |
|       | y       | 204,94            | 20494,23           | 28691,92                        | 0,0209 | 0,021    | 0,835                   | 1,276                             | 1,28                                  |
| L5    | x       | 368,56            | 36855,84           | 51598,18                        | 0,0376 | 0,038    | 1,518                   | 1,276                             | 1,52                                  |
|       | y       | 318,75            | 31875,32           | 44625,45                        | 0,0325 | 0,033    | 1,308                   | 1,276                             | 1,31                                  |
| L6    | x       | 367,81            | 36781,19           | 51493,66                        | 0,0375 | 0,038    | 1,515                   | 1,276                             | 1,51                                  |
|       | y       | 300,06            | 30005,70           | 42007,99                        | 0,0306 | 0,031    | 1,230                   | 1,276                             | 1,28                                  |

Fonte: Autoria Própria.

#### 5.2.4.2 Área da Armadura Negativa

Para a determinação das áreas das armaduras negativas, utiliza-se o mesmo procedimento realizado para armadura positiva. Os momentos a serem utilizados, é o momento compatibilizado, calculado na tabela dos cálculos dos momentos. Em seguida, os resultados obtidos são organizados na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Área das Armaduras Negativas

| Lajes | Momentos<br>(kgf.m) | Momentos<br>(kgf.cm) | Momento de<br>cálculo<br>(kgf.cm) | $\mu$ | $\omega$ | As<br>cm <sup>2</sup> /m | As (min)<br>cm <sup>2</sup> /m | As<br>Dimensionamento<br>cm <sup>2</sup> /m |
|-------|---------------------|----------------------|-----------------------------------|-------|----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|
| L1/L2 | 918,00              | 91800,46             | 128520,64                         | 0,094 | 0,100    | 3,925                    | 1,903                          | 3,925                                       |
| L1/L3 | 681,94              | 68193,54             | 95470,95                          | 0,070 | 0,073    | 2,867                    | 1,903                          | 2,867                                       |
| L2/L4 | 681,60              | 68160,27             | 95424,38                          | 0,070 | 0,073    | 2,866                    | 1,903                          | 2,866                                       |
| L3/L4 | 400,35              | 40035,12             | 56049,17                          | 0,041 | 0,042    | 1,652                    | 1,903                          | 1,903                                       |
| L3/L5 | 672,78              | 67277,67             | 94188,74                          | 0,069 | 0,072    | 2,827                    | 1,903                          | 2,827                                       |
| L4/L6 | 720,66              | 72066,14             | 100892,59                         | 0,074 | 0,077    | 3,038                    | 1,903                          | 3,038                                       |
| L5/L6 | 777,53              | 77752,74             | 108853,83                         | 0,079 | 0,083    | 3,291                    | 1,903                          | 3,291                                       |

Fonte: Autoria Própria.

#### 5.2.5 Dimensionamento das Armaduras Positivas e Negativas

O dimensionamento das armaduras, será onde é definido o comprimento, espaçamento e quantidade de estribos a serem utilizados das armaduras.

### 5.2.5.1 Armadura Positiva

Para cada laje, nas direções x e y, adotou-se a área de aço dimensionada apresentada na  $A_sdim$ , Tabela 6 (armaduras positivas). Em seguida, definiu-se a bitola das barras e o espaçamento a ser utilizado no detalhamento.

A área da seção de uma barra ( $A_{\emptyset}$ ) foi obtida pela área do círculo, dada pela Equação 22. Em que  $\emptyset$  é o diâmetro da barra em milímetros, e  $A_{\emptyset}$  resulta em  $cm^2$ .

O espaçamento teórico entre barras (E) foi calculado pela Equação 23.

Onde E é obtido em centímetros. Para fins de detalhamento, o espaçamento calculado foi arredondado para baixo, garantindo uma área de aço fornecida igual ou superior à área dimensionada.

Conforme os critérios de detalhamento estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023, adotou-se como limite superior o espaçamento máximo de 20 cm. Assim, o espaçamento final utilizado no projeto foi definido como  $E \leq 20 \text{ cm}$ , caso o valor calculado ultrapassasse esse limite, adotou-se  $E = 20 \text{ cm}$ .

Por fim, para determinar a quantidade de barras em cada direção, considerou-se o vão de distribuição correspondente a laje. A quantidade foi obtida pela razão entre o vão de distribuição e o espaçamento adotado, com arredondamento para cima, assegurando a cobertura completa da região detalhada. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Armadura Positiva.

| Lajes | As | dim. | Ø<br>(mm) | Área<br>Ø<br>(cm²) | Espaça-<br>mento<br>(cm) | Espaça-<br>mento<br>utilizado<br>(cm) | Espaça-<br>mento<br>Máximo<br>(cm) | Espaça-<br>mento de<br>Detalham-<br>ento (cm) | Vão<br>de<br>distribuição<br>(cm) | Quantidade | Quantidade<br>utilizada |
|-------|----|------|-----------|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------------------|
| L1    | x  | 1,66 | 5         | 0,20               | 11,80                    | 11                                    | 20                                 | 11                                            | 406                               | 36,91      | 37                      |
|       | y  | 1,31 | 5         | 0,20               | 15,03                    | 15                                    | 20                                 | 15                                            | 450                               | 30,00      | 30                      |
| L2    | x  | 1,62 | 5         | 0,20               | 12,12                    | 12                                    | 20                                 | 12                                            | 399                               | 33,25      | 34                      |
|       | y  | 1,28 | 5         | 0,20               | 15,38                    | 15                                    | 20                                 | 15                                            | 450                               | 30,00      | 30                      |
| L3    | x  | 1,28 | 5         | 0,20               | 15,38                    | 15                                    | 20                                 | 15                                            | 375                               | 25,00      | 25                      |
|       | y  | 1,28 | 5         | 0,20               | 15,38                    | 15                                    | 20                                 | 15                                            | 406                               | 27,07      | 28                      |
| L4    | x  | 1,28 | 5         | 0,20               | 15,38                    | 15                                    | 20                                 | 15                                            | 375                               | 25,00      | 25                      |
|       | y  | 1,28 | 5         | 0,20               | 15,38                    | 15                                    | 20                                 | 15                                            | 399                               | 26,60      | 27                      |
| L5    | x  | 1,52 | 5         | 0,20               | 12,93                    | 12                                    | 20                                 | 12                                            | 406                               | 33,83      | 34                      |
|       | y  | 1,31 | 5         | 0,20               | 15,00                    | 14                                    | 20                                 | 14                                            | 436                               | 31,14      | 32                      |
| L6    | x  | 1,51 | 5         | 0,20               | 12,96                    | 12                                    | 20                                 | 12                                            | 399                               | 33,25      | 34                      |
|       | y  | 1,28 | 5         | 0,20               | 15,38                    | 15                                    | 20                                 | 15                                            | 436                               | 29,07      | 30                      |

Fonte: Autoria Própria.

### 5.2.5.2 Armadura Negativa

Na armadura negativa, adotou-se o mesmo procedimento de detalhamento aplicado à armadura positiva. Assim, a partir da área de aço dimensionada ( $A_{sdim}$ ) para os momentos negativos, definiu-se a bitola, calculou-se o espaçamento teórico, realizou-se o ajuste do espaçamento para detalhamento (respeitando o limite normativo) e, por fim, determinou-se a quantidade de barras com base no vão de distribuição, aplicando os arredondamentos necessários. Os resultados finais de espaçamento e quantidade adotada encontram-se apresentados no Tabela 9.

Tabela 9 – Armadura Negativa.

| Lajes | As<br>(dim.) | Ø<br>(mm) | Área<br>Ø<br>(cm²) | Espaçamento<br>(cm) | Espaçamento<br>utilizado<br>(cm) | Espaçamento<br>Máximo<br>(cm) | Espaçamento<br>de<br>detalhamento<br>(cm) | Vão de<br>distribuição<br>(cm) | Quantidade | Quantidade<br>utilizada |
|-------|--------------|-----------|--------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|------------|-------------------------|
| L1/L2 | 3,92         | 6,3       | 0,312              | 7,94                | 7                                | 20                            | 7                                         | 450                            | 64,29      | 65,00                   |
| L1/L3 | 2,87         | 6,3       | 0,312              | 10,87               | 10                               | 20                            | 10                                        | 406                            | 40,6       | 41,00                   |
| L2/L4 | 2,87         | 6,3       | 0,312              | 10,87               | 10                               | 20                            | 10                                        | 399                            | 39,90      | 40,00                   |
| L3/L4 | 1,90         | 6,3       | 0,312              | 16,37               | 16                               | 20                            | 16                                        | 375                            | 23,4375    | 24,00                   |
| L3/L5 | 2,83         | 6,3       | 0,312              | 11,02               | 11                               | 20                            | 11                                        | 406                            | 36,91      | 37,00                   |
| L4/L6 | 3,04         | 6,3       | 0,312              | 10,25               | 10                               | 20                            | 10                                        | 399                            | 39,90      | 40,00                   |
| L5/L6 | 3,29         | 6,3       | 0,312              | 9,47                | 9                                | 20                            | 9                                         | 436                            | 48,44      | 49,00                   |

Fonte: Autoria Própria.

### 5.2.6 Detalhamento

A última etapa do processo consiste no detalhamento das armaduras em softwares de desenho, como AutoCAD ou Revit. Nessa fase são lançadas graficamente as barras e indicados todos os parâmetros calculados ao longo do dimensionamento, tais como vãos de distribuição, diâmetros, espaçamentos, comprimentos retos e comprimentos totais das barras, Tabela10.

Tabela 10 – Comprimentos Utilizados

| Lajes | Vão médio entre as<br>lajes envolvidas(m) | Vão médio entre as<br>lajes envolvidas (cm) | Comp. Reto = Vão<br>médio/2(cm) | Comp. Total(cm) |
|-------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| L1/L2 | 4,06                                      | 406                                         | 203,5                           | 215,50          |
| L1/L3 | 4,06                                      | 406                                         | 203,5                           | 215,50          |
| L2/L4 | 3,99                                      | 399                                         | 200                             | 212,00          |
| L3/L4 | 3,99                                      | 399                                         | 200                             | 212,00          |
| L3/L5 | 4,06                                      | 406                                         | 203,5                           | 215,50          |
| L4/L6 | 3,99                                      | 399                                         | 200                             | 212,00          |
| L5/L6 | 4,06                                      | 406                                         | 203,5                           | 215,50          |

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 10 foi elaborada com o objetivo de organizar os comprimentos a serem utilizados no detalhamento das armaduras no software (AutoCAD/Revit), garantindo que as barras lançadas em desenho representem fielmente os parâmetros definidos em cálculo.

Inicialmente, para cada conjunto de lajes envolvidas (por exemplo, L1/L2, L2/L4 etc.), definiu-se o vão médio considerado para a faixa de armadura, ele é representado como segundo maior comprimento entre os vãos. Esse valor é apresentado em metros e, em seguida, convertido para centímetros apenas para padronizar as unidades e facilitar a aplicação direta no detalhamento.

Na sequência, determinou-se o comprimento reto da barra, adotado como metade do vão médio entre as lajes envolvidas, conforme indicado na tabela. Esse comprimento representa a porção principal (reta) da barra que será considerada no desenho, normalmente associada à faixa efetiva de distribuição.

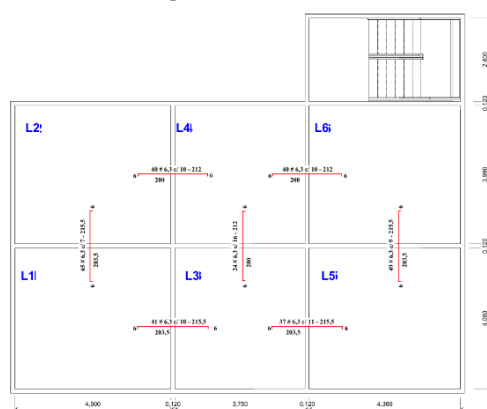
Por fim, definiu-se o comprimento total da barra, obtido a partir do comprimento reto acrescido de um incremento de detalhamento (dobra da barra, adotado em 6cm). Assim, tem-se. Dessa forma, a tabela consolidada, para cada caso, o vão médio, o comprimento reto e o comprimento total, servindo como base direta para o lançamento das armaduras no detalhamento, evitando inconsistências e reduzindo erros na etapa de representação gráfica.

#### 5.2.6.1 Lançamento do Detalhamento em Software

Após a definição das armaduras e do preenchimento das tabelas com bitolas, espaçamentos, vãos de distribuição e comprimentos das barras, realizou-se a etapa de lançamento do detalhamento em software de desenho. Nessa fase, todas as informações calculadas são transportadas para o modelo/detalhe, permitindo a representação gráfica completa das armaduras, com suas respectivas indicações e dimensões, de forma padronizada e compatível com a documentação do projeto.

O software escolhido para essa etapa foi o Autodesk Revit, por possibilitar o detalhamento e a organização dos elementos de forma integrada ao modelo, facilitando a visualização e a compatibilização. O lançamento das armaduras no Revit, com a aplicação dos parâmetros definidos, pode ser observado conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Detalhamento



Fonte: Autoria Própria.

## 6 RESULTADOS

O estudo comparativo do pré-dimensionamento de lajes com o ChatGPT explorou duas abordagens distintas, desde a autonomia total do modelo na primeira tentativa até a intervenção guiada na segunda.

### 6.3 Pré-Dimensionamento com Inteligência Artificial (ChatGPT)

Os resultados referentes à utilização da inteligência artificial, por meio do modelo de linguagem ChatGPT, no pré-dimensionamento das lajes do estudo de caso são apresentados a seguir.

#### 6.3.1 Primeira Tentativa

A 1ª tentativa do estudo comparativo consistiu em submeter ao ChatGPT o pré-dimensionamento de lajes por meio de uma única entrada de dados, estruturada a partir do roteiro completo já utilizado no método tradicional. Nessa abordagem, o modelo recebeu de uma só vez o procedimento de cálculo e, a partir da sua própria interpretação desse roteiro, gerou autonomamente todos os cálculos e dimensionamentos, sem qualquer intervenção, correção ou ajuste posterior por parte do usuário.

##### 6.3.1.1 Espessura Da Laje

A espessura da laje foi calculada seguindo os passos do roteiro introduzindo no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Espessura da laje pelo ChatGPT.

| Laje | L livre<br>x<br>(m) | L Livre<br>y<br>(m) | t<br>(m) | L<br>Ef x<br>(m) | L<br>Ef y<br>(m) | L<br>menor<br>(m) | L<br>maior<br>(m) | $\lambda$ | Le<br>(m) | n | d<br>(cm) | h<br>calc<br>(cm) | h<br>adot<br>(cm) |
|------|---------------------|---------------------|----------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|---|-----------|-------------------|-------------------|
| L1   | 3                   | 4                   | 0,15     | 3,15             | 4,15             | 3,15              | 4,15              | 1,31      | 2,905     | 3 | 8         | 11,65             | 12                |
| L2   | 3                   | 3,5                 | 0,15     | 3,15             | 3,65             | 3,15              | 3,65              | 1,15      | 2,555     | 3 | 8         | 11,65             | 12                |
| L3   | 3,5                 | 4                   | 0,15     | 3,65             | 4,15             | 3,65              | 4,15              | 1,13      | 2,905     | 3 | 8         | 11,65             | 12                |
| L4   | 3                   | 4,5                 | 0,15     | 3,15             | 4,65             | 3,15              | 4,65              | 1,47      | 3,15      | 2 | 8         | 11,65             | 12                |
| L5   | 3,5                 | 4,5                 | 0,15     | 3,65             | 4,65             | 3,65              | 4,65              | 1,27      | 3,255     | 2 | 8         | 11,65             | 12                |
| L6   | 3                   | 5                   | 0,15     | 3,15             | 5,15             | 3,15              | 5,15              | 1,63      | 3,15      | 1 | 8         | 11,65             | 12                |

Fonte: ChatGPT.

No método tradicional, cada laje teve sua espessura calculada individualmente, resultando em valores entre 10 e 11 cm, sendo posteriormente adotado  $h = 11$  cm como valor padronizado. Já no cálculo via ChatGPT, a altura útil foi fixada em 8 cm para todas as lajes, o que elevou artificialmente o valor da espessura calculada para 11,65 cm, levando à adoção de  $h = 12$  cm. Essa diferença de procedimento explica por que o ChatGPT obteve uma espessura maior do que a do método tradicional.

Outro ponto de divergência é o cálculo do comprimento efetivo  $Le$ . No método tradicional, esse valor foi determinado corretamente pela expressão normativa ( $l_{menor}$ ,  $0,7 \cdot l_{maior}$ ). Porém, na Tabela 11 elaborada via ChatGPT, os valores de  $Le$  não correspondem à aplicação direta dessa fórmula, indicando uso incorreto ou simplificado do critério, contribuindo novamente para a diferença no valor final de  $h$ . O principal erro do ChatGPT foi a simplificação excessiva, utilizando uma altura útil ( $d$ ) e espessura calculada ( $h$ ) constantes para todas as lajes, o que diverge da metodologia tradicional que exige a consideração individualizada de cada painel.

Apesar desses erros, o ChatGPT acertou na classificação de todas as lajes como bidirecionais, pois os valores de  $\lambda$  calculados estão coerentes com a geometria do estudo de caso. Também foi correto o procedimento de ajustar os vãos considerando meia parede, o que está alinhado à prática do pré-dimensionamento tradicional.

#### 6.3.1.2 Carregamentos e Alvenaria

Para os carregamentos e alvenaria, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro introduzindo no ChatGPT e os dados foram organizados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Carregamentos pelo ChatCPT

| Laje | h<br>(cm) | g pp<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) | g piso<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) | g teto<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) | q alv<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) | q acidental<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) | q total<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) |
|------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| L1   | 11        | 275                           | 100                             | 50                              | 100                            | 150                                  | 675                              |
| L2   | 11        | 275                           | 100                             | 50                              | 100                            | 150                                  | 675                              |
| L3   | 11        | 275                           | 100                             | 50                              | 100                            | 150                                  | 675                              |
| L4   | 11        | 275                           | 100                             | 50                              | 100                            | 150                                  | 675                              |
| L5   | 11        | 275                           | 100                             | 50                              | 100                            | 150                                  | 675                              |
| L6   | 11        | 275                           | 100                             | 50                              | 100                            | 150                                  | 675                              |

Fonte: ChatGPT.

Primeiramente, observa-se que o ChatGPT uniformizou o carregamento total das lajes, atribuindo o valor fixo de 675 kgf/m<sup>2</sup> para todas elas. Essa simplificação não encontra respaldo técnico, uma vez que o método tradicional demonstra que cada laje apresenta um carregamento distinto, condicionando-se à sua geometria, espessura e principalmente à presença e ao comprimento das paredes apoiadas sobre cada painel. No procedimento correto, os valores variam de 650 a 711,56 kgf/m<sup>2</sup>, refletindo de forma adequada a distribuição real das ações atuantes.

Tabela 13 – Alvenaria pelo ChatGPT

| Laje | (L)<br>(m) | (H)<br>(m) | (t)<br>(m) | A (laje)<br>(m <sup>2</sup> ) | P (alv)<br>(kgf) | q (alv,eq)<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) | q(alv) adotada<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) |
|------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| L1   | 4,0        | 2,80       | 0,15       | 12,00                         | 2.184            | 182,0                               | 182,0                                   |
| L2   | 3,0        | 2,80       | 0,15       | 10,50                         | 1.638            | 156,0                               | 156,0                                   |
| L3   | 5,0        | 2,80       | 0,15       | 14,00                         | 2.730            | 195,0                               | 195,0                                   |
| L4   | 4,5        | 2,80       | 0,15       | 13,50                         | 2.457            | 182,0                               | 182,0                                   |
| L5   | 6,0        | 2,80       | 0,15       | 15,75                         | 3.276            | 208,0                               | 208,0                                   |
| L6   | 3,5        | 2,80       | 0,15       | 15,00                         | 1.911            | 127,4                               | 127,4                                   |

Fonte: ChatGPT.

Em relação à alvenaria, verifica-se um segundo ponto crítico: embora o ChatGPT tenha seguido o procedimento formal de cálculo (peso total da parede e posterior conversão para carga distribuída), os valores obtidos carecem de precisão. Há inconsistências na determinação da área das lajes, nos pesos específicos adotados e na aplicação da carga mínima de 100 kgf/m<sup>2</sup>, que deveria ser utilizada apenas nos casos em que o valor calculado fosse inferior a esse limite. Como consequência, algumas lajes foram superdimensionadas, enquanto outras receberam valores subestimados, em desacordo com o método tradicional.

### 6.3.1.3 Momentos Positivos e Negativos

Para os momentos positivos e negativos, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro introduzindo no ChatGPT e os dados foram organizados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Momentos Positivos pelo ChatGPT

| Laje | $l_x$ (m) | $l_y$ (m) | $\lambda = l_y/l_x$ | $M_{x+}$ (kgf·m/m) | $(M_{y+})$ (kgf·m/m) |
|------|-----------|-----------|---------------------|--------------------|----------------------|
| L1   | 3,00      | 4,00      | 1,33                | 285,53             | 356,40               |
| L2   | 3,00      | 3,50      | 1,17                | 285,53             | 272,87               |
| L3   | 3,50      | 4,00      | 1,14                | 388,63             | 356,40               |
| L4   | 3,00      | 4,50      | 1,50                | 285,53             | 451,07               |
| L5   | 3,50      | 4,50      | 1,29                | 388,63             | 451,07               |
| L6   | 3,00      | 5,00      | 1,67                | 285,53             | 556,88               |

Fonte: ChatGPT.

Na Tabela 4, os momentos positivos são calculados a partir de vãos efetivos corrigidos e dos coeficientes da Tabela de Marcus, resultando em valores significativamente superiores. Em contraste, a Tabela 14 utiliza vãos geométricos simplificados, o que reduz de forma artificial o parâmetro  $\lambda$  e os momentos obtidos, além da falta de informações como os carregamentos e os coeficientes, mostrando resultados diferentes dos valores reais calculados.

Tabela 15 – Momentos Negativos pelo ChatGPT

| Conjunto | Laje 1 | Laje 2 | $L_x$ méd (m) | $L_y$ méd (m) | $M_{x-}$ (kgf·m/m) | $M_{y-}$ (kgf·m/m) |
|----------|--------|--------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
| L1/L2    | L1     | L2     | 3,00          | 3,75          | 340,20             | 436,64             |
| L1/L3    | L1     | L3     | 3,25          | 4,00          | 399,26             | 496,80             |
| L2/L4    | L2     | L4     | 3,00          | 4,00          | 340,20             | 496,80             |
| L3/L4    | L3     | L4     | 3,25          | 4,25          | 399,26             | 560,84             |
| L3/L5    | L3     | L5     | 3,50          | 4,25          | 463,05             | 560,84             |
| L4/L6    | L4     | L6     | 3,00          | 4,75          | 340,20             | 700,57             |
| L5/L6    | L5     | L6     | 3,25          | 4,75          | 399,26             | 700,57             |

Fonte: ChatGPT.

Da mesma forma, na Tabela 5 do método tradicional, os momentos negativos são determinados com base nos vãos efetivos, nos coeficientes  $n_x$  e  $n_y$  e no procedimento de compatibilização. Já a Tabela 15 do ChatGPT utiliza “vãos médios” atribuídos sem critério técnico e desconsidera completamente a compatibilização, resultando em momentos substancialmente inferiores. Assim, os resultados obtidos pelo ChatGPT apresentam resultados distorcidos devido à distribuição inadequada dos vãos e à aplicação incorreta dos coeficientes estruturais, culminando em valores inconsistentes com o comportamento real das lajes.

#### 6.3.1.4 Área das Armaduras Positivas e Negativas

Para a área das armaduras positivas e negativas, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro introduzindo no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – Área das Armaduras Positivas pelo ChatGPT

| Laje | Dir. | Mk<br>(kgf·m/m) | Mk<br>(kgf·cm/m) | Md<br>(kgf·cm/m) | As<br>(cm <sup>2</sup> /m) | As, min<br>(cm <sup>2</sup> /m) | As, final<br>(cm <sup>2</sup> /m) |
|------|------|-----------------|------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| L1   | x    | 285,53          | 28.553,00        | 39.974,20        | 1,277                      | 1,28                            | 1,28                              |
| L1   | y    | 356,40          | 35.640,00        | 49.896,00        | 1,594                      | 1,28                            | 1,594                             |
| L2   | x    | 285,53          | 28.553,00        | 39.974,20        | 1,277                      | 1,28                            | 1,28                              |
| L2   | y    | 272,87          | 27.287,00        | 38.201,80        | 1,220                      | 1,28                            | 1,28                              |
| L3   | x    | 388,63          | 38.863,00        | 54.408,20        | 1,738                      | 1,28                            | 1,738                             |
| L3   | y    | 356,40          | 35.640,00        | 49.896,00        | 1,594                      | 1,28                            | 1,594                             |
| L4   | x    | 285,53          | 28.553,00        | 39.974,20        | 1,277                      | 1,28                            | 1,28                              |
| L4   | y    | 451,07          | 45.107,00        | 63.149,80        | 2,017                      | 1,28                            | 2,017                             |
| L5   | x    | 388,63          | 38.863,00        | 54.408,20        | 1,738                      | 1,28                            | 1,738                             |
| L5   | y    | 451,07          | 45.107,00        | 63.149,80        | 2,017                      | 1,28                            | 2,017                             |
| L6   | x    | 285,53          | 28.553,00        | 39.974,20        | 1,277                      | 1,28                            | 1,28                              |
| L6   | y    | 556,88          | 55.688,00        | 77.963,20        | 2,490                      | 1,28                            | 2,490                             |

Fonte: ChatGPT.

A comparação entre a Tabela 16 produzida pelo ChatGPT e a Tabela 6 do método tradicional evidencia que as diferenças observadas nas áreas de armadura derivam diretamente dos momentos incorretos utilizados pelo ChatGPT. Observa-se também a falta de informações como o  $\mu_o$  e o  $\omega_o$  que não foram mostrados nos resultados, tornando os resultados incoerentes entre os métodos.

Tabela 17 – Área das Armaduras Negativas pelo ChatGPT

| Conjunto | Dir. | Mk-<br>(kgf·m/m) | Mk-<br>(kgf·cm/m) | Md<br>(kgf·cm/m) | As<br>(cm <sup>2</sup> /m) | As, min<br>(cm <sup>2</sup> /m) | As, final<br>(cm <sup>2</sup> /m) |
|----------|------|------------------|-------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| L1/L2    | x    | 340,20           | 34.020,0          | 47.628,0         | 1,521                      | 1,384                           | 1,521                             |
| L1/L3    | x    | 399,26           | 39.926,0          | 55.896,4         | 1,786                      | 1,384                           | 1,786                             |
| L2/L4    | x    | 340,20           | 34.020,0          | 47.628,0         | 1,521                      | 1,384                           | 1,521                             |
| L3/L4    | x    | 399,26           | 39.926,0          | 55.896,4         | 1,786                      | 1,384                           | 1,786                             |
| L3/L5    | x    | 463,05           | 46.305,0          | 64.827,0         | 2,071                      | 1,384                           | 2,071                             |
| L4/L6    | x    | 340,20           | 34.020,0          | 47.628,0         | 1,521                      | 1,384                           | 1,521                             |
| L5/L6    | x    | 399,26           | 39.926,0          | 55.896,4         | 1,786                      | 1,384                           | 1,786                             |
| L1/L2    | y    | 436,64           | 43.664,0          | 61.129,6         | 1,953                      | 1,384                           | 1,953                             |
| L1/L3    | y    | 496,80           | 49.680,0          | 69.552,0         | 2,222                      | 1,384                           | 2,222                             |
| L2/L4    | y    | 496,80           | 49.680,0          | 69.552,0         | 2,222                      | 1,384                           | 2,222                             |
| L3/L4    | y    | 560,84           | 56.084,0          | 78.517,6         | 2,508                      | 1,384                           | 2,508                             |
| L3/L5    | y    | 560,84           | 56.084,0          | 78.517,6         | 2,508                      | 1,384                           | 2,508                             |
| L4/L6    | y    | 700,57           | 70.057,0          | 98.079,8         | 3,133                      | 1,384                           | 3,133                             |
| L5/L6    | y    | 700,57           | 70.057,0          | 98.079,8         | 3,133                      | 1,384                           | 3,133                             |

Fonte: ChatGPT.

Novamente os resultados obtidos foram incompatíveis com a Tabela 7 obtendo resultados muito menores em comparação. Adicionalmente, observou-se uma incongruência na estruturação da planilha gerada pelo ChatGPT, na qual os momentos foram indevidamente subdivididos nas direções x e y o que não deveria ter acontecido devido inconsistências na leitura e interpretação dos dados de entrada por parte do modelo. Em suma, as consequências

diretas desses equívocos metodológicos e de processamento resultaram na geração de resultados incorretos para o dimensionamento.

#### 6.3.1.5 Armaduras Positivas e Negativas

Para a determinação das armaduras positivas e negativas, os parâmetros necessários foram calculados seguindo-se as etapas do roteiro previamente estabelecido, o qual foi introduzido no ChatGPT. Os dados obtidos a partir dessa aplicação foram, posteriormente, organizados e sistematizados nas Tabelas 18, 19 e 20

Tabela 18 – Armaduras Positivas pelo ChatGPT

| Laje | Dir. | As, final<br>(cm <sup>2</sup> /m) | $\phi$ (mm) | E teor<br>(cm) | E adot<br>(cm) | Vão de distribuição<br>(cm) | Nº de<br>barras |
|------|------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------|
| L1   | x    | 1,280                             | 8           | 39,3           | 20,0           | 300                         | 15              |
| L1   | y    | 1,594                             | 8           | 31,5           | 20,0           | 400                         | 20              |
| L2   | x    | 1,280                             | 8           | 39,3           | 20,0           | 300                         | 15              |
| L2   | y    | 1,280                             | 8           | 39,3           | 20,0           | 350                         | 18              |
| L3   | x    | 1,738                             | 8           | 28,9           | 20,0           | 350                         | 18              |
| L3   | y    | 1,594                             | 8           | 31,5           | 20,0           | 400                         | 20              |
| L4   | x    | 1,280                             | 8           | 39,3           | 20,0           | 300                         | 15              |
| L4   | y    | 2,017                             | 8           | 24,9           | 20,0           | 450                         | 23              |
| L5   | x    | 1,738                             | 8           | 28,9           | 20,0           | 350                         | 18              |
| L5   | y    | 2,017                             | 8           | 24,9           | 20,0           | 450                         | 23              |
| L6   | x    | 1,280                             | 8           | 39,3           | 20,0           | 300                         | 15              |
| L6   | y    | 2,490                             | 8           | 20,2           | 20,0           | 500                         | 25              |

Fonte: ChatGPT.

Observam-se inconsistências relevantes entre os métodos. Embora a área de aço esteja mal dimensionada e o diâmetro das barras adotado pelo ChatGPT seja distinto daquele utilizado no método tradicional, obteve-se um espaçamento teórico excessivamente elevado, muito acima do valor esperado para a faixa de esforços considerada. Soma-se a isso a adoção de vãos simplificados de forma indevida, desconsiderando os vãos efetivos determinados no pré-dimensionamento tradicional. Essa combinação de área de aço subestimada, escolha inadequada de diâmetros e simplificação exagerada dos vãos resultou em espaçamentos corrigidos apenas pelo limite normativo e, conseqüentemente, em uma quantidade de barras estruturalmente incoerente quando comparada ao dimensionamento de referência.

Tabela 19 – Armaduras Negativas direção x pelo ChatGPT

| Conjunto | Dir. | As, final<br>(cm <sup>2</sup> /m) | φ<br>(mm) | E teor<br>(cm) | E adot<br>(cm) | Vão de distribuição<br>(cm) | Nº de<br>barras |
|----------|------|-----------------------------------|-----------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------|
| L1/L2    | x    | 1,521                             | 8         | 33,0           | 20             | 300                         | 15              |
| L1/L3    | x    | 1,786                             | 8         | 28,1           | 20             | 325                         | 17              |
| L2/L4    | x    | 1,521                             | 8         | 33,0           | 20             | 300                         | 15              |
| L3/L4    | x    | 1,786                             | 8         | 28,1           | 20             | 325                         | 17              |
| L3/L5    | x    | 2,071                             | 8         | 24,3           | 20             | 350                         | 18              |
| L4/L6    | x    | 1,521                             | 8         | 33,0           | 20             | 300                         | 15              |
| L5/L6    | x    | 1,786                             | 8         | 28,1           | 20             | 325                         | 17              |

Fonte: ChatGPT.

Tabela 20 – Armaduras Negativas direção y pelo ChatGPT

| Conjunto | Dir. | As, final<br>(cm <sup>2</sup> /m) | φ<br>(mm) | E teor<br>(cm) | (E ado<br>(cm) | Vão de distribuição<br>(cm) | Nº de<br>barras |
|----------|------|-----------------------------------|-----------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------|
| L1/L2    | y    | 1,953                             | 8         | 25,7           | 20             | 375                         | 19              |
| L1/L3    | y    | 2,222                             | 8         | 22,6           | 20             | 400                         | 20              |
| L2/L4    | y    | 2,222                             | 8         | 22,6           | 20             | 400                         | 20              |
| L3/L4    | y    | 2,508                             | 8         | 20,0           | 20             | 425                         | 22              |
| L3/L5    | y    | 2,508                             | 8         | 20,0           | 20             | 425                         | 22              |
| L4/L6    | y    | 3,133                             | 8         | 16,0           | 16             | 475                         | 30              |
| L5/L6    | y    | 3,133                             | 8         | 16,0           | 16             | 475                         | 30              |

Fonte: ChatGPT.

Pelo método adotado pelo ChatGPT, observa-se novamente uma série de inconsistências no detalhamento das armaduras negativas. Em primeiro lugar, houve uma divisão artificial em duas direções (x e y) para os conjuntos de lajes, procedimento que não era previsto no método tradicional e que não se justifica do ponto de vista estrutural. Além disso, o diâmetro das barras foi alterado em relação ao dimensionamento de referência, o que, combinado com as áreas de aço subestimadas, resultou em espaçamentos teóricos elevados, posteriormente limitados apenas ao valor máximo normativo. Soma-se a isso a adoção de vãos de distribuição excessivamente simplificados, sem correspondência com os vãos efetivos utilizados no pré-dimensionamento tradicional.

Como consequência direta desse conjunto de simplificações (direções indevidas, diâmetro distinto, espaçamentos superdimensionados e vãos reduzidos de forma arbitrária), a quantidade final de barras obtida pelo método do ChatGPT torna-se muito inferior àquela determinada pelo método tradicional, revelando um claro subdimensionamento das armaduras negativas.

### 6.3.1.6 Detalhamento

Para o detalhamento, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro introduzindo no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados na Tabela 21.

Tabela 21 – Comprimentos Utilizados pelo ChatGPT

| Conjunto de lajes | Vão médio entre as lajes (m) | Vão médio (cm) | Comprimento reto = vão/2 (cm) | Comprimento total = comp. reto + 6 cm (cm) |
|-------------------|------------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| L1 / L2           | 3,75                         | 375            | 188                           | 194                                        |
| L1 / L3           | 4,00                         | 400            | 200                           | 206                                        |
| L2 / L4           | 4,00                         | 400            | 200                           | 206                                        |
| L3 / L4           | 4,25                         | 425            | 212                           | 218                                        |
| L3 / L5           | 4,25                         | 425            | 212                           | 218                                        |
| L4 / L6           | 4,75                         | 475            | 238                           | 244                                        |
| L5 / L6           | 4,75                         | 475            | 238                           | 244                                        |

Fonte: ChatGPT.

Apesar da série de inconsistências observadas nas etapas anteriores, incluindo erros nos vãos efetivos, no carregamento, nos momentos fletores, nas áreas de aço e no detalhamento das armaduras, entre outros erros cometidos, os valores de comprimento apresentados pelo ChatGPT na Tabela 21 demonstram certa similaridade numérica com os resultados do método tradicional. Essa semelhança, contudo, é meramente circunstancial e não representa validação do processo adotado pelo ChatGPT.

### 6.3.1.7 Discussões da Primeira Tentativa

A análise comparativa entre o pré-dimensionamento tradicional e o realizado pelo ChatGPT demonstrou que, embora a IA apresente capacidade de estruturar tabelas, seguir sequências de cálculo e aplicar fórmulas conhecidas, o processo resultou em erros sistemáticos que inviabilizam seu uso técnico nesta etapa do dimensionamento estrutural.

É importante destacar que toda a análise realizada pelo ChatGPT ocorreu dentro do limite de 1 hora, conforme definido para este teste. Dessa forma, a ferramenta conseguiu entregar uma sequência completa de tabelas, cálculos e detalhamentos em um período muito inferior ao necessário para execução manual integral. O método tradicional, por sua vez, demanda mais tempo devido à necessidade de interpretação normativa, conferência de valores e validação estrutural, etapas indispensáveis para garantir segurança e precisão.

Entretanto, a significativa redução de tempo não refletiu em qualidade técnica. Desde o início, o ChatGPT cometeu simplificações indevidas, sendo que, inicialmente, observaram-se

simplificações inadequadas na determinação dos vãos, desconsiderando correções essenciais previstas em norma, o que comprometeu toda a cadeia de cálculos subsequente. Da mesma forma, os carregamentos foram unificados de maneira arbitrária, ignorando particularidades de cada laje e distorcendo os esforços solicitantes. Os momentos positivos e negativos resultantes apresentaram valores muito inferiores aos obtidos pelo método tradicional, consequência direta dos vãos incorretos e dos coeficientes estruturais aplicados de forma inadequada.

Esse erro propagado levou ao dimensionamento incorreto das áreas de aço, com subestimação generalizada das armaduras e adoção de bitolas incompatíveis com a prática do projeto. Os espaçamentos teóricos e adotados mostraram-se excessivamente elevados, enquanto os vãos de distribuição simplificados resultaram em quantidades de barras extremamente inferiores às necessárias, refletindo incoerência estrutural evidente.

Por fim, ainda que algumas etapas geométricas, como o cálculo dos comprimentos das barras, tenham produzido valores numericamente próximos ao método tradicional, essa coincidência não confere validade ao procedimento, pois o dimensionamento depende integralmente da precisão das etapas anteriores, que não foi atendida.

Em conclusão, a primeira etapa de pré-dimensionamento realizada pelo ChatGPT mostrou-se insuficiente, inconsistente e tecnicamente inadequada, evidenciando que, embora a ferramenta possa auxiliar na organização e automatização de cálculos, ela não substitui o rigor normativo, a interpretação técnica e o julgamento profissional necessários ao dimensionamento estrutural.

### 6.3.2 Segunda Tentativa

A segunda tentativa do estudo comparativo consistiu na nova submissão do procedimento de pré-dimensionamento de lajes ao modelo de linguagem ChatGPT. Nesta fase, o processo foi intencionalmente segmentado em etapas, buscando estabelecer um diálogo orientado com a ferramenta, de modo a refinar progressivamente os resultados obtidos.

#### 6.3.2.1 Espessura da Laje

Para a espessura da laje, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro e refinamentos introduzidos no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados na Tabela 22.

Tabela 22 – Espessura da laje por ChatGPT, segunda tentativa

| Laje | l <sub>maior</sub> (m) | l <sub>menor</sub> (m) | $\lambda$ | 0,7l <sub>maior</sub> (m) | l* (m) | (n) | (d) (cm) | (h) (cm) | hutilizado (cm) |
|------|------------------------|------------------------|-----------|---------------------------|--------|-----|----------|----------|-----------------|
| L1   | 4,62                   | 4,18                   | 1,11      | 3,23                      | 3,23   | 2   | 7,44     | 10,19    | 11              |
| L2   | 4,62                   | 4,11                   | 1,12      | 3,23                      | 3,23   | 2   | 7,44     | 10,19    | 11              |
| L3   | 4,18                   | 3,87                   | 1,08      | 2,93                      | 2,93   | 3   | 6,44     | 9,19     | 10              |
| L4   | 4,11                   | 3,87                   | 1,06      | 2,88                      | 2,88   | 3   | 6,33     | 9,08     | 10              |
| L5   | 4,48                   | 4,18                   | 1,07      | 3,14                      | 3,14   | 2   | 7,21     | 9,96     | 10              |
| L6   | 4,48                   | 4,11                   | 1,09      | 3,14                      | 3,14   | 2   | 7,21     | 9,96     | 10              |

Fonte: ChatGPT.

Os resultados obtidos foram surpreendentes, levando em consideração que faltou colocar na tabela se as armaduras eram em uma direção ou em duas direções. Porém, em comparação com o dimensionamento tradicional, os resultados obtidos foram aceitáveis, pois ao final, ele adotou uma espessura de laje igual a 11 cm.

### 6.3.2.2 Carregamentos e Alvenaria

Para os carregamentos e alvenaria, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro e refinamentos introduzidos no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados no Tabela 23.

Tabela 23 – Carregamento e Alvenaria pelo ChatGPT, segunda tentativa

| Laje | L (m) | A laje (m <sup>2</sup> ) | P alv (kgf) | q alv (kgf/m <sup>2</sup> ) | q alv, cons | q pp | q pav | q teto | q acid | q total (kgf/m <sup>2</sup> ) |
|------|-------|--------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|------|-------|--------|--------|-------------------------------|
| L1   | 6.55  | 18.27                    | 2133.46     | 116.77                      | 116.77      | 275  | 100   | 50     | 150    | 691.77                        |
| L2   | 5.90  | 18.98                    | 1921.68     | 101.19                      | 101.19      | 275  | 100   | 50     | 150    | 676.19                        |
| L3   | 4.12  | 16.18                    | 1340.35     | 82.84                       | 100.00      | 250  | 100   | 50     | 150    | 650.00                        |
| L4   | 3.80  | 15.91                    | 1236.48     | 77.64                       | 100.00      | 250  | 100   | 50     | 150    | 650.00                        |
| L5   | 6.10  | 18.74                    | 1984.56     | 105.88                      | 105.88      | 250  | 100   | 50     | 150    | 655.88                        |
| L6   | 5.40  | 18.41                    | 1757.76     | 95.48                       | 100.00      | 250  | 100   | 50     | 150    | 650.00                        |

Fonte: ChatGPT.

Apesar da similaridade dos resultados com a Tabela 2 de carregamentos pelo método tradicional, ainda assim os resultados obtidos foi um pouco abaixo do esperado tendo em vista que somente a L1 apresentou valores iguais, enquanto as outras lajes apresentaram em ordem decrescente, valores inferiores.

### 6.3.2.3 Momentos Positivos e Negativos

Para os momentos positivos e negativos, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro e refinamentos introduzidos no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados nas Tabelas 24 e 25.

Tabela 24 – Momentos positivos pelo ChatGPT, segunda tentativa

| Laje | lx (m) | ly (m) | p) (kgf/m <sup>2</sup> ) | mx) | my | Mx+ (kgf·m) | My+ (kgf·m) |
|------|--------|--------|--------------------------|-----|----|-------------|-------------|
| L1   | 4.18   | 4.62   | 691.77                   | 31  | 38 | ≈ 390.5     | ≈ 388.5     |
| L2   | 4.11   | 4.62   | 676.19                   | 30  | 33 | ≈ 381.0     | ≈ 437.0     |
| L3   | 3.87   | 4.18   | 650.00                   | 59  | 18 | ≈ 165.0     | ≈ 631.0     |
| L4   | 3.87   | 4.11   | 650.00                   | 56  | 22 | ≈ 174.0     | ≈ 499.0     |
| L5   | 4.18   | 4.48   | 655.88                   | 32  | 34 | ≈ 358.0     | ≈ 387.0     |
| L6   | 4.11   | 4.48   | 650.00                   | 31  | 33 | ≈ 354.0     | ≈ 395.0     |

Fonte: ChatGPT.

Tabela 25 – Momentos negativos pelo ChatGPT, segunda tentativa

| Par     | M total x | M total y | Média | 80% do Maior | Momento Compatibilizado |
|---------|-----------|-----------|-------|--------------|-------------------------|
| L1 – L2 | 782.2     | 800.3     | 791.3 | 640.2        | 791.3                   |
| L1 – L3 | 782.2     | 889.0     | 835.6 | 711.2        | 835.6                   |
| L3 – L4 | 889.0     | 862.3     | 875.6 | 711.2        | 875.6                   |
| L4 – L5 | 862.3     | 934.0     | 898.2 | 747.2        | 898.2                   |
| L5 – L6 | 934.0     | 935.0     | 934.5 | 748.0        | 934.5                   |

Fonte: ChatGPT.

Notou-se uma leve dificuldade na elaboração dessas etapas, isso devido a leitura que foi feita dos parâmetros mx, nx, my e ny, o que levou a resultados diferentes do esperado. Os momentos positivos apresentaram resultados com uma certa similaridade em comparação com a Tabela 4, ou seja, se aproximam do resultado original.

Já os momentos positivos apresentaram resultados em ordem crescente enquanto no original em ordem decrescente, referente a Tabela 5. A dificuldade em interpretar dados ocasionou essa disparidade dos resultados.

### 6.3.2.4 Área das Armaduras Positivas e Negativas

Para as áreas das armaduras positivas e negativas, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro e refinamentos introduzidos no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26 – Área de armadura positiva pelo ChatGPT, segunda tentativa

| Laje | $M_x^+$ (kgf·m) | $M_y^+$ (kgf·m) | $A_{s_x}^+$ , dim (cm <sup>2</sup> /m) | $A_{s_y}^+$ , dim (cm <sup>2</sup> /m) |
|------|-----------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| L1   | 389,90          | 388,56          | 27,12                                  | 27,12                                  |
| L2   | 380,74          | 437,36          | 27,15                                  | 26,95                                  |
| L3   | 165,00          | 630,95          | 27,92                                  | 26,24                                  |
| L4   | 173,84          | 499,08          | 27,89                                  | 26,72                                  |
| L5   | 358,12          | 387,17          | 27,23                                  | 27,13                                  |
| L6   | 354,19          | 395,33          | 27,25                                  | 27,10                                  |

Fonte: ChatGPT.

Tabela 27 – Área de armadura negativa pelo ChatGPT, segunda tentativa

| Laje | $M_x^-$ (kgf·m) | $M_y^-$ (kgf·m) | $A_{s_x}^-$ , dim (cm <sup>2</sup> /m) | $A_{s_y}^-$ , dim (cm <sup>2</sup> /m) |
|------|-----------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| L1   | 402,90          | 527,34          | 27,07                                  | 26,62                                  |
| L2   | 326,35          | 481,10          | 27,35                                  | 26,79                                  |
| L3   | 374,42          | 516,23          | 27,18                                  | 26,66                                  |
| L4   | 405,62          | 457,49          | 27,06                                  | 26,88                                  |
| L5   | 409,28          | 526,55          | 27,05                                  | 26,62                                  |
| L6   | 422,30          | 521,83          | 27,00                                  | 26,64                                  |

Fonte: ChatGPT.

Nota-se uma disparidade significativa entre os resultados obtidos pelo ChatGPT e aqueles calculados pelo método original, evidenciando problemas de compatibilidade e interpretação por parte da ferramenta. Considerando que os valores apresentados nas Tabela 25 e 26 se mostram totalmente divergentes dos resultados de referência, infere-se que o roteiro elaborado pode não ter sido suficientemente claro ou que o ChatGPT apresenta limitações na leitura e no processamento de fórmulas e comandos extensos e complexos, comprometendo a fidelidade do dimensionamento automático.

#### 6.3.2.5 Armaduras Positivas e Negativas

Para as armaduras positivas e negativas, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro e refinamentos introduzidos no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28 – Armadura positiva pelo ChatGPT, segunda tentativa

| Laje | Direção  | Asdim<br>(cm <sup>2</sup> /m) | Ø<br>(mm) | A <sub>φ</sub><br>(cm <sup>2</sup> ) | Eteo<br>(cm) | Eadot<br>(cm) | Vão de<br>distribuição<br>(m) | Nº barras<br>N=(l/Eadot) |
|------|----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------------|--------------------------|
| L1   | x (4,18) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,18                          | 3                        |
| L1   | y (4,62) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,62                          | 3                        |
| L2   | x (4,11) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,11                          | 3                        |
| L2   | y (4,62) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,62                          | 3                        |
| L3   | x (3,87) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 3,87                          | 3                        |
| L3   | y (4,18) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,18                          | 3                        |
| L4   | x (3,87) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 3,87                          | 3                        |
| L4   | y (4,11) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,11                          | 3                        |
| L5   | x (4,18) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,18                          | 3                        |
| L5   | y (4,48) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,48                          | 3                        |
| L6   | x (4,11) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,11                          | 3                        |
| L6   | y (4,48) | 27,07                         | 8         | 0,503                                | 1,86         | 1,8           | 4,48                          | 3                        |

Fonte: ChatGPT.

Tabela 29 – Armadura negativa pelo ChatGPT, segunda tentativa

| Laje | Direção | Asdim,<br>(cm <sup>2</sup> /m) | Ø<br>(mm) | A <sub>φ</sub><br>(cm <sup>2</sup> ) | Eteo<br>(cm) | Eadot<br>(cm) | Vão de<br>distribuição<br>(m) | Nº de barras<br>N=(l/(Eadot/100)) |
|------|---------|--------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| L1   | x       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,18                          | 209                               |
| L1   | y       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,62                          | 231                               |
| L2   | x       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,11                          | 206                               |
| L2   | y       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,62                          | 231                               |
| L3   | x       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 3,87                          | 194                               |
| L3   | y       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,18                          | 209                               |
| L4   | x       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 3,87                          | 194                               |
| L4   | y       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,11                          | 206                               |
| L5   | x       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,18                          | 209                               |
| L5   | y       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,48                          | 225                               |
| L6   | x       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,11                          | 206                               |
| L6   | y       | 25,15                          | 8         | 0,503                                | 2,0          | 2,0           | 4,48                          | 225                               |

Fonte: ChatGPT.

De fato, as Tabelas 27 e 28 evidenciam essa discrepância. A partir desse ponto, os valores obtidos passam a se distanciar completamente dos resultados de referência. Observa-se, em especial, um aumento expressivo na quantidade de armadura indicada, caracterizando um superdimensionamento e confirmando que o procedimento automatizado adotado pelo ChatGPT conduziu a um resultado estruturalmente incoerente e tecnicamente equivocado.

### 6.3.2.6 Detalhamento

Para o detalhamento, os parâmetros foram calculados seguindo os passos do roteiro e refinamentos introduzidos no ChatGPT e os dados adquiridos foram organizados no Tabela 30.

Tabela 30 – Comprimentos utilizados pelo ChatGPT, segunda tentativa

| Conjunto de lajes | Vão médio (cm) | Comprimento reto (cm) | Comprimento total (cm) |
|-------------------|----------------|-----------------------|------------------------|
| L1 / L2           | 462,0          | 231,0                 | 237,0                  |
| L1 / L3           | 418,0          | 209,0                 | 215,0                  |
| L3 / L4           | 411,0          | 205,5                 | 211,5                  |
| L4 / L5           | 418,0          | 209,0                 | 215,0                  |
| L5 / L6           | 448,0          | 224,0                 | 230,0                  |

Fonte: ChatGPT.

Apesar das inconsistências observadas ao longo do dimensionamento, a etapa de detalhamento apresentou resultados semelhantes aos obtidos no procedimento original. Contudo, essa aproximação no detalhamento não elimina o fato de que o dimensionamento permanece tecnicamente incorreto, comprometendo a confiabilidade global da solução estrutural.

### 6.3.2.7 Discussões da Segunda Tentativa

Considerando a análise dos resultados, observa-se que o pré-dimensionamento realizado nesta segunda etapa, correspondente à segunda tentativa, apresentou desempenho significativamente inferior ao da primeira. A elaboração de roteiros para conduzir o ChatGPT mostrou-se uma tarefa complexa, que exige tempo, sucessivos ajustes e refinamentos até se alcançar uma estrutura realmente adequada às necessidades do dimensionamento estrutural. Com base no roteiro utilizado, verifica-se que a ferramenta teve um desempenho satisfatório nas etapas iniciais, especialmente na organização das lajes, definição de vãos, determinação da espessura preliminar e cálculo dos carregamentos. Contudo, a partir do cálculo dos momentos fletores, a ferramenta passou a apresentar inconsistências de forma recorrente, seja na análise dos dados de entrada, na interpretação das expressões e fórmulas fornecidas, seja, eventualmente, por limitações internas de processamento e de coerência numérica ao longo de várias iterações.

Em alguns casos, foram observados erros de leitura de coeficientes, simplificações inadequadas ou propagação de equívocos entre tabelas sucessivas, o que comprometeu a confiabilidade do dimensionamento como um todo. Mesmo com tentativas de correção por meio de novos roteiros, esclarecimentos adicionais e fragmentação das tarefas em etapas menores, a ferramenta não conseguiu recuperar a consistência global dos resultados numéricos nessa segunda tentativa.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de modelos de linguagem baseados em Inteligência Artificial (IA), como os LLMs, representa um avanço significativo no apoio às atividades de engenharia, especialmente na automatização de processos repetitivos, organização de informações, geração de documentos e estruturação de procedimentos. Essas ferramentas possuem grande potencial para otimizar fluxos de trabalho, reduzir o tempo de elaboração de cálculos auxiliares e facilitar a interpretação inicial de dados complexos, desde que devidamente orientadas por profissionais qualificados. No contexto da engenharia estrutural, sua aplicação ainda se encontra em estágio de amadurecimento, exigindo protocolos rigorosos de verificação, validação e supervisão constante pelo engenheiro responsável.

A partir das duas tentativas analisadas neste estudo, ambas baseadas em roteiros cuidadosamente elaborados e executadas dentro do limite experimental, foi possível identificar tanto as capacidades quanto as limitações atuais das IAs no pré-dimensionamento de lajes em concreto armado.

Na primeira tentativa, observou-se que, apesar de inconsistências iniciais e erros em etapas fundamentais, o ChatGPT foi capaz de produzir uma sequência coerente de cálculos, apresentando valores mais próximos aos resultados obtidos pelo método tradicional. Houve falhas no tratamento dos vãos, carregamentos e esforços, mas, ainda assim, o desempenho global manteve-se mais alinhado aos requisitos técnicos mínimos para interpretação preliminar de um projeto estrutural.

Já na segunda tentativa, mesmo após a elaboração de um roteiro mais estruturado, detalhado e segmentado, a ferramenta apresentou performance significativamente inferior. Embora tenha iniciado o processo de maneira satisfatória, o ChatGPT demonstrou dificuldades crescentes à medida que avançava para as etapas mais complexas do dimensionamento. Os equívocos se intensificaram a partir do cálculo dos momentos fletores, propagaram-se para o dimensionamento das áreas de aço e culminaram em valores completamente divergentes dos obtidos pelo método tradicional. A discrepância numérica foi ainda mais evidente nos detalhamentos, onde a quantidade de barras e os espaçamentos resultaram incompatíveis com qualquer prática estrutural adequada.

A comparação entre as duas tentativas evidencia que a mera existência de um roteiro, mesmo um mais detalhado e estruturado, não garante a precisão dos resultados fornecidos pela IA. O ChatGPT possui limitações claras na interpretação de expressões matemáticas, na manutenção da coerência entre etapas sucessivas e no processamento de cadeias de cálculo extensas, especialmente quando envolvem condicionantes normativas e interdependência de variáveis. Tais limitações, quando aplicadas ao dimensionamento estrutural, tornam-se críticas, pois pequenos desvios no início do processo podem resultar em erros substanciais na etapa final, comprometendo completamente a segurança da estrutura.

Por outro lado, o estudo confirma que as IAs possuem elevado potencial como ferramentas de apoio, auxiliando na elaboração de textos técnicos, organização de tabelas, produção de memorial descritivo, geração de fluxogramas e sistematização de etapas metodológicas. Nesse sentido, os LLMs não substituem, mas complementam o trabalho do engenheiro, oferecendo suporte em atividades paralelas, desde que supervisionadas com rigor técnico.

Em síntese, os resultados reforçam que, embora a IA demonstre ser uma ferramenta promissora para a engenharia civil, especialmente pela rapidez na geração de informações e na organização de processos, seu uso no dimensionamento estrutural ainda requer extrema cautela. A precisão, a confiabilidade e a conformidade normativa permanecem dependentes da atuação do engenheiro projetista, que deve exercer julgamento crítico e validação completa de todas as etapas. Assim, as IAs assumem um papel auxiliar e complementar, e não substitutivo, no contexto da prática profissional da engenharia estrutural.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023. Projeto de estruturas de concreto**. Procedimento. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=479091>> . Acesso em: 11 nov. 2025.
- AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos elementos finitos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. Disponível em: <[https://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/livro\\_mef\\_aa.htm](https://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/livro_mef_aa.htm)> . Acesso em: 15 nov. 2025.
- BARBOZA, T. N. U.; AGUIAR, C. P. De. **Inteligência artificial na construção civil: benefícios, desafios e a importância do profissional na tomada de decisão**. Caderno Pedagógico, Lajeado, v. 22, n. 1, p. 1–15, 2025. Disponível em: <<https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs3/index.php/cadped/article/view/15259>> . Acesso em: 15 dez. 2025.
- BRANCHIER, H. S.; GAUER, E. A. **Contribuições dos softwares na aprendizagem de análise e cálculo de elementos estruturais**. Revista de Ensino de Engenharia, v. 39, n. 1, p. 472–479, 2020. Disponível em: <<https://revista.abenge.org.br/index.php/abenge/article/view/1630>> . Acesso em: 23 nov. 2025.
- CARDOSO, J. O. R. **Análise não linear de vigas de concreto armado com fibras de aço**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.udesc.br/handle/757/26790>> . Acesso em 18 nov. 2025.
- CARVALHO, R. C. **Os avanços tecnológicos e o projeto estrutural de concreto armado: uma comparação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.uema.br/jspui/handle/123456789/621>> . Acesso em: 12 nov. 2025.
- COELHO, B. A. C. **Análise da qualidade e eficácia do código gerado por LLMs**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/handle/10438/37450>> . Acesso em: 18 nov. 2025.
- FONTANA, L. A. **Avaliação da não-linearidade física na estabilidade global de edifícios de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/259788>> . Acesso em: 22 nov. 2025.
- FUGIYAMA, M. M. **Estudo do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras poliméricas reforçadas com fibra de basalto e fibras descontínuas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.sis.puccampinas.edu.br/jspui/handle/123456789/1807>> . Acesso em: 24 nov. 2025.

GLÓRIA, M. M. **Pré-dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/2901>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

KRUSCHE, F. B. **Aplicação de inteligência artificial na otimização e análise de incertezas em materiais compósitos laminados**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-20072023-090353/>>. Acesso em: 25 nov. 2025.

LOTTI, R. S. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**. Desenvolvimento em Revista, v. 1, n. 1, p. 61–73, 2006. Disponível em: <<https://desenvolvimento.emnuvens.com.br/desenvolvimento/article/view/15>>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MARINHO, M. M. **Estudo comparativo entre o cálculo manual e computacional de uma estrutura em concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/44137>>. Acesso em: 28 nov. 2025.

MARTINS, V. A. **Wooden Structures e Metallic Structures: softwares de pré-dimensionamento de estruturas desenvolvidos em Java**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2024. Disponível em: <<https://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/5631>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

MATILDES, C. M. **Concreto armado e suas patologias**. Semana Acadêmica, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2024. Disponível em: <<https://semanaacademica.com.br/artigo/concreto-armado-e-suas-patologias>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

MELO, G. F. de. **Análise não linear de vigas de concreto armado com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18873>>. Acesso em: 18 nov. 2025.

MELO, P. R. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/31786>>. Acesso em: 25 nov. 2025.

MIRANDA, W. P.; SILVA, A. C. L. da. **O papel do engenheiro no uso de softwares para cálculo estrutural**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 1–10, 2022. Disponível em: <<https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/42813>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

MUNDIM, B. H. G. **Análise comparativa de pré-dimensionamento de estruturas em concreto armado por método tradicional e auxiliado por Large Language Model**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/41466>>. Acesso em: 18 nov. 2025.

NASCIMENTO, J. R. **Exploração de técnicas de engenharia de prompt para aprimorar os resultados do uso de LLM no TCMRio**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Software). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/59214>> . Acesso em: 18 nov. 2025.

OLIVEIRA, B. A. A. **Modelagem, análise e dimensionamento de uma torre de suspensão do tipo delta para linha de transmissão com base nas normas técnicas brasileiras**.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Instituto Federal de

Goiás, Goiânia, 2025. Disponível em: <<https://repositorio.ifg.edu.br/handle/123456789/3949>> . Acesso em: 18 nov. 2025.

PEREIRA, S. S.; COSTA, A. N. **Inovações na Engenharia Civil: uma análise das novas tendências em materiais de construção**. Caderno de Pesquisa, v. 31, n. 1, p. 1–15, 2024.

Disponível em: <<https://periodicos.unifacex.com.br/cadernodepesquisa/article/view/3425>> . Acesso em: 18 nov. 2025.

RACHADEL, G. **Análise comparativa entre softwares de cálculo estrutural**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do

Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1727>> . Acesso em: 18 nov. 2025.

SANTOS, A. M. A. **Aplicações de métodos da análise limite para pré-dimensionamento de vigas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em:

<<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/214230>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

SILVA, J. M. **Dimensionamento e análise de estabilidade de estrutura em concreto armado para edifício residencial multifamiliar**. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,

2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/248607>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

SILVA, L. A. et al. **Modelagem preditiva de propriedades mecânicas em concretos**

**reforçados com fibra de aço utilizando redes neurais artificiais**. Ambiente Construído, v. 22, n. 2, p. 215-232, 2022. Disponível em:

<<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/112214>> . Acesso em: 20 nov. 2025.

SOARES JR., F. L. dos R. **O estado da arte da aplicação da inteligência artificial (IA) e aprendizagem automática (AA) ao cálculo de estruturas**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil). Universidade do Porto, Porto, 2024. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/158157>> . Acesso em: 15 nov. 2025.

TRENTO, L. F. **Projeto de um edifício de concreto armado: análise estrutural,**

**dimensionamento e detalhamento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em

Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível

em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/51147>> . Acesso em: 18 nov. 2025.

VASCONCELOS, G. M. A. de. **Verificação simultânea dos estados limites últimos e de serviço em análises não-lineares de peças de concreto armado submetidas à flexão pura.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/16021>> . Acesso em: 22 nov. 2025.

## ANEXOS

Anexo 1 – Tabela de Marcus

|           |  |       |       |       |  |       |       |       |  |       |       |       |  |       |       |       |  |       |       |       |  |       |       |  |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--|
|           | Tipo 1                                                                            |       |       |       | Tipo 2                                                                            |       |       |       | Tipo 3                                                                            |       |       |       | Tipo 4                                                                            |       |       |       | Tipo 5                                                                              |       |       |       | Tipo 6                                                                              |       |       |  |
| $\lambda$ | $m_x$                                                                             | $m_y$ | $m_x$ | $m_y$ | $n_x$                                                                             | $m_x$ | $m_y$ | $n_x$ | $n_y$                                                                             | $m_x$ | $m_y$ | $n_x$ | $m_x$                                                                             | $m_y$ | $n_x$ | $m_x$ | $m_y$                                                                               | $n_x$ | $n_y$ | $m_x$ | $m_y$                                                                               | $n_x$ | $n_y$ |  |
| 0.50      |                                                                                   |       | 141   | 45    | 59                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 137                                                                               | 50    | 50    | 146   | 71                                                                                  | 108   | 36    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.52      |                                                                                   |       | 126   | 43    | 52                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 124                                                                               | 48    | 45    | 216   | 68                                                                                  | 94    | 34    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.54      |                                                                                   |       | 113   | 42    | 46                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 112                                                                               | 47    | 40    | 192   | 65                                                                                  | 83    | 32    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.56      |                                                                                   |       | 102   | 40    | 41                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 103                                                                               | 46    | 36    | 171   | 62                                                                                  | 73    | 31    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.58      |                                                                                   |       | 93    | 39    | 36                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 96                                                                                | 45    | 33    | 153   | 59                                                                                  | 65    | 29    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.60      |                                                                                   |       | 85    | 38    | 33                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 88                                                                                | 45    | 31    | 139   | 57                                                                                  | 58    | 28    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.62      |                                                                                   |       | 79    | 37    | 30                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 82                                                                                | 44    | 28    | 126   | 56                                                                                  | 53    | 27    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.64      |                                                                                   |       | 73    | 37    | 27                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 76                                                                                | 44    | 26    | 115   | 54                                                                                  | 48    | 26    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.66      |                                                                                   |       | 68    | 36    | 25                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 71                                                                                | 44    | 25    | 106   | 53                                                                                  | 44    | 25    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.68      |                                                                                   |       | 63    | 35    | 23                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 67                                                                                | 44    | 23    | 98    | 52                                                                                  | 40    | 25    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.70      |                                                                                   |       | 59    | 35    | 21                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 64                                                                                | 44    | 22    | 91    | 51                                                                                  | 37    | 24    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.72      |                                                                                   |       | 56    | 35    | 20                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 60                                                                                | 44    | 21    | 84    | 50                                                                                  | 34    | 24    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.74      |                                                                                   |       | 52    | 35    | 19                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 58                                                                                | 45    | 20    | 79    | 49                                                                                  | 32    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.76      |                                                                                   |       | 50    | 34    | 18                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 55                                                                                | 45    | 19    | 74    | 49                                                                                  | 30    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.78      |                                                                                   |       | 47    | 34    | 17                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 53                                                                                | 46    | 18    | 70    | 49                                                                                  | 28    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.80      |                                                                                   |       | 45    | 34    | 16                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 50                                                                                | 46    | 18    | 66    | 48                                                                                  | 27    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.82      |                                                                                   |       | 43    | 34    | 15                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 49                                                                                | 47    | 17    | 63    | 48                                                                                  | 25    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.84      |                                                                                   |       | 41    | 34    | 14                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 47                                                                                | 48    | 17    | 60    | 48                                                                                  | 24    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.86      |                                                                                   |       | 39    | 35    | 14                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 45                                                                                | 48    | 16    | 57    | 48                                                                                  | 23    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.88      |                                                                                   |       | 37    | 35    | 13                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 44                                                                                | 49    | 16    | 55    | 48                                                                                  | 22    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.90      |                                                                                   |       | 36    | 35    | 13                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 42                                                                                | 50    | 16    | 53    | 49                                                                                  | 21    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.92      |                                                                                   |       | 34    | 35    | 12                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 41                                                                                | 51    | 15    | 51    | 49                                                                                  | 20    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.94      |                                                                                   |       | 33    | 36    | 12                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 40                                                                                | 52    | 15    | 49    | 49                                                                                  | 20    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.96      |                                                                                   |       | 32    | 36    | 12                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 39                                                                                | 53    | 15    | 47    | 50                                                                                  | 19    | 23    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 0.98      |                                                                                   |       | 31    | 36    | 11                                                                                |       |       |       |                                                                                   |       |       |       | 38                                                                                | 55    | 15    | 46    | 50                                                                                  | 19    | 24    |       |                                                                                     |       |       |  |
| 1.00      | 27                                                                                | 27    | 30    | 37    | 11                                                                                | 37    | 37    | 16    | 16                                                                                | 37    | 56    | 14    | 44                                                                                | 51    | 18    | 24    | 56                                                                                  | 56    | 24    | 24    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.02      | 26                                                                                | 27    | 29    | 37    | 11                                                                                | 36    | 37    | 15    | 16                                                                                | 37    | 57    | 14    | 43                                                                                | 51    | 18    | 24    | 54                                                                                  | 56    | 23    | 24    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.04      | 25                                                                                | 27    | 28    | 38    | 11                                                                                | 34    | 37    | 15    | 16                                                                                | 36    | 58    | 14    | 42                                                                                | 52    | 17    | 25    | 52                                                                                  | 56    | 22    | 24    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.06      | 24                                                                                | 27    | 27    | 38    | 11                                                                                | 33    | 37    | 14    | 16                                                                                | 35    | 60    | 14    | 41                                                                                | 52    | 17    | 25    | 50                                                                                  | 56    | 22    | 24    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.08      | 24                                                                                | 27    | 27    | 39    | 10                                                                                | 32    | 37    | 14    | 16                                                                                | 35    | 61    | 14    | 40                                                                                | 53    | 16    | 26    | 48                                                                                  | 56    | 21    | 24    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.10      | 23                                                                                | 27    | 26    | 39    | 10                                                                                | 31    | 38    | 13    | 16                                                                                | 34    | 63    | 14    | 39                                                                                | 54    | 16    | 26    | 47                                                                                  | 57    | 20    | 24    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.12      | 22                                                                                | 27    | 25    | 40    | 10                                                                                | 30    | 38    | 13    | 16                                                                                | 34    | 64    | 14    | 38                                                                                | 55    | 16    | 26    | 45                                                                                  | 57    | 20    | 25    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.14      | 21                                                                                | 27    | 25    | 41    | 10                                                                                | 29    | 38    | 13    | 17                                                                                | 33    | 66    | 13    | 37                                                                                | 56    | 16    | 27    | 44                                                                                  | 57    | 19    | 25    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.16      | 21                                                                                | 27    | 24    | 41    | 10                                                                                | 28    | 38    | 12    | 17                                                                                | 33    | 67    | 13    | 37                                                                                | 57    | 15    | 27    | 43                                                                                  | 58    | 19    | 25    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.18      | 20                                                                                | 27    | 24    | 42    | 10                                                                                | 28    | 39    | 12    | 17                                                                                | 32    | 69    | 13    | 36                                                                                | 58    | 15    | 28    | 42                                                                                  | 58    | 18    | 25    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.20      | 19                                                                                | 27    | 23    | 43    | 10                                                                                | 27    | 39    | 12    | 17                                                                                | 32    | 71    | 13    | 35                                                                                | 59    | 15    | 29    | 41                                                                                  | 59    | 18    | 26    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.22      | 19                                                                                | 27    | 23    | 43    | 9                                                                                 | 26    | 39    | 12    | 17                                                                                | 32    | 72    | 13    | 35                                                                                | 60    | 15    | 29    | 40                                                                                  | 59    | 17    | 26    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.24      | 18                                                                                | 27    | 22    | 44    | 9                                                                                 | 26    | 40    | 11    | 18                                                                                | 31    | 74    | 13    | 34                                                                                | 61    | 15    | 30    | 39                                                                                  | 60    | 17    | 26    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.26      | 18                                                                                | 27    | 22    | 45    | 9                                                                                 | 25    | 40    | 11    | 18                                                                                | 31    | 76    | 13    | 34                                                                                | 62    | 14    | 30    | 38                                                                                  | 61    | 17    | 27    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.28      | 17                                                                                | 29    | 22    | 46    | 9                                                                                 | 25    | 40    | 11    | 18                                                                                | 31    | 78    | 13    | 33                                                                                | 63    | 14    | 31    | 38                                                                                  | 62    | 16    | 27    |                                                                                     |       |       |  |
| 1.30      | 17                                                                                | 29    | 21    | 47    | 9                                                                                 | 24    | 41    | 11    | 18                                                                                | 30    | 80    | 13    | 33                                                                                | 64    | 14    | 32    | 37                                                                                  | 62    | 16    | 27    |                                                                                     |       |       |  |