

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

USO DO BIM EM PROJETOS GEOTÉCNICOS DE FUNDAÇÕES DIRETAS

GABRIEL GALIL TOLEDO

JUIZ DE FORA

2024

# USO DO BIM EM PROJETOS GEOTÉCNICOS DE FUNDAÇÕES DIRETAS

GABRIEL GALIL TOLEDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Geotecnia

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

JUIZ DE FORA

2024

# USO DO BIM EM PROJETOS GEOTÉCNICOS DE FUNDAÇÕES DIRETAS

GABRIEL GALIL TOLEDO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução N° 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 04/10/2024.

Por:

---

Prof. D.Sc. Heraldo Nunes Pitanga (Orientador)

Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Profa. D.Sc. Juliane Cristina Gonçalves (Examinadora 01)

Universidade Federal de Juiz de Fora

---

M.Sc Vinícius Martins Galil (Examinador 02)

Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus e a toda a espiritualidade por estarem sempre ao meu lado, guiando-me em todos os momentos da minha vida. Agradeço também aos meus pais, Alírio e Kátia, que são minha base e inspiração, assim como às minhas irmãs, Jamille e Isabella, sem as quais eu não seria nada, e aos meus cunhados, que serviram de exemplo ao longo de toda a minha jornada. Aos grandes amigos que estiveram ao meu lado em todos os momentos, compartilhando as emoções de ser graduando em engenharia, bem como àqueles que, mesmo à distância, me auxiliaram a chegar até aqui. Sou grato também aos professores, que contribuíram para que eu me tornasse o profissional que sou hoje. À minha tia e minha avó, que já partiram, mas deixaram saudades e foram essenciais para a minha formação. Por fim, agradeço à minha ex-professora de geografia (*in memoriam*), que, ainda que indiretamente, me apresentou à geotecnia, e me influenciou a seguir essa área tão apaixonante. A engenharia foi mais leve com a presença de todos vocês. Muito obrigado!

## RESUMO

A crescente necessidade de implementação do *Building Information Modeling* (BIM) nos projetos e execuções de empreendimentos no Brasil justifica-se pela economia de tempo e recursos financeiros, quando comparado a sistemas tradicionais. Para fomentar o uso do BIM, o governo federal instituiu o Decreto 10.306, que estabelece a obrigatoriedade de sua utilização e define prazos para sua implementação. Nesse contexto, torna-se relevante o estudo contínuo desse sistema, com vistas à sua aplicação em um futuro próximo. O presente trabalho desenvolveu uma família parametrizada no sistema BIM com o objetivo de realizar o pré-dimensionamento de uma sapata de concreto armado de carga centrada, permitindo ao usuário realizar iterações nas dimensões da fundação e obter resultados automatizados das análises de verificação ao cisalhamento, ancoragem e tensão na base, além do cálculo da altura da fundação. Para alcançar esses objetivos, foi inicialmente realizada uma revisão bibliográfica, com foco na interseção entre os temas de BIM e geotecnia. Em seguida, modelou-se um empreendimento residencial unifamiliar de dois pavimentos inteiramente mobiliado, utilizando o software Revit 2023 da Autodesk, com a arquitetura compatibilizada com o modelo estrutural. Essa compatibilização possibilitou um estudo realista das cargas aproximadas em cada pilar, o que serviu de base para o dimensionamento das sapatas. Adicionalmente, desenvolveu-se uma planilha eletrônica no Excel, capaz de reunir todas as informações necessárias para o pré-dimensionamento das fundações. Ao final dos cálculos, a planilha retorna uma área de impressão com um compilado das informações sobre a sapata em questão, incluindo as verificações e dimensões múltiplas de 5cm para facilitar a execução. Por fim, foi desenvolvida uma família de sapata de concreto armado no mesmo software de modelagem, a qual realiza os mesmos cálculos da planilha Excel, com o intuito de simplificar os processos de cálculo em projetos futuros. Dessa forma, foi possível realizar uma comparação entre os métodos tradicionais de cálculo, baseados na planilha Excel, e o uso do BIM. Conclui-se que, apesar das limitações relacionadas ao cálculo que usa as informações de sondagem, a família desenvolvida demonstrou-se eficiente para o seu propósito, representando um avanço tecnológico significativo para a engenharia civil.

**PALAVRAS-CHAVE:** BIM; fundações diretas; sapata de concreto armado; compatibilização de projetos.

## **ABSTRACT**

The growing need for the implementation of Building Information Modeling (BIM) in the design and execution of projects in Brazil is justified by the savings in time and financial resources when compared to traditional systems. To promote the use of BIM, the federal government issued Decree 10.306, which establishes the mandatory use of BIM and defines deadlines for its implementation. In this context, continuous study of this system becomes relevant, with a view to its application in the near future. The present work developed a parametric family in the BIM system with the aim of carrying out the preliminary design of a centrally loaded reinforced concrete footing, allowing the user to make iterations in the foundation dimensions and obtain automated results from verification analyses for shear, anchorage, and base stress, in addition to calculating the foundation height. To achieve these objectives, a literature review was initially conducted, focusing on the intersection between BIM and geotechnics. Then, a two-story single-family residential building, fully furnished, was modeled using Autodesk's Revit 2023 software, with the architecture integrated with the structural model. This integration allowed for a realistic study of the approximate loads on each column, which served as the basis for the footing design. Additionally, a spreadsheet in Excel was developed, capable of gathering all the necessary information for the foundation's preliminary design. At the end of the calculations, the spreadsheet generates a print area with a compilation of information about the footing in question, including verifications and dimensions in multiples of 5 cm to facilitate execution. Finally, a reinforced concrete footing family was developed in the same modeling software, which performs the same calculations as the Excel spreadsheet, aiming to simplify the calculation processes in future projects. In this way, it was possible to compare traditional calculation methods, based on the Excel spreadsheet, with the use of BIM. It was concluded that, despite the limitations related to the calculation using survey data, the developed family proved to be efficient for its purpose, representing a significant technological advance for civil engineering.

**KEYWORDS:** BIM; shallow foundations; reinforced concrete footing; project coordination.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Planta do primeiro pavimento do empreendimento .....  | 24 |
| Figura 2 - Planta do segundo pavimento do empreendimento .....   | 25 |
| Figura 3 - Vista 3D do projeto arquitetônico do empreendimento .....   | 26 |
| Figura 4 - Detalhe interno do escritório .....   | 27 |
| Figura 5 - Localização e enumeração dos pilares do primeiro pavimento .....  | 28 |
| Figura 6 - Localização e enumeração dos pilares do segundo pavimento .....   | 29 |
| Figura 7 - Vista isométrica da modelagem estrutural do empreendimento .....  | 30 |
| Figura 8 - Escritório com incompatibilidade entre arquitetura e estrutura .....  | 30 |
| Figura 9 - Áreas de influência dos pilares do primeiro pavimento .....   | 31 |
| Figura 10 - Áreas de influência dos pilares do segundo pavimento .....   | 32 |
| Figura 11 - Região preenchida do pilar P04 com sua respectiva metragem quadrada destacada .....                            | 34 |
| Figura 12 - Aba da planilha Excel destinada à coleta de informações .....  | 35 |
| Figura 13 - Representação das informações na aba de cálculo da planilha eletrônica .....                                   | 38 |
| Figura 14 - Reprodução da sondagem .....   | 41 |
| Figura 15 - Cálculo dos Fatores de Capacidade de Carga, Fatores de Forma, Fatores de Profundidade e Influência do NA ..... | 45 |
| Figura 16 - Dimensionamento estrutural .....   | 48 |
| Figura 17 - Área de impressão da Planilha Eletrônica .....   | 49 |
| Figura 18 - Compilado dos resultados dos cálculos .....  | 50 |
| Figura 19 - Família de sapata modelada .....   | 50 |
| Figura 20 - Parâmetros de instância relativos às dimensões da sapata .....   | 51 |
| Figura 21 - Demonstração das formas e dimensões possíveis com a parametrização das dimensões da sapata .....               | 51 |
| Figura 22 - Escolha da Disciplina do parâmetro .....   | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 23 - Escolha do tipo de parâmetro .....   | 53 |
| Figura 24 - Grupo Estrutural .....   | 54 |
| Figura 25 - Grupo Análise Estrutural .....   | 55 |
| Figura 26 - Grupo Resultados da Análise .....  | 55 |
| Figura 27 - Grupo Dados e Outros .....   | 55 |
| Figura 28 - Dica de Ferramenta do parâmetro “Possui gancho” .....                          | 56 |
| Figura 29 - Dica de Ferramenta do parâmetro “Zona” .....                                   | 56 |
| Figura 30 - Modelagem estrutural finalizada .....  | 57 |
| Figura 31 - Modelagem do empreendimento completo na vista de<br>Coordenação .....          | 57 |
| <br>   |    |
| Gráfico 1 - Representação do comportamento da resistência do solo pelo método<br>SPT ..... | 42 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores de $\mu_1$ , $\mu_2$ e $\mu_3$ .....                              | 36 |
| Tabela 2 - Tabela dos estados de compacidade e de consistência .....                 | 39 |
| Tabela 3 - Peso Específico do Solo em seu estado natural .....                       | 40 |
| Tabela 4 - Influência do NA na estimativa da Tensão de Ruptura .....                 | 45 |
| Tabela 5 - Fundações rasas - Fatores de segurança e coeficientes de ponderação ..... | 46 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEC: Arquitetura, Engenharia e Construção

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

BIM: *Building Information Modeling*

C.A.: Cota de Assentamento

NBR: Norma Brasileira

NA: Nível d'água

SPT: *Standard Penetration Test*

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                               | <b>10</b> |
| <b>1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICATIVA .....</b> | <b>10</b> |
| <b>1.2. OBJETIVOS .....</b>                              | <b>11</b> |
| <b>1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>                  | <b>12</b> |
| <b>2. METODOLOGIA.....</b>                               | <b>13</b> |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                    | <b>16</b> |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                  | <b>23</b> |
| <b>4.1. PROJETO BASE .....</b>                           | <b>23</b> |
| 4.1.1. PROJETO ARQUITETÔNICO .....                       | 23        |
| 4.1.2. MODELAGEM ESTRUTURAL E COMPATIBILIZAÇÃO .....     | 27        |
| <b>4.2. PLANILHA ELETRÔNICA DE DIMENSIONAMENTO .....</b> | <b>34</b> |
| <b>4.3. FAMÍLIA BIM PARAMETRIZADA.....</b>               | <b>50</b> |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....</b>          | <b>58</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                 | <b>60</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICATIVA

O termo *Building Information Modeling* (Modelagem da Informação na Construção) é, segundo Sacks *et al.* (2021, pg. 14), “uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção”.

Assim, os profissionais modernos da área de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) utilizam dessa tecnologia, uma vez que os produtos oriundos desse sistema auxiliam nas etapas de vida de um empreendimento, desde o projeto até a operação (Sacks *et al.*, 2021, pg. 01). São caracterizados por serem componentes manipuláveis de forma inteligente através de informações paramétricas consistentes e não redundantes aplicáveis em software BIM, tais como quantificação, especificação e análise energética, de modo a descrever seu comportamento na realidade sob ação das condições impostas (Sacks *et al.*, 2021, pg. 14). Esses modelos são chamados de “famílias” para aplicação nos softwares BIM.

Além disso, a tecnologia estudada também versa sobre a Interoperabilidade, ferramenta que possibilita a troca de informações entre profissionais do Setor AEC de forma mais rápida e precisa. Segundo Gallaher *et al.* (2004, pg. 6-1), em 2002, nos Estados Unidos, a ineficiência da Interoperabilidade custou aos cofres norte-americanos uma quantia de 15,8 bilhões de dólares, o que corresponde a 2,86% do valor total destinado ao Setor de Construção estadunidense.

À luz do exposto anteriormente sobre os conceitos de *Building Information Modeling* (BIM), o Governo Brasileiro, por meio do Decreto 10.306 (Brasil, 2020), datado de 02 de abril de 2020, deliberou que a implementação do BIM seguirá uma abordagem progressiva, alinhada às fases pré estabelecidas da Estratégia BIM BR. Esta estratégia, por sua vez, desdobra-se em três etapas distintas (Brasil, 2020):

I - Na primeira fase, a partir de 1º de janeiro de 2021, o BIM deverá ser empregado no desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia, relacionados a construções novas, ampliações ou reabilitações, quando consideradas de significativa relevância para a disseminação do BIM.

II - Na segunda fase, a partir de 1º de janeiro de 2024, o BIM deve ser empregado na execução direta ou indireta de projetos de arquitetura e engenharia, bem como na gestão de obras, referentes a construções novas, reformas, ampliações ou reabilitações, consideradas de expressiva relevância para a disseminação do BIM.

III - Na terceira fase, a partir de 1º de janeiro de 2028, o BIM deverá ser utilizado no desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia, assim como na gestão de obras referentes a construções novas, reformas, ampliações e reabilitações, consideradas de média ou grande relevância para a disseminação do BIM.

Conforme delineado no documento exposto por MDIC (2018), a Modelagem da Informação na Construção apresenta-se como uma ferramenta eficaz na mitigação de erros de compatibilização entre projetos de distintas áreas, tais como estrutural, hidrossanitária e elétrica. Além disso, a aplicação do BIM demonstra impactos positivos ao reduzir os custos e riscos associados ao empreendimento, ao mesmo tempo em que contribui para o aprimoramento da precisão, confiabilidade e produtividade dos projetos.

Dessa forma, com a utilização do BIM em projetos de engenharia, ressalta-se de maneira notória a importância do estudo da aplicação desse sistema nesse contexto, especialmente considerando que o próprio Decreto 10.306 (Brasil, 2020) regulamenta "a elaboração dos modelos de arquitetura e dos modelos de engenharia referentes às disciplinas de estruturas". Portanto, esse trabalho abordará o uso da tecnologia da Modelagem da Informação na Construção em projetos geotécnicos de fundações superficiais, de modo a otimizar o processo projetual de uma edificação.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo global deste trabalho é avaliar o uso da modelagem paramétrica em *Building Information Modeling* (BIM) em projeto geotécnico de sapata de concreto armado quanto à precisão e à rapidez de projeto. Os objetivos específicos são:

1. Conduzir uma revisão bibliográfica abrangente que amplie o entendimento acerca da implementação do *Building Information Modeling* (BIM) em projetos geotécnicos de fundações, explorando sua aplicação em contextos práticos por meio da análise de projetos já executados;
2. Produzir um Modelo BIM (“família”) paramétrico do elemento de fundação em estudo que realize um pré dimensionamento de acordo com as informações fornecidas;
3. Comparar os resultados do método de dimensionamento realizado pelo Modelo BIM e o método de cálculo mecânico utilizando uma planilha Excel.

### **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está dividido em seis partes distintas: Introdução, Metodologia, Revisão Bibliográfica, Resultados e Discussões, Considerações Finais e Referências.

A Introdução apresenta considerações iniciais sobre o tema principal da pesquisa e justifica o trabalho com base na necessidade de maior aplicação do BIM, conforme o Decreto 10.306 (Brasil, 2020). Também aborda os objetivos e a estrutura na qual o trabalho foi organizado.

Após, é apresentada a metodologia, que aborda os principais tópicos do trabalho e os descreve, de modo a apresentar quais foram os procedimentos utilizados em cada um deles.

Em seguida, a Revisão Bibliográfica fornece informações detalhadas sobre os temas abordados, orientando o leitor e auxiliando no entendimento de termos específicos.

Posteriormente, são apresentados os Resultados, onde são detalhados o projeto compatibilizado, a planilha eletrônica e a família BIM paramétrica modelada. Imagens são incluídas para melhor visualização, acompanhadas de Discussões pertinentes a cada um dos produtos.

A quinta parte trata das Considerações Finais, que resumem as informações analisadas na pesquisa e comparam os métodos de cálculo. Por fim, encontram-se as Referências utilizadas na elaboração deste trabalho.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho está dividida em três partes distintas: a Revisão Bibliográfica, o dimensionamento de um empreendimento residencial e a confecção de uma família BIM parametrizada.

Inicialmente, a revisão bibliográfica foi realizada utilizando as plataformas Google Scholar e Scielo. Posteriormente, foi consultado o livro impresso "Manual de BIM: um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores" (Sacks et al., 2021), 3ª Edição, que desempenhou um papel fundamental no aprofundamento dos conceitos relacionados ao BIM.

A segunda etapa da metodologia deste estudo envolveu o projeto de um empreendimento residencial unifamiliar de dois pavimentos. Foi projetada uma residência unifamiliar de dois pavimentos, com área total construída de 372,25 m<sup>2</sup>. A estrutura é inteiramente construída em concreto armado, com um volume total de 74,9 m<sup>3</sup> de concreto, distribuído em vigas de 20 x 60 cm, pilares de 20 x 30 cm e lajes com 10 cm de espessura. As paredes são construídas com lajotas cerâmicas de alvenaria de vedação, que definem os seguintes ambientes: sala de estar, sala de jantar, cozinha, lavanderia, lavabo, banheiro, suíte, dois quartos, escritório, closet, garagem, duas varandas e área externa. A cobertura da residência é composta por telhas cerâmicas com uma inclinação de 30°, sem a inclusão de calhas.

Inicialmente, diversas questões precisaram ser resolvidas. Primeiramente, realizou-se a concepção preliminar do projeto arquitetônico e sua modelagem correspondente utilizando o software BIM da Autodesk, o Revit 2023 em português BR. Foram empregadas tanto as famílias disponibilizadas pela empresa desenvolvedora quanto modelagens próprias. Subseqüentemente, desenvolveu-se a modelagem estrutural, com um pré-dimensionamento simplificado dos elementos de concreto armado não integrantes da fundação, tais como vigas, pilares e lajes. Na seqüência, procedeu-se à compatibilização utilizando o próprio software Revit 2023 para identificar possíveis interferências entre os elementos arquitetônicos e estruturais. Conseqüentemente, ajustaram-se as posições de algumas portas e janelas no projeto, corroborando a vantagem do BIM em proporcionar uma noção espacial aprimorada do empreendimento e prevenir erros durante a execução.

Na continuidade do dimensionamento das fundações, obteve-se um relatório de Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT) de Gonçalves (2010), referente ao solo de um terreno localizado no bairro Recreio dos Bandeirantes, no Rio de Janeiro. Este terreno apresentava uma espessa camada de areia, e os parâmetros de resistência à penetração do amostrador à percussão, expressos pelo número NSPT de cada metro de solo, foram obtidos, sendo essas informações cruciais para o dimensionamento das fundações.

Posteriormente, elaborou-se uma planilha no Microsoft Excel com o objetivo de dimensionar as fundações superficiais de qualquer empreendimento. De posse da planilha e do documento de sondagem SPT, dimensionaram-se as fundações. Para definição das solicitações em cada pilar, dimensões foram mensuradas e as áreas de influência dos pilares foram delimitadas e identificadas, destacando mais uma vez a praticidade do BIM. Com as áreas de influência determinadas, o software Revit 2023 fornece automaticamente a metragem quadrada correspondente.

Finalmente, estas informações foram inseridas na planilha digital e aplicadas a cada fundação, resultando em uma tabela resumo com as dimensões de cada elemento estudado.

A terceira e última etapa do processo metodológico deste estudo consistiu na confecção de uma família BIM parametrizada, visando o pré-dimensionamento de sua geometria com base nas informações fornecidas pelo usuário. Inicialmente, modelou-se uma família básica sem parâmetros de fundação direta. Em seguida, inseriram-se Parâmetros de Tipo no elemento de fundação, permitindo a alteração de sua geometria conforme os comandos do usuário. Subsequentemente, criaram-se Parâmetros de Tipo destinados a armazenar informações referentes ao elemento de fundação estudado, além de realizar os cálculos necessários para o pré-dimensionamento do elemento, com atenção especial às unidades de medida, uma vez que o software Revit 2023 manipula unidades, não apenas números, diferentemente do Microsoft Excel.

Os parâmetros de cálculo foram associados aos de geometria, vinculando operações matemáticas às dimensões da estrutura. Durante o processo, enfrentaram-se diversos desafios, como a complexidade na definição de parâmetros e a necessidade de garantir a coerência das unidades de medida. Assim, soluções foram

implementadas para superar esses desafios, como a combinação de fórmulas, embora algumas limitações ainda tenham sido identificadas.

A sapata foi configurada para receber informações inseridas pelo usuário e realizar cálculos de dimensionamento estrutural, bem como verificações quanto à tensão na base, ancoragem e cisalhamento, e testes foram conduzidos com base em dimensionamentos preexistentes para verificar a coerência dos cálculos com a realidade. Após essa validação, a família foi aplicada no modelo compatibilizado. Realizados os cálculos, as dimensões obtidas foram comparadas com aquelas derivadas da planilha eletrônica, mostrando um alto grau de concordância e destacando a eficiência do processo desenvolvido. Finalmente, plotaram-se pranchas técnicas, visando uma melhor visualização tanto pelo usuário quanto pelo executor.

Assim, este estudo permitiu uma análise detalhada e precisa do comportamento estrutural da sapata e das demais componentes da construção, assegurando a conformidade com as normas NBR 6122 (ABNT, 2022) e NBR 6118 (ABNT, 2023) e proporcionando segurança e durabilidade ao empreendimento. A modelagem no software Revit 2023 facilita a visualização e ajustes necessários durante o processo de projeto e execução, promovendo eficiência e qualidade na construção.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A interoperabilidade e a integração entre diferentes sistemas são fundamentais para a eficiência e eficácia na indústria da construção. Pauwels, Zhang e Lee (2017) destacam a importância das tecnologias semânticas nesse contexto, pois elas facilitam a comunicação entre sistemas de software distintos, permitindo que compreendam e utilizem dados de forma mais eficaz. Essas tecnologias também dialogam diretamente com as diretrizes estabelecidas pela Parte 2 da NBR 15965 (ABNT, 2012), que trata das Características dos Objetos da construção. A classificação e a padronização das características dos objetos são fundamentais para a interoperabilidade entre diferentes softwares, como indicado na norma, pois possibilitam a troca de informações de maneira clara e precisa ao longo das fases do projeto. Esse alinhamento é essencial para garantir que os sistemas compreendam as características e propriedades dos objetos de forma homogênea, elevando a produtividade dos processos construtivos ao evitar falhas de comunicação entre as partes envolvidas (ABNT, 2012).

Além disso, Succar (2009) apresenta um *framework* para o *Building Information Modeling* (BIM), que oferece uma estrutura fundamental para a pesquisa e a entrega de projetos. Este *framework* define as práticas, normas e diretrizes necessárias para a implementação eficaz do BIM, facilitando a coordenação entre diferentes disciplinas e fases do projeto. A integração do BIM com outros sistemas e processos não só melhora a gestão dos projetos, mas também promove uma abordagem mais coesa e eficiente ao alinhar dados e processos ao longo de todo o ciclo de vida do projeto.

No entanto, a falta de interoperabilidade continua sendo um desafio crítico no setor da construção, afetando a eficiência e os custos dos projetos. Gallaher et al. (2004, pg. ES-2) destacam que a interoperabilidade inadequada leva a custos elevados e ineficiências significativas. Em um cenário ideal, a troca de dados eletrônicos ocorre sem obstáculos, permitindo que as informações sejam inseridas uma única vez e estejam instantaneamente acessíveis a todos os envolvidos. No entanto, a realidade é bem diferente, e a necessidade de reinserção manual de dados devido à falta de interoperabilidade resulta em custos adicionais. Nos Estados Unidos, no início dos anos 2000, esses custos chegaram a aproximadamente 491 milhões de dólares, atribuídos à tradução e transferência de arquivos entre softwares

incompatíveis e ao uso combinado de arquivos em papel e eletrônicos. Esses fatores aumentam o tempo e o esforço necessários para completar os projetos, prejudicando a eficiência e elevando os custos (Gallaher et al., 2004, pg. 6-6).

Para enfrentar essas ineficiências, a adoção do *Building Information Modeling* (BIM) surge como uma solução eficaz. O BIM oferece uma abordagem inovadora para a gestão de informações ao reduzir a necessidade de reinserção manual de dados e melhorar a interoperabilidade entre sistemas. Com o BIM, é possível automatizar a troca de informações e promover uma colaboração mais eficiente entre todas as partes envolvidas no projeto. Isso não apenas elimina custos redundantes e processos manuais, mas também resulta em maior eficiência e economia para os projetos de construção. A capacidade do BIM de reduzir cronogramas de projeto em até 10% demonstra seu impacto positivo na gestão e execução de projetos (Gallaher et al., 2004, pg. 6-6).

Para compreender o impacto do BIM de maneira mais profunda, é essencial definir o que exatamente essa tecnologia representa. O BIM é um processo abrangente que inclui todas as etapas do ciclo de vida de um projeto: planejamento, projeto, construção, operação e manutenção. Utilizando um modelo de informações padronizado e legível por máquinas, o BIM contém todas as informações relevantes sobre a construção, acessíveis ao longo de todo o ciclo de vida do projeto (NIBS, 2008). Os modelos BIM consistem em objetos digitais com atributos gráficos e dados computáveis, permitindo uma manipulação inteligente por meio de regras paramétricas. Estes atributos não apenas facilitam análises e processos, como quantificação e análise energética, mas também asseguram a consistência e atualização dos dados em todas as visualizações e conjuntos relacionados, promovendo uma gestão mais precisa e eficaz das informações do projeto (Sacks et al., 2021, pg. 14).

Além disso, a evolução do BIM pode ser entendida através dos níveis de maturidade, que refletem o grau de colaboração e sofisticação das ferramentas utilizadas. A Força-Tarefa do BIM do Reino Unido introduziu os "Níveis de BIM", que definem quatro estágios amplamente aceitos: Nível 0, que utiliza métodos tradicionais e modelos 2D; Nível 1, com um uso limitado do BIM e informações básicas; Nível 2, onde o BIM é utilizado de forma mais integrada e o modelo contém informações

adequadas para aplicações específicas; Nível 3, caracterizado por um uso mais extenso e sofisticado do BIM; e Nível 4, que representa a adoção total do BIM com o uso das melhores ferramentas disponíveis (Rojas *et al.*, 2019; Sacks *et al.*, 2021, pg. 15). Esses níveis oferecem um panorama detalhado da evolução do BIM e do potencial da tecnologia para transformar a construção civil, mostrando como a aplicação do BIM pode se aprofundar e se sofisticar ao longo do tempo.

Desde sua transformação de um conceito acadêmico para uma solução comercialmente viável no início da década de 2000, o BIM tem se mostrado tão fundamental quanto ferramentas tradicionais, como a régua T, o martelo e o prego. No entanto, a implementação do BIM enfrenta desafios significativos, exigindo uma mudança de paradigmas do desenho tradicional para a modelagem digital, contrastando com a evolução gradual do CAD (Sacks *et al.*, 2021, pg. 370). O BIM é reconhecido por sua capacidade de revolucionar práticas ineficientes e intensivas em trabalho, provocando impactos substanciais no setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) e influenciando todos os envolvidos, desde projetistas até proprietários (Laiserin, 2008; Sacks *et al.*, 2021, pg. 370).

Para superar as limitações iniciais enfrentadas pelo BIM, a personalização das famílias de componentes pelo usuário se torna uma prática essencial. Essa necessidade decorre da ausência de certos componentes em softwares ou catálogos fornecidos pelos fabricantes, bem como das práticas de modelagem específicas da empresa e dos requisitos particulares dos projetos (Sacks *et al.*, 2021). O Revit, por exemplo, utiliza parâmetros para definir e ajustar esses componentes, incluindo parâmetros compartilhados e de projeto. Parâmetros compartilhados podem ser usados em várias famílias ou projetos e se dividem em parâmetros de tipo e de instância. Por outro lado, parâmetros de projeto são específicos para cada projeto e não podem ser compartilhados entre projetos diferentes (Autodesk, 2024).

A modelagem geotécnica no ambiente BIM é fundamental para a integração de dados, como sondagens e propriedades do solo, com modelos tridimensionais do empreendimento. Essa integração aprimora a precisão e permite a visualização minuciosa das interações solo-estrutura, além de facilitar a coordenação entre diferentes disciplinas. A aplicação do BIM em projetos geotécnicos de fundações diretas possibilita a simulação de cenários e a avaliação de impactos, contribuindo

para decisões mais embasadas durante o projeto (Zhang; Arayici, 2013). A Modelagem de Informações Geotécnicas (GIM) busca otimizar a exatidão e a gestão dos aspectos geotécnicos ao longo do ciclo de vida, promovendo uma comunicação mais eficiente e uma coordenação aprimorada entre os envolvidos (Sun; Wang; Wang, 2017a, 2017b; Elsharafi; Shrestha; Hegde, 2019a, 2019b). A combinação de ambos os modelos resulta em uma análise mais detalhada da interação solo-estrutura, fornecendo dados mais precisos para o desenvolvimento de projetos da área de estudo (Zhou; Liu; Zhang, 2018a, 2018b; Cai; Yang, 2020a, 2020b).

No entanto, a aplicação do BIM em projetos geotécnicos ainda enfrenta desafios significativos, como evidenciado por Barlish e Sullivan (2012). Eles identificam dificuldades relacionadas à integração de dados e à precisão das informações, que podem impactar a eficácia do BIM na modelagem e análise de aspectos geotécnicos. Olatunji, Sher e Gu (2010) complementam esses desafios ao destacar que, apesar das promessas do BIM para melhorar a precisão e a eficiência, a adoção em projetos geotécnicos é dificultada por questões como a integração de diferentes tipos de dados e a adequação das ferramentas BIM existentes para lidar com especificidades geotécnicas. Esses insights indicam a necessidade de um desenvolvimento contínuo das ferramentas BIM para superar as limitações atuais e maximizar seus benefícios em projetos geotécnicos.

A aplicação do *Building Information Modeling* (BIM) no projeto de fundações superficiais representa um avanço significativo na engenharia geotécnica, permitindo a integração eficiente de dados de diversas disciplinas, o que melhora a precisão, a coordenação e a visualização dos projetos. No entanto, a implementação bem-sucedida do BIM depende da aderência às normas técnicas específicas, como a NBR 6122 (ABNT, 2022), que regula o projeto e a execução de fundações, e a NBR 6118 (ABNT, 2023), que estabelece procedimentos para o projeto de estruturas de concreto.

Em primeiro lugar, para a elaboração de um projeto de fundação adequado, é crucial entender as definições e classificações das fundações superficiais. Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2022), uma fundação rasa (direta ou superficial) é um elemento cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Este tipo de fundação, que inclui, por exemplo, sapatas, blocos, vigas

de fundação e radiers, é amplamente utilizado em projetos onde as camadas superficiais do solo apresentam resistência adequada para suportar as cargas estruturais.

A importância da investigação geotécnica preliminar é destacada pela norma NBR 6122 (ABNT, 2022). A norma prescreve que qualquer edificação deve passar por uma investigação geotécnica preliminar, que inclui sondagens à percussão (com SPT) para determinar a estratigrafia e a classificação dos solos, a posição do nível d'água e o índice de resistência à penetração NSPT, conforme a NBR 6484 (ABNT, 2020). Esta investigação é essencial para garantir que as fundações sejam projetadas com base em dados adquiridos do solo através de ensaios.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) fornece orientações detalhadas para o projeto de fundações de concreto, estabelecendo que os projetos devem considerar os estados limites últimos e de serviço. Estes critérios garantem que as fundações resistam às cargas máximas esperadas sem comprometer a segurança ou a durabilidade da estrutura. No contexto do BIM, esses princípios são integrados ao modelo, permitindo a verificação contínua da conformidade com os requisitos normativos desde as etapas iniciais do projeto.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023, p. 3), o concreto estrutural refere-se ao uso complexo do concreto como material estrutural, enquanto os elementos de concreto armado dependem da aderência entre o concreto e a armadura. Este documento normativo exige que os estados limites sejam verificados para assegurar a segurança, funcionalidade e durabilidade da estrutura ao longo de sua vida útil.

Os conceitos de estado-limite último (ELU), estado-limite de formação de fissuras (ELS-F), estado-limite de abertura das fissuras (ELS-W) e estado-limite de deformações excessivas (ELS-DEF) (ABNT, 2023, pg. 4) são essenciais para avaliar a segurança estrutural, garantindo que as fundações não sofram colapso, fissuração excessiva ou deformações que comprometam sua utilização normal.

A ancoragem das armaduras também é um aspecto crítico, conforme indicado pela NBR 6118 (ABNT, 2023). A norma exige que todas as barras das armaduras sejam ancoradas de forma a transmitir integralmente as forças ao concreto, podendo

utilizar a ancoragem por aderência ou combinações de métodos (ABNT, 2023, pg. 35).

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2022, pg. 3), a carga de ruptura de uma fundação é a carga que, se aplicada, pode comprometer o equilíbrio estático da fundação. Esta carga é fundamental para o cálculo da tensão admissível (ABNT, 2022, pg. 8), que é a máxima tensão aplicada ao terreno pela fundação que deve atender aos estados limites últimos e de serviço, garantindo a segurança e o desempenho da fundação.

Salienta-se que esses conceitos e diretrizes são cruciais para assegurar que as fundações sejam projetadas e executadas de forma a atender aos requisitos técnicos e de segurança estabelecidos pelas normas.

Por fim, um dos principais benefícios do uso do BIM em projetos de fundações superficiais é a melhoria na interoperabilidade e coordenação entre diferentes disciplinas. As normas técnicas fornecem um conjunto de diretrizes que podem ser traduzidas em processos automatizados no BIM, facilitando a comunicação e a troca de informações entre os profissionais envolvidos em um empreendimento. Isso é especialmente importante em projetos complexos, onde a coordenação entre geotécnicos, engenheiros estruturais e outros profissionais é crucial para o sucesso do projeto, garantindo que todos os elementos sejam integrados e compatibilizados.

Conclui-se, portanto, que a aplicação do BIM em projetos geotécnicos de fundações superficiais, aliada ao cumprimento das normas NBR 6122 (ABNT, 2022) e NBR 6118 (ABNT, 2023), oferece uma abordagem robusta e eficiente para o desenvolvimento de projetos seguros e precisos. A integração dessas normas no ambiente BIM permite não só uma melhor visualização e coordenação dos projetos, mas também a implementação de análises e verificações em conformidade com os requisitos normativos, garantindo a segurança e a durabilidade das estruturas. Com a evolução contínua das tecnologias BIM e a atualização das normas técnicas, o futuro promete um campo ainda mais integrado e eficiente para a engenharia geotécnica, onde a inovação e a conformidade normativa caminham lado a lado para o sucesso dos projetos.

Em suma, a revisão bibliográfica demonstra que o BIM representa uma evolução significativa na forma como os projetos de construção são geridos e executados. A melhoria da interoperabilidade, a definição e personalização de famílias de componentes e a utilização de parâmetros são aspectos centrais para a eficácia do BIM. A integração de dados geotécnicos e a aplicação de *frameworks* específicos, como o GIM, evidenciam o potencial do BIM para otimizar a gestão e a precisão dos projetos, especialmente em áreas complexas como a geotecnia. Apesar dos desafios iniciais enfrentados, o BIM promete transformar profundamente a indústria da construção civil, oferecendo soluções mais eficientes e integradas para a gestão de informações ao longo do ciclo de vida dos projetos. A combinação de avanços tecnológicos e o desenvolvimento contínuo das ferramentas BIM visam superar as limitações atuais, garantindo uma abordagem mais eficaz e precisa na execução de projetos de construção.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Como resultados deste estudo, foram obtidos três principais produtos: o projeto compatibilizado, a planilha eletrônica e a Família BIM. A seguir, serão explicitados os resultados de cada um.

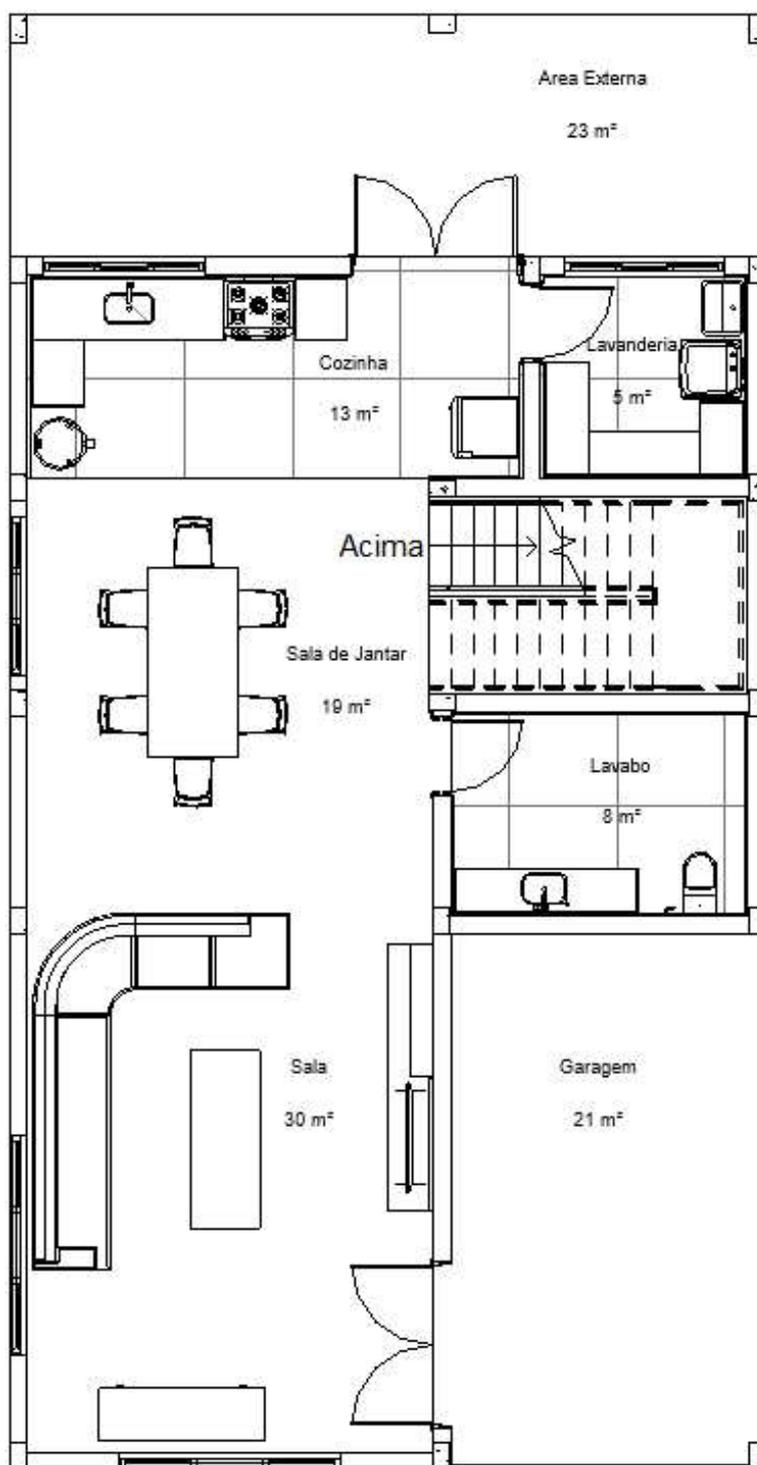
### **4.1. PROJETO BASE**

Inicialmente, foi necessário conceber um empreendimento que servisse de base para a obtenção de informações, como solicitações, quantidade de sapatas, pilares e áreas de influência. Para esse fim, um empreendimento residencial unifamiliar foi projetado arquitetonicamente e teve sua estrutura modelada, resultando em uma compatibilização final que harmoniza todos os aspectos do projeto.

#### **4.1.1. PROJETO ARQUITETÔNICO**

O projeto arquitetônico da edificação foi desenvolvido com o objetivo de servir como base para o projeto estrutural e, conseqüentemente, para o de fundações, que é o foco deste estudo. Assim, foi projetada uma residência unifamiliar de dois pavimentos, com uma área construída total de 372,25 m<sup>2</sup>. O primeiro pavimento inclui uma garagem, um amplo cômodo que combina hall de entrada, sala de estar, sala de jantar e cozinha, além de uma lavanderia, um lavabo, uma área externa e o espaço destinado à escada. O primeiro pavimento é ilustrado na Figura 1.

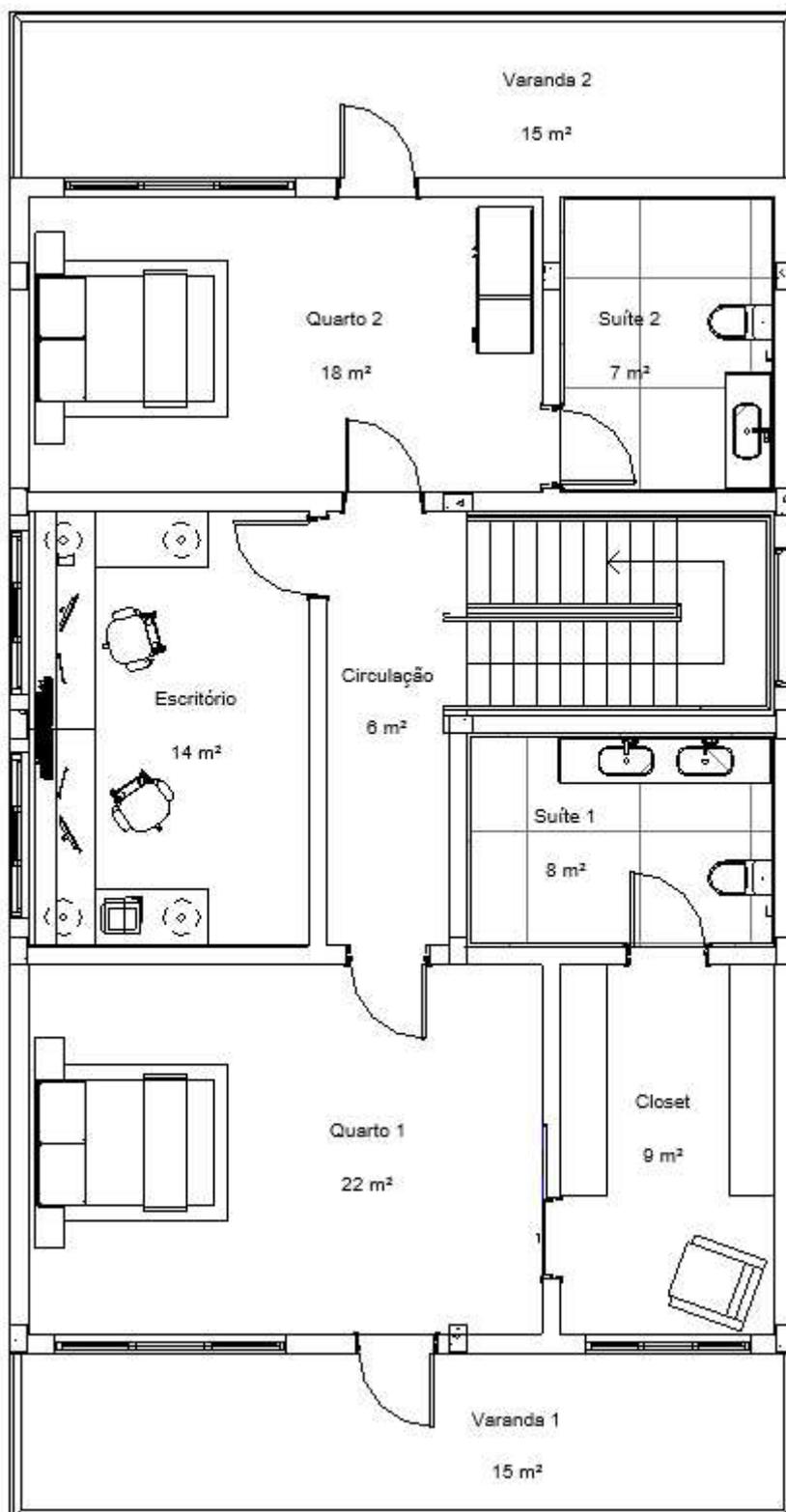
Figura 1: Planta do primeiro pavimento do empreendimento.



Fonte: Autoria própria, 2024.

O segundo pavimento abriga a área íntima da casa, com dois quartos, cada um com suíte, além de circulação, closet, duas varandas e um escritório. O segundo pavimento é exibido na Figura 2.

Figura 2: Planta do segundo pavimento do empreendimento.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Juntamente com o projeto e a modelagem dos pavimentos, uma vista em 3D foi sendo gerada automaticamente, atualizando-se conforme cada elemento era inserido. A vista 3D é exibida na Figura 3.

Figura 3: Vista 3D do projeto arquitetônico do empreendimento



Fonte: Autoria própria, 2024.

As paredes receberam uma pintura em tons neutros, enquanto os ambientes foram mobiliados com itens modelados antecipadamente, como cubas de encaixe parametrizadas, bem como peças extraídas de *templates*, ou seja, arquivos contendo diversas famílias previamente carregadas, a fim de assegurar uma maior aproximação com a realidade. Um exemplo disso é o escritório, que foi decorado com livros, cadeiras, estantes e computadores, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Detalhe interno do escritório



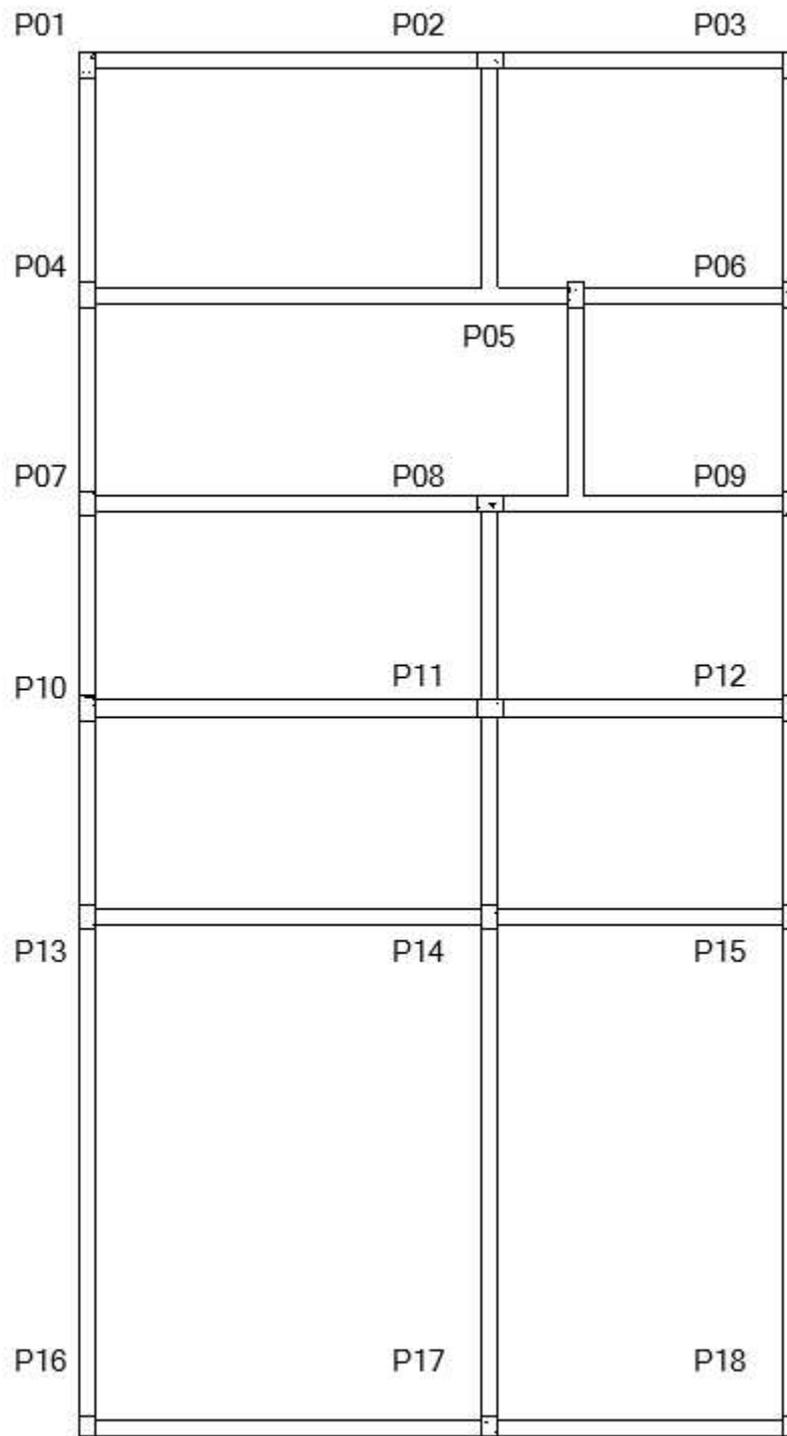
Fonte: Autoria própria, 2024.

#### 4.1.2. MODELAGEM ESTRUTURAL E COMPATIBILIZAÇÃO

Com o projeto arquitetônico bem definido, tornou-se necessária a modelagem da superestrutura de concreto armado, que orientaria o projeto de fundações. Dessa forma, foram feitos pré-dimensionamentos básicos para as estruturas, como pilares, vigas e lajes, mantendo-se dimensões fixas para cada elemento.

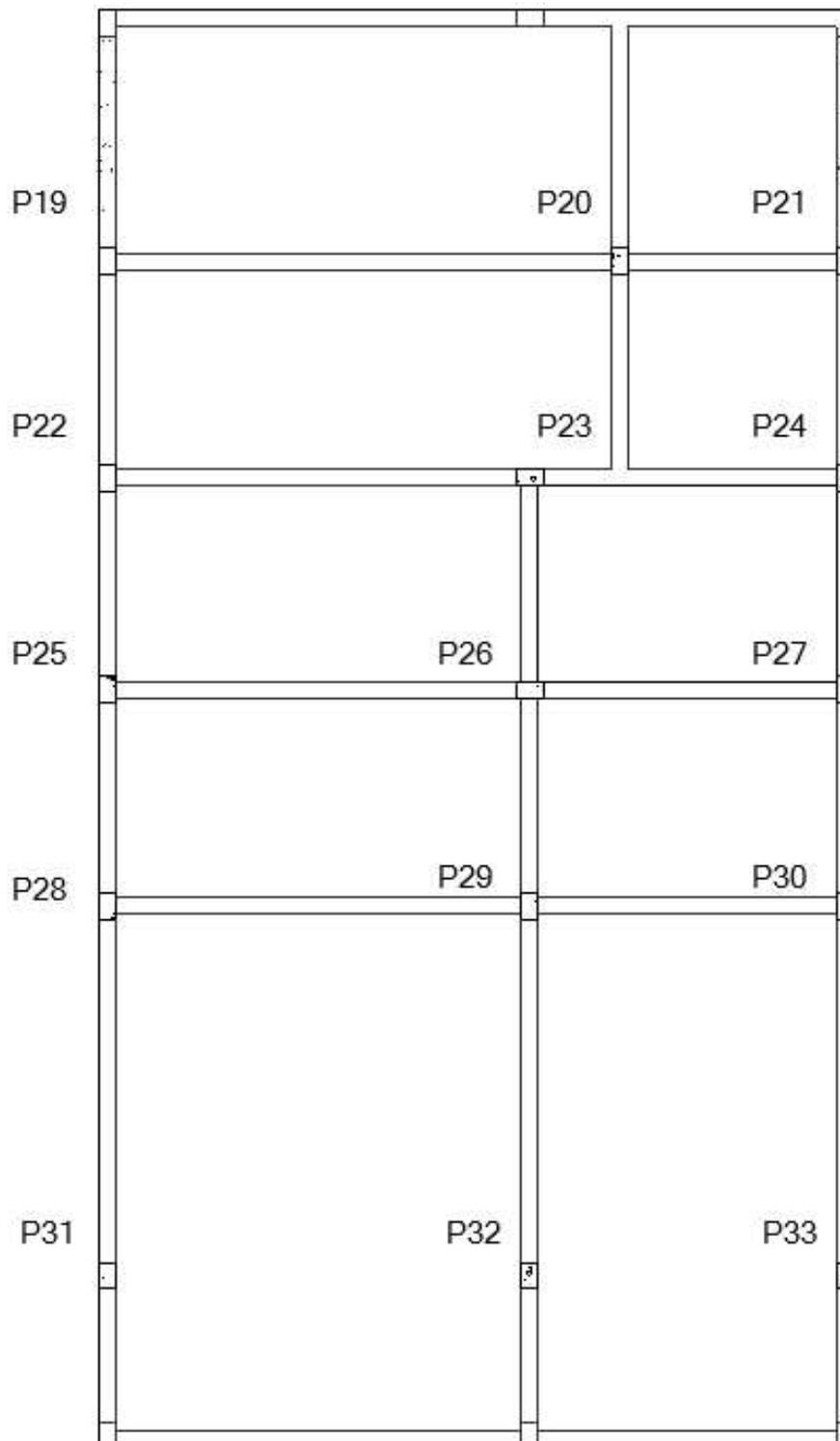
Para o pré-dimensionamento dos pilares, optou-se pela seção de 20x30 cm, proporcionando uma área de 600 cm<sup>2</sup>. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), a área mínima da seção transversal de um pilar deve ser de 360 cm<sup>2</sup>, com uma dimensão mínima de 19 cm, o que valida a escolha de 20 cm para a dimensão menor. As vigas foram projetadas com 20x60 cm, seguindo a diretriz da mesma norma, que estabelece a altura mínima para vigas biapoiadas como  $h \approx L/10$ , onde L representa o maior vão livre entre os pilares. Embora todas as vigas sejam contínuas, foi considerado o maior vão livre de 6 m entre os pilares P13, P14, P15 e P16, P17, P18. A espessura das lajes foi fixada em 10 cm. A disposição e a numeração dos pilares dos primeiros e segundos pavimentos estão detalhadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Figura 5: Localização e enumeração dos pilares do primeiro pavimento.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 6: Localização e enumeração dos pilares do segundo pavimento.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Dessa forma, o modelo estrutural foi desenvolvido e representado na Figura 7.

Figura 7: Vista isométrica da modelagem estrutural do empreendimento.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Com base nessa modelagem, o projeto arquitetônico foi compatibilizado com a modelagem estrutural, necessitando de algumas modificações. Por exemplo, a janela do escritório, que inicialmente era única e central, foi substituída por duas janelas devido à presença de um pilar na posição original, conforme representado na Figura 8.

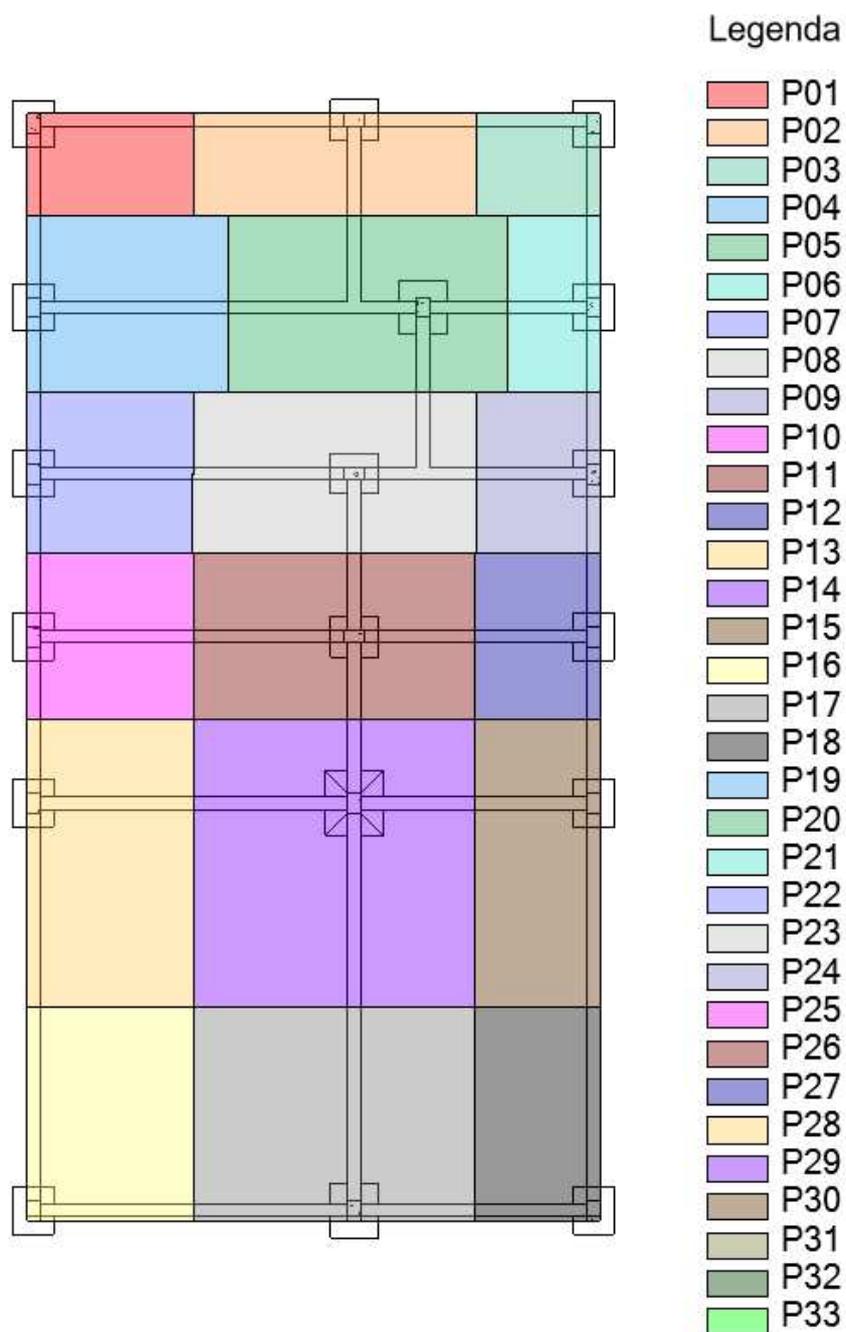
Figura 8: Escritório com incompatibilidade entre arquitetura e estrutura, posteriormente corrigida.



Fonte: Autoria própria, 2024.

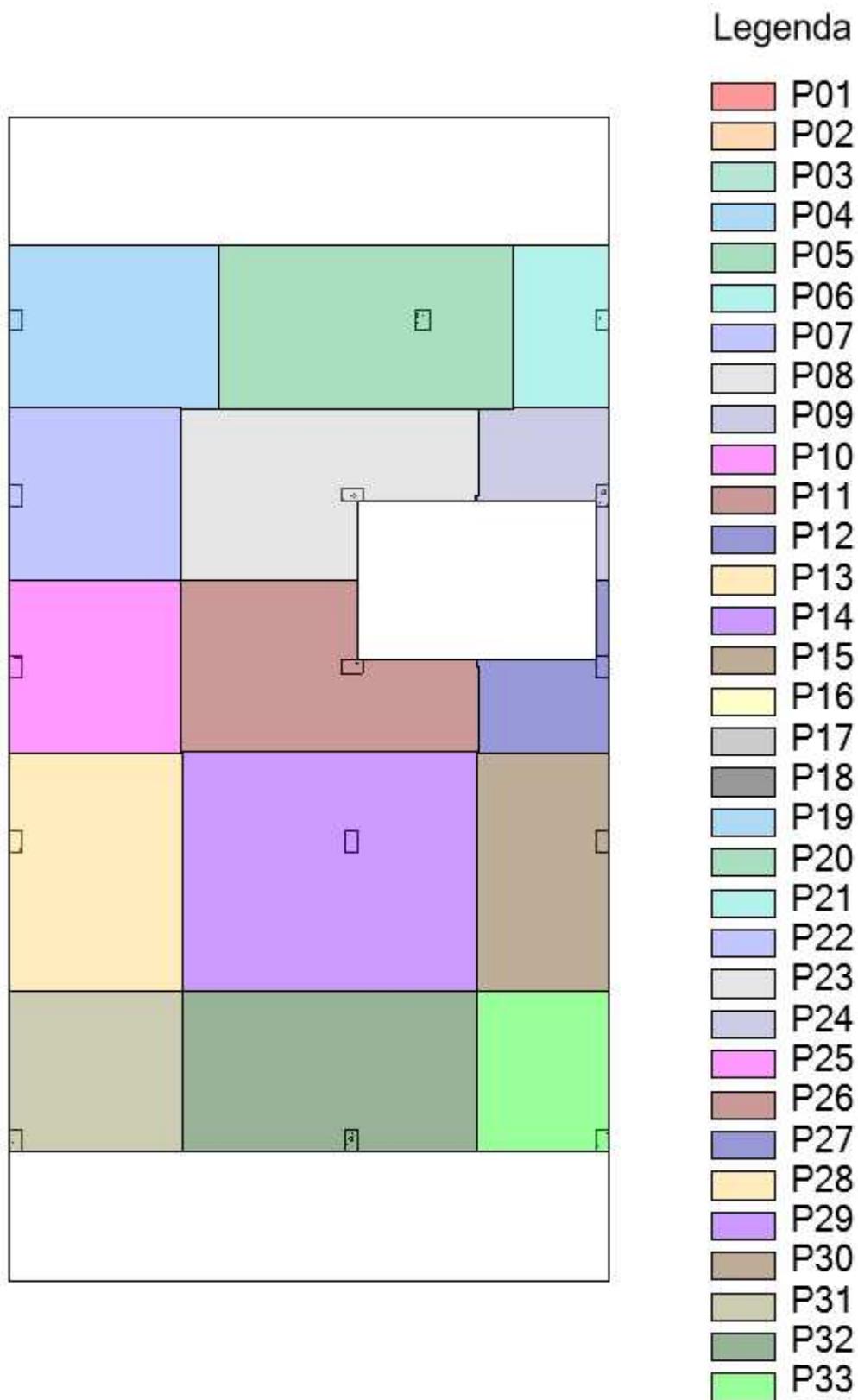
Com o projeto compatibilizado, é possível determinar as áreas de influência dos pilares e, conseqüentemente, suas cargas aproximadas. Para isso, foi elaborada uma planta com regiões preenchidas, que facilita a mensuração da metragem quadrada de cada pilar em cada pavimento, conforme ilustrado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9: Áreas de influência dos pilares do primeiro pavimento.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 10: Áreas de influência dos pilares do segundo pavimento.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A determinação das áreas de influência dos pilares não utilizou o método das charneiras plásticas, optando-se por uma abordagem mais simplificada. Esta técnica, proposta por Marangon (2018), consiste em dividir a distância entre o centro de um pilar e outro com retângulos, de forma que as lajes são segmentadas e a área mais próxima de cada pilar fica atribuída a uma das regiões.

No modelo BIM, o processo para representar essas áreas iniciou-se com a duplicação da vista em planta do pavimento, criando uma nova representação. Utilizou-se então o recurso de "região preenchida" disponível no software, que permite criar geometria personalizada na vista para destacar ou ocultar elementos específicos. Foram desenhados diversos retângulos que dividem os vãos ao meio, evidenciando as áreas de influência de cada pilar. As regiões foram coloridas com tonalidades sólidas e transparência ajustada para permitir a visualização simultânea da planta estrutural e a diferenciação das áreas de influência. Além disso, foi inserida uma legenda para facilitar a interpretação e a melhor visualização por parte do usuário.

Com base nas regiões, para obter a metragem de cada pilar, é necessário selecionar a região preenchida no software, onde a modelagem é exibida juntamente com as áreas de influência dos pilares. Quando a região é selecionada, ela fica destacada em azul para indicar a seleção. A metragem correspondente aparece na aba das propriedades, localizada à esquerda da tela, conforme mostrado na Figura 11. Assim que a região é selecionada, uma seção intitulada "Dimensões" surge, exibindo a área, que, no caso da Figura em questão, é de 7,664 m<sup>2</sup>. Para facilitar a visualização, essa informação foi destacada com um retângulo vermelho na imagem.

Figura 11: Região preenchida do pilar P04 com sua respectiva metragem quadrada destacada.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Cada pilar possui duas áreas de influência, uma em cada pavimento, já que os pilares do térreo se prolongam até o andar superior. Por exemplo, o pilar P08 no primeiro nível corresponde ao P23 no segundo, mas com nomenclaturas diferentes uma vez que houve mudança de pavimento. Essa escolha projetual foi feita devido à necessidade do software de modelar os pilares por nível. Para facilitar a identificação, as cores associadas a ambos são idênticas. Essa uniformidade é essencial para o cálculo das cargas, uma vez que é necessário somar as áreas de influência de ambos os pavimentos. Isso ocorre porque a sapata de P08 recebe também as cargas transferidas de P23, já que estão interligados.

O cálculo das cargas é feito multiplicando a área de influência, em metros quadrados, por 10 kN. Essa estimativa, embora menos precisa que o método das charneiras plásticas, se aproxima dos valores encontrados por esse procedimento, conforme observado por Marangon (2018).

## 4.2. PLANILHA ELETRÔNICA DE DIMENSIONAMENTO

Foi desenvolvida uma planilha eletrônica Excel com o objetivo de dimensionar os elementos estruturais do projeto. Essa planilha foi organizada com uma aba específica dedicada ao registro de todas as informações relevantes para cada componente estrutural. Entre os dados registrados, estão o nome do elemento, a cota de assentamento, o nível d'água, as dimensões do pilar, as classes de concreto e aço utilizados, a área necessária de aço na seção do pilar, bem como a quantidade e

bitola das barras de armadura. Essas informações são detalhadas e exemplificadas na Figura 12.

Figura 12: Aba da Planilha Excel destinada à coleta de informações

| Levantamento das características das sapatas |                                      |                        |                           |         |                  |        |                 |            |                       |              |                                 |
|--|--------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------|------------------|--------|-----------------|------------|-----------------------|--------------|---------------------------------|
| Sapata                                       | Área de influência<br>m <sup>2</sup> | Carga aproximada<br>kN | Cota de assentamento<br>m | NA<br>m | Medidas do Pilar |        | Classe          |            | Armadura              |              |                                 |
|  |                                      |                        |                           |         | a<br>m           | b<br>m | Concreto<br>MPa | Aço<br>MPa | Quant. Barras<br>unid | Bitola<br>mm | As calculado<br>cm <sup>2</sup> |
| S01  | 3,67                                 | 37                     | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S02  | 6,19                                 | 62                     | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S03  | 2,73                                 | 27                     | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S04  | 14,38                                | 144                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S05  | 20,11                                | 201                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S06  | 6,56                                 | 66                     | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S07  | 11,62                                | 116                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S08  | 17,91                                | 179                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S09  | 6,92                                 | 69                     | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S10  | 11,82                                | 118                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S11  | 18,16                                | 182                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S12  | 7,15                                 | 71                     | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S13  | 18,45                                | 185                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S14  | 31,06                                | 311                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S15  | 13,93                                | 139                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S16  | 13,20                                | 132                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S17  | 22,13                                | 221                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |
| S18  | 9,96                                 | 100                    | 1,8                       | 3,0     | 0,30             | 0,20   | 25              | 50         | 6                     | 16,0         | 5                               |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para o dimensionamento das fundações superficiais de concreto armado, foram seguidas rigorosamente as normas técnicas pertinentes. A NBR 6122 (ABNT, 2022), que trata do projeto e execução de fundações, foi utilizada para a estimativa da tensão admissível do solo, tensão de ruptura e aplicação dos fatores de segurança. Já a NBR 6118 (ABNT, 2023), norma que rege o projeto de estruturas de concreto, foi empregada para definir as classes de concreto e aço, as resistências características e os requisitos de uso dos materiais.

Esta mesma norma também orientou a estipulação da área de aço necessária nas seções dos pilares, além da quantidade, bitola e espaçamento das barras de armadura. No entanto, esses valores foram definidos de forma coerente, mas sem a realização de cálculos específicos, sendo aplicados apenas de modo ilustrativo para exemplificar o processo de cálculo. Por isso, os valores permanecem os mesmos em todos os casos. Em uma aplicação real, no entanto, em projetos onde os pilares já foram dimensionados por um engenheiro estrutural, o engenheiro projetista de fundações, que é o usuário dessa planilha, adicionaria as informações referentes aos pilares na aba destinada. A planilha, então, transfere automaticamente esses dados para a aba de cálculo por meio da função PROCV, agilizando o processo de dimensionamento e garantindo a integração dos dados.

Esses procedimentos normativos garantem que o projeto de fundações atenda aos critérios de segurança, durabilidade e desempenho exigidos pelas regulamentações brasileiras, assegurando a integridade estrutural da edificação.

Com base nesses dados, a planilha recolhe automaticamente as informações inseridas pelo usuário e as insere em sua célula correspondente para os devidos cálculos. Para isso, na região de impressão, deve-se inserir o Número da Sapata da mesma forma como foi colocada na aba de Levantamento de Dados. O valor de Tensão Admissível é calculado para cada elemento estrutural, assim como prescreve a NBR 6122 (ABNT, 2022), e não tem seu valor automatizado assim como os outros. Além disso, os valores de  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  e  $\mu_3$  são retirados automaticamente de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Valores de  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  e  $\mu_3$ .

|         |      |
|---------|------|
| $\mu_1$ | 1,00 |
|         | 1,40 |
|         | 2,25 |
| $\mu_2$ | 1,00 |
|         | 0,70 |
| $\mu_3$ | 1,00 |
|         | 0,92 |

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2023).

Onde:

$\eta_1$ : Coeficiente que considera o efeito da aderência da superfície da barra (adimensional);

$\eta_2$ : Coeficiente que leva em conta o efeito do confinamento do concreto em torno da barra (adimensional);

$\eta_3$ : Coeficiente que considera o tipo de concreto utilizado (adimensional).

Juntamente com essas informações automáticas, a Planilha calcula alguns parâmetros iniciais, como  $f_{ctd}$ ,  $f_{bd}$  e  $l_b$ , representados pelas Equações 1 a 3, respectivamente. As equações que calculam o  $f_{ctd}$  (resistência de cálculo à tração do concreto),  $f_{bd}$  (resistência de aderência de cálculo do concreto) e  $l_b$  (comprimento de ancoragem de barras) em estruturas de concreto armado, incluindo sapatas, são normatizadas pela NBR 6118 (ABNT, 2023), que trata do Projeto de Estruturas de Concreto — Procedimento.

Equação 01: Cálculo do  $f_{ctd}$

$$f_{ctd} = \frac{\sqrt[3]{f_{ck}^2} \times 0,21}{1,4}$$

Equação 02: Cálculo do  $f_{bd}$

$$f_{bd} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times f_{ctd}$$

Equação 03: Cálculo do  $l_b$

$$l_b = \frac{\phi_{armadura \text{ em mm}}}{4} \times \frac{f_{yk}}{f_{bd}}$$

Onde:

$f_{ck}$  é a Resistência Característica do Concreto, em MPa;

$f_{ctd}$  é a Resistência de Cálculo à Tração do Concreto, em MPa;

$f_{bd}$  é a Resistência de Aderência de Cálculo do Concreto, em MPa;

$f_{yk}$  é a Resistência Característica do Aço ao Escoamento na Tração, em MPa;

$\phi_{armadura}$  é a bitola da armadura, em milímetros.

A representação das informações obtidas pela planilha eletrônica bem como os cálculos realizados pelas Equações 01, 02 e 03 encontram-se na Figura 13.

Figura 13: Representação das Informações na Aba de Cálculo da Planilha Eletrônica

|  |                                  |                      |
|--|----------------------------------|----------------------|
| Dados  |                                  |                      |
| Medidas do pilar:  | <input type="text" value="0,3"/> | [m] a (>)            |
|  | <input type="text" value="0,2"/> | [m] b (<)            |
| Solicitação  | <input type="text" value="40"/>  | [kN]                 |
| Majoração  | 1,05                             |                      |
|  | 1,4                              |                      |
| $\sigma_{adm}$   | 0,47                             | [MPa]                |
| Classe concreto  | <input type="text" value="25"/>  | C                    |
| Classe aço   | <input type="text" value="50"/>  | CA                   |
| Armadura do pilar  | <input type="text" value="6"/>   | qtd barras           |
|  | <input type="text" value="16"/>  | [mm]                 |
|  | <input type="text" value="1,6"/> | [cm]                 |
| Cota de assentamento   | <input type="text" value="1,8"/> | [m]                  |
| NA   | <input type="text" value="3"/>   | [m]                  |
| $\gamma_{concreto}$  | <input type="text" value="25"/>  | [kN/m <sup>3</sup> ] |
| As calculado   | <input type="text" value="5"/>   | [cm]                 |
| $\alpha$   | <input type="text" value="60"/>  | °                    |
| Possui gancho?   | <input type="text" value="1"/>   | 0 ou 1               |
| $\alpha_1$   | <input type="text" value="0,7"/> | 0,7 ou 1             |
| Zona   | <input type="text" value="BA"/>  | MA ou BA             |
| $\eta_1$   | 2,25                             |                      |
| $\eta_2$   | 1                                |                      |
| $\eta_3$   | 1                                |                      |
| $f_{ctd}$  | 1,28                             | [MPa]                |
| $f_{bd}$   | 2,89                             | [MPa]                |
| $l_b$  | 60,270                           | [cm]                 |
| OBS.: Se o As calculado não for fornecido então assume-se que é o mesmo valor que As efetivo |                                  |                      |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Na Aba de Cálculo previamente apresentada, MA significa Zona de Má Aderência e BA significa Zona de Boa Aderência.

Algumas células destacadas com contornos brancos são destinadas a exibir ao usuário as informações extraídas da aba de Levantamento. Essas células têm o

propósito de evidenciar que os dados apresentados foram fornecidos pelo usuário e não possuem cálculos embutidos. Além disso, é possível inserir a tipologia do solo (argila, silte argiloso, silte arenoso ou areia) e o valor NSPT do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*), permitindo que a planilha elabore resultados detalhados sobre a característica da ruptura do solo, distinguindo-a como generalizada ou localizada, conforme os critérios estabelecidos por Terzaghi (1943). Adicionalmente, a planilha classifica o solo com base no NSPT e na tipologia do solo, em conformidade com as diretrizes da NBR 6484 (ABNT, 2020), que normatiza o procedimento de execução de sondagens de simples reconhecimento.

A Tabela 2, referida na NBR 6484 (ABNT, 2020), apresenta a classificação do solo segundo o número de golpes do ensaio SPT e o tipo de solo, categorizando-o quanto à consistência e compacidade.

Tabela 2: Tabela dos Estados de Compacidade e de Consistência

| PESO ESPECÍFICO DO SOLO        |                           |                           |                       |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Solo                           | NSPT<br>(Limite Inferior) | NSPT<br>(Limite Superior) | Designação            |
| Areias ou Siltes<br>Arenosos   | 0                         | 4                         | Fofa                  |
|                                | 5                         | 8                         | Pouco Compacta        |
|                                | 9                         | 18                        | Medianamente Compacta |
|                                | 19                        | 39                        | Compacta              |
|                                | 40                        | -                         | Muito Compacta        |
| Argilas ou Siltes<br>Argilosos | 0                         | 2                         | Muito Mole            |
|                                | 3                         | 5                         | Mole                  |
|                                | 6                         | 10                        | Média                 |
|                                | 11                        | 19                        | Rija                  |
|                                | 20                        | 29                        | Muito Rija            |
|                                | 30                        | -                         | Dura                  |

Fonte: Adaptado de NBR 6484 (ABNT, 2020).

Na falta de resultados de ensaios de laboratório, a planilha também possibilita a realização das estimativas do peso específico do solo em suas formas natural, saturada e submersa, conforme sugerido por Godoy (1972) *apud* Cintra, Aoki e Albiero (2019), sendo o primeiro representado pela Tabela 3 e os demais pelas Equações 04 e 05, respectivamente.

Tabela 3: Peso Específico do Solo em seu Estado Natural ( $\gamma_{nat}$ ).

| PESO ESPECÍFICO DO SOLO     |                       |                                      |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Solo                        | Designação            | Peso Específico Natural ( $kN/m^3$ ) |
| Areias ou Siltes Arenosos   | Fofa                  | 18                                   |
|                             | Pouco Compacta        | 18                                   |
|                             | Medianamente Compacta | 19                                   |
|                             | Compacta              | 20                                   |
|                             | Muito Compacta        | 20                                   |
| Argilas ou Siltes Argilosos | Muito Mole            | 13                                   |
|                             | Mole                  | 15                                   |
|                             | Média                 | 17                                   |
|                             | Rija                  | 19                                   |
|                             | Muito Rija            | 19                                   |
|                             | Dura                  | 21                                   |

Fonte: Adaptado de Godoy (1972) *apud* Cintra, Aoki e Albiero (2019).

Equação 04: Cálculo do Peso Específico Saturado ( $\gamma_{sat}$ ).

$$\gamma_{sat} = \gamma_{nat} + 1$$

Equação 05: Cálculo do Peso Específico Submerso ( $\gamma_{sub}$ ).

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Onde:  $\gamma_w$  é o peso específico da água e  $\gamma_{nat}$  é o peso específico natural do solo.

Para finalizar a reprodução da sondagem, na falta de ensaios de laboratório para definição dos parâmetros de resistência do solo, a planilha estima os valores de coesão não drenada, em kPa, e do ângulo de atrito, em graus. Para isso, foi utilizada a equação proposta por Teixeira e Godoy (1972), representada pela Equação 06.

Equação 06: Cálculo da Coesão Não Drenada ( $c$ ) com base no NSPT.

$$c = 10 \times NSPT$$

Referente ao ângulo de atrito, é calculado o menor valor entre as equações propostas por Godoy (1983) e Teixeira (1996), de modo a sempre trabalhar a favor da segurança. As Equações 07 e 08 mostram, respectivamente, as propostas de Godoy (1983) e Teixeira (1996).

Equação 07: Estimativa do Ângulo de Atrito Interno ( $\phi$ ) por Godoy (1983).

$$\phi = 28^\circ + (0,4 \times NSPT)$$

Equação 08: Estimativa do Ângulo de Atrito Interno ( $\phi$ ) por Teixeira (1996).

$$\phi = \sqrt{20 \times NSPT} + 15$$

Essas operações são realizadas após a análise do tipo de ruptura. Caso seja uma ruptura localizada, o resultado dessa operação será reduzido em  $\frac{2}{3}$ , conforme sugerido por Terzaghi (1943). Dessa forma, a reprodução da sondagem é representada na planilha eletrônica na Figura 14.

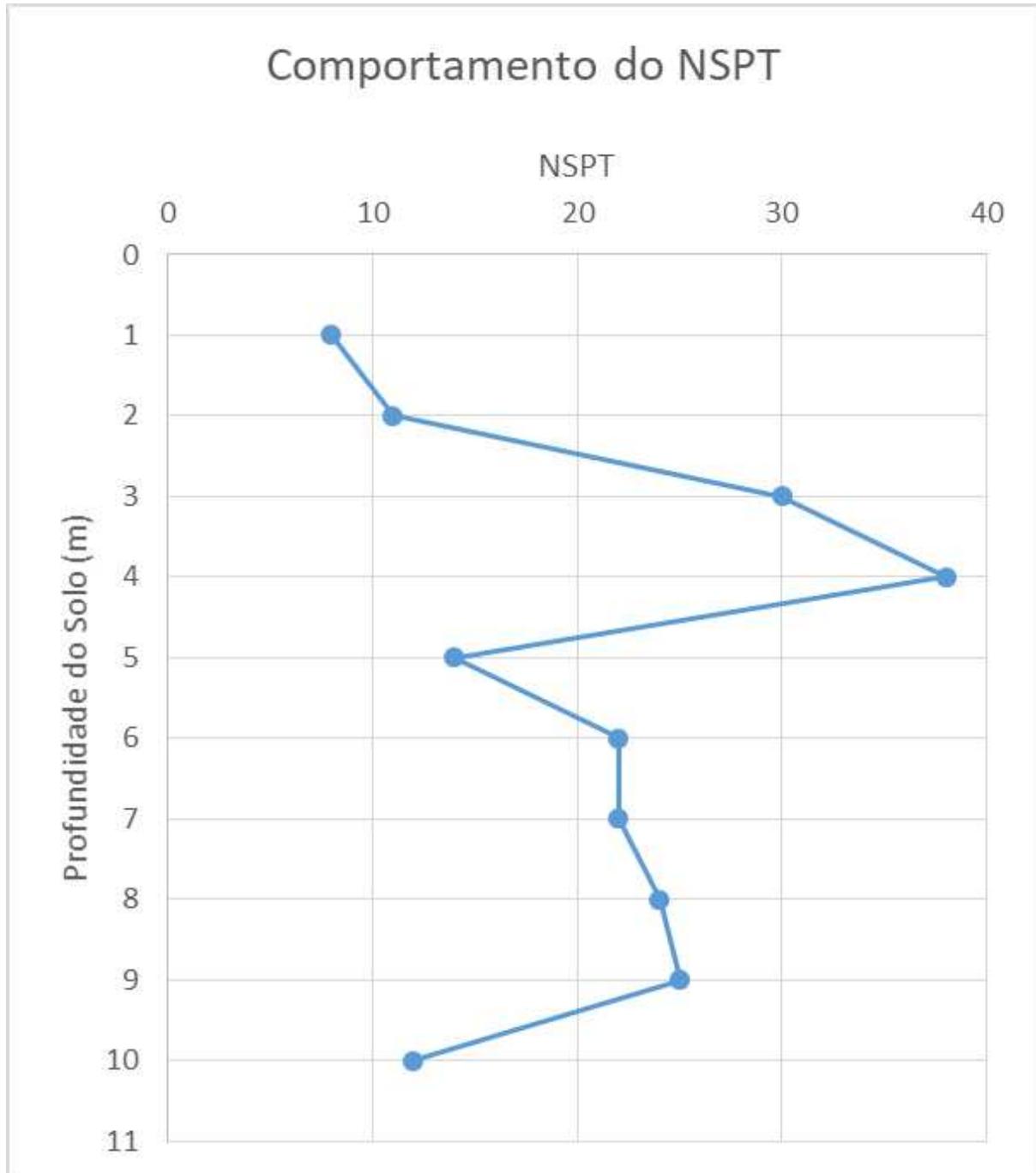
Figura 14: Reprodução da Sondagem.

| m<br>[-m] | Reprodução da Sondagem |       |                      |                       |  |  |  |                 |             |
|-----------|------------------------|-------|----------------------|-----------------------|--|--|--|-----------------|-------------|
|           | NSPT                   | Solo  | Características      | Designação            | $\gamma_{nat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sub}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | Coesão<br>[kPa] | $\phi$<br>° |
| 1         | 8                      | Areia | Ruptura Generalizada | Pouco Compacta        | 18                                     | 19                                     | 9                                      | 0               | 27,65       |
| 2         | 11                     | Areia | Ruptura Generalizada | Medianamente Compacta | 19                                     | 20                                     | 10                                     | 0               | 29,83       |
| 3         | 30                     | Areia | Ruptura Generalizada | Compacta              | 20                                     | 21                                     | 11                                     | 0               | 39,49       |
| 4         | 38                     | Areia | Ruptura Generalizada | Compacta              | 20                                     | 21                                     | 11                                     | 0               | 42,57       |
| 5         | 14                     | Areia | Ruptura Generalizada | Medianamente Compacta | 19                                     | 20                                     | 10                                     | 0               | 31,73       |
| 6         | 22                     | Areia | Ruptura Generalizada | Compacta              | 20                                     | 21                                     | 11                                     | 0               | 35,98       |
| 7         | 22                     | Areia | Ruptura Generalizada | Compacta              | 20                                     | 21                                     | 11                                     | 0               | 35,98       |
| 8         | 24                     | Areia | Ruptura Generalizada | Compacta              | 20                                     | 21                                     | 11                                     | 0               | 36,91       |
| 9         | 25                     | Areia | Ruptura Generalizada | Compacta              | 20                                     | 21                                     | 11                                     | 0               | 37,36       |
| 10        | 12                     | Areia | Ruptura Generalizada | Medianamente Compacta | 19                                     | 20                                     | 10                                     | 0               | 30,49       |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Todas essas informações são utilizadas para gerar o gráfico que representa o comportamento da resistência do solo pelo método SPT, conforme ilustrado no Gráfico 1.

Gráfico 1: Representação do Comportamento da Resistência do Solo pelo Método SPT.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Assim, esses dados são utilizados para o cálculo da Tensão de Ruptura ( $\sigma_{rup}$ ), sugerida por Meyerhof (1951; 1963) e representada pela Equação 09.

Equação 09: Cálculo da Tensão de Ruptura do solo ( $\sigma_{rup}$ ).

$$\sigma_{rup} = (c \times Nc \times Sc \times dc) + (q \times N \times Sq \times dq) + (0,5 \times \gamma \times B \times N\gamma \times S\gamma \times d\gamma)$$

Onde:

B é o menor lado da sapata;

Nq é o Fator de capacidade de carga relacionado ao ângulo de atrito do solo;

Nc é o fator de capacidade de carga relacionado à coesão;

N $\gamma$  é o fator de capacidade de carga relacionado ao peso específico do solo;

Sc é o fator de forma associado à coesão do solo;

Sq é o fator de forma associado ao ângulo de atrito do solo;

S $\gamma$  é o fator de forma associado ao peso específico do solo;

dc é o fator de correção para a profundidade da fundação associado à coesão do solo;

dq é o fator de correção para a profundidade da fundação associado ao ângulo de atrito do solo;

d $\gamma$  é o fator de correção para a profundidade da fundação associado ao peso específico do solo.

Para o cálculo da tensão de ruptura, é necessário determinar os valores dos fatores de capacidade de carga, fatores de forma e fatores de profundidade, conforme representados pelas Equações 10 a 19.

Equação 10: Cálculo do Nq.

$$Nq = e^{\pi \times tg\phi} \times tg^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

Equação 11: Cálculo do Nc.

$$Nc = (Nq - 1) \times (\cotg \phi)$$

Equação 12: Cálculo do N $\gamma$ .

$$N\gamma = (Nq - 1) \times tg(1,4 \phi)$$

Equação 13: Cálculo do Kp.

$$K_p = tg^2 \times \left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

Onde:  $K_p$  é o coeficiente de pressão passiva do solo.

Equação 14: Cálculo do  $S_c$ .

$$S_c = 1 + 0,2 \times K_p \times \frac{B}{A}$$

Onde:  $A$  é o maior lado da sapata.

Equação 15: Cálculo do  $S_q$  e  $S_\gamma$  para  $\phi > 10^\circ$ .

$$S_q = S_\gamma = 1 + 0,1 \times K_p \times \frac{B}{A}$$

Equação 16: Cálculo do  $S_q$  e  $S_\gamma$  para  $\phi = 10^\circ$ .

$$S_q = S_\gamma = 1$$

Equação 17: Cálculo do  $d_c$ .

$$d_c = 1 + 0,2 \times K_p^{0,5} \times \frac{D_f}{B}$$

Onde:  $D_f$  é a cota de assentamento da fundação (C.A.)

Equação 18: Cálculo do  $d_q$  e  $d_\gamma$  para  $\phi > 10^\circ$ .

$$d_q = d_\gamma = 1 + 0,1 \times K_p^{0,5} \times \frac{D_f}{B}$$

Equação 19: Cálculo do  $d_q$  e  $d_\gamma$  para  $\phi = 10^\circ$ .

$$d_q = d_\gamma = 1$$

Além dos cálculos relacionados aos fatores da Equação 09, o valor da sobrecarga  $q$  deve ser determinado com base na análise da influência do nível d'água (NA), que pode ser dividido em três casos:

1. NA na região da sobrecarga;
2. NA abaixo da base, mas a uma profundidade menor que  $B$  (a partir da cota de assentamento);
3. NA com profundidade superior a  $B$  em relação à cota de assentamento.

Cada um desses casos apresenta um valor diferente para a sobrecarga  $q$  e o peso específico. A relação entre esses valores está explicitada na Tabela 4.

Tabela 4: Influência do NA na Estimativa da Tensão de Ruptura.

|   |  |
|---|--|
| Caso 1: NA na região da Sobrecarga  | $q = D1 \times \gamma_{nat} + (Df - D1) \times \gamma_{sub}$   |
|   | $\gamma = \gamma_{sub}$ , no 3º termo da Equação 09.   |
| Caso 2: NA abaixo da base, mas em profundidade menor que B (a partir da Cota de Assentamento) | $q = \gamma_{nat} \times Df$   |
|   | $\gamma = \gamma_{sub} + \frac{D2}{B} \times (\gamma_{nat} - \gamma_{sub})$ , no 3º termo da Equação 09. |
| Caso 3: NA com profundidade superior a B em relação à Cota de Assentamento                    | $q = \gamma_{nat} \times Df$   |
|   | $\gamma = \gamma_{nat}$ , no 3º termo da Equação 09.   |

Fonte: Barata, 1984.

Na Tabela 4, D1 representa a profundidade da linha freática (ou nível d'água) em relação ao Nível do Terreno (N.T.) e D2 representa a profundidade da linha freática (ou Nível d'Água) abaixo da Cota de Assentamento da fundação, porém em profundidade menor que B (Contando a partir da C.A. da fundação).

Os cálculos na planilha eletrônica são representados pela Figura 15.

Figura 15: Cálculo dos Fatores de Capacidade de Carga, Fatores de Forma, Fatores de Profundidade e Influência do NA.

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| Fatores de Capacidade de Carga |                        |
| Nq                             | 18,06                  |
| Nc                             | 29,74                  |
| Nv                             | 15,23                  |
| Fatores de Forma               |                        |
| Kp                             | 2,98                   |
| Sc                             | 1,51                   |
| Sq                             | 1,26                   |
| Se                             | 1,26                   |
| Fatores de Profundidade:       |                        |
| Df                             | 1,80                   |
| dc                             | 2,04                   |
| dq                             | 1,56                   |
| dy                             | 1,59                   |
| Influência do NA               |                        |
| Caso                           | 3                      |
| q                              | 34,2 kN/m <sup>2</sup> |
| γ                              | 19 kN/m <sup>3</sup>   |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Dessa forma, foi possível obter o valor da Tensão de Ruptura do solo com base nas condições de contorno expostas nessa situação. Para obter o valor da Tensão Admissível do solo ( $\sigma_{adm}$ ), conforme exposto na NBR 6122 (ABNT, 2022), é necessário dividir a Tensão de Ruptura por um Fator de Segurança (FS). Neste estudo, optou-se pela adoção de um Fator de Segurança (FS) igual a 3, com o intuito de favorecer a segurança do projeto, conforme recomendado pela NBR 6122 (ABNT, 2022), que estabelece diretrizes para a aplicação de valores de Fatores de Segurança (Tabela 5).

Tabela 5: Fundações rasas - Fatores De Segurança e Coeficientes de Ponderação para Solicitações de Compressão.

| Métodos para determinação da resistência última  | Coeficiente de ponderação da resistência última<br>$\gamma_m^c$ | Fator de segurança global<br>$FS_g$                    |
|--|---|--|
| Semiempíricos  | Valores propostos no próprio processo e no mínimo 2,15          | Valores propostos no próprio processo e no mínimo 3,00 |
| Analíticos   | 2,15  | 3,00   |
| Semiempíricos ou analíticos acrescidos de duas ou mais provas de carga, necessariamente executadas na fase de projeto. | 1,40  | 2,00   |

Fonte: Adaptado de NBR 6122 (ABNT, 2022).

Assim, tem-se a Equação 20.

Equação 20: Cálculo da Tensão Admissível do Solo ( $\sigma_{adm}$ ).

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{FS}$$

Com esse resultado, é possível dar prosseguimento ao dimensionamento estrutural do elemento de fundação, seguindo o que é preconizado pela NBR 6122 (ABNT, 2022) e NBR 6118 (ABNT, 2023).

As verificações de ancoragem, tensão na base, cisalhamento, cálculo da altura da sapata e cálculo da área mínima da base estão devidamente preconizadas pela NBR 6118 (ABNT, 2023), intitulada "Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento". Esta norma, recentemente atualizada, constitui o principal marco

regulatório para o projeto estrutural em concreto no Brasil, estabelecendo critérios rigorosos para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas.

No que tange à verificação da ancoragem, a NBR 6118 (ABNT, 2023) define os procedimentos para dimensionar o comprimento adequado das armaduras, assegurando que as barras sejam devidamente ancoradas no concreto, de modo a resistir às tensões aplicadas e evitar deslizamentos que possam comprometer a integridade da estrutura. Quanto à verificação da tensão na base das sapatas, a norma orienta sobre a distribuição das tensões de contato entre a fundação e o solo, com o objetivo de prevenir concentrações de tensões que poderiam gerar assentamentos diferenciais ou falhas estruturais.

A verificação quanto ao cisalhamento é igualmente abrangida pela NBR 6118 (ABNT, 2023), que estabelece os parâmetros de dimensionamento das estruturas em relação às tensões cisalhantes, garantindo que a estrutura possa resistir às forças de corte sem apresentar fissuração excessiva ou ruptura. Além disso, o cálculo da altura da sapata é abordado na referida norma, que prescreve o dimensionamento da altura em função dos momentos fletores e esforços cortantes atuantes, assegurando a integridade estrutural e a adequada transmissão de cargas ao solo de fundação. A norma também discorre sobre o cálculo da área mínima da base das sapatas, garantindo que a fundação tenha uma área suficiente para distribuir as cargas impostas ao solo sem exceder a capacidade de suporte do terreno.

Com esses critérios estabelecidos, é possível dar prosseguimento ao dimensionamento estrutural do elemento de fundação, seguindo o que é preconizado pela NBR 6122 (ABNT, 2022), que, complementando a NBR 6118 (ABNT, 2023), orienta de maneira específica o dimensionamento e a execução de fundações. Nesse contexto, foi calculada uma dimensão sugerida de lado da sapata, tomando como base a área mínima da base, de modo a guiar o usuário para as interações relativas aos lados A e B do elemento. Dessa forma, de acordo com as medidas inseridas nessas dimensões, a planilha retorna resultados quanto à verificação da ancoragem, verificação da tensão na base, cisalhamento e o cálculo da altura da sapata, proporcionando uma abordagem holística para o projeto de estruturas de concreto, desde a concepção até a implementação. Essas verificações são representadas pela Figura 16.

Figura 16: Dimensionamento estrutural

| DIMENSIONAMENTO DA BASE  |                            | DIMENSIONAMENTO DA ALTURA     |                             |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| S base, mín =            | 0,089869 [m <sup>2</sup> ] | h calc =                      | 0,15 [m]                    |
| Lado                     | 0,299782 [m]               | h const =                     | 0,20 [m]                    |
| Lado adotado A           | 0,7 [m]                    | h0 =                          | 0,20 [m]                    |
| Lado adotado B           | 0,6 [m]                    | VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO   |                             |
| (A-a) =                  | 0,4 [m]                    | Tsd                           | 311,11 [kN/m <sup>2</sup> ] |
| (B-b) =                  | 0,4 [m]                    | Tsd                           | 0,31 [MPa]                  |
| (A-a) = (B-b) ?          | SIM                        | TRd                           | 4,35 [MPa]                  |
| S adotado                | 0,42 [m <sup>2</sup> ]     | Conformidade                  | OK                          |
| VERIFICAÇÃO DA ANCORAGEM |                            | VERIFICAÇÃO DA TENSÃO NA BASE |                             |
| lb =                     | 60 [cm]                    | Vsapata =                     | 0,13 [m <sup>3</sup> ]      |
| Necessidade de gancho?   | SIM                        | Gsapata =                     | 5 [kN]                      |
| lb nec =                 | 21,97329 [cm]              | σs =                          | 107,14 [kN/m <sup>2</sup> ] |
| lb mín =                 | 18,08088 [cm]              | σs =                          | 108 [kN/m <sup>2</sup> ]    |
| lb nec > lb mín ?        | OK                         | σs < σ adrn                   | OK                          |
| Cálculo do gancho        | 46 [cm]<br>NÃO OK          |                               |                             |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Sendo:

h calc: altura calculada da sapata, com dimensões múltiplas de 5 cm para facilitar na execução;

h const: altura construída da sapata, definida conforme as seguintes condições: se h calc for menor ou igual a h0, então h const assume o valor de h0, indicando uma sapata sem tronco de pirâmide. Caso h calc seja maior que h0, h const corresponderá à altura total da sapata;

h0: altura da sapata sem considerar o tronco de pirâmide;

V sapata: Volume total da sapata;

G sapata: Força Peso exercida pela sapata;

σs: Tensão Solicitante da sapata no solo.

Uma área de impressão foi criada para fornecer informações do cliente, contato, obra, endereço, detalhes das fundações, verificações realizadas nos cálculos e uma imagem guia para interpretação das fundações, representada na Figura 17.

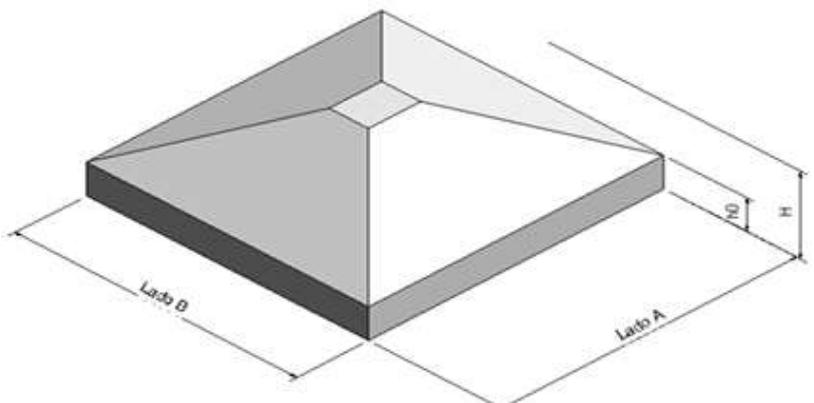
Figura 17: Área de impressão da Planilha Eletrônica.

|                   |                                      |
|-------------------|--------------------------------------|
| Nome do cliente:  | UFJF                                 |
| Contato:          | Gabriel Galil Toledo                 |
| Obra:             | Projeto TCC II                       |
| Endereço:         | Universidade Federal de Juiz de Fora |
| Número da sapata: | S01                                  |

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Dimensões da Sapata: | CONFERÊNCIAS    |
| Lado A 0,70 m        | Base SIM        |
| Lado B 0,60 m        | Ancoragem OK    |
| Altura H 0,20 m      | Tensão OK       |
| Altura H0 0,20 m     | Cisalhamento OK |

Referências



Observações:

Fonte: Autoria própria, 2024.

Por fim, uma última aba foi criada de modo a compilar os resultados dos elementos de fundação, demonstrada na Figura 18.

Figura 18: Compilado dos resultados dos cálculos.

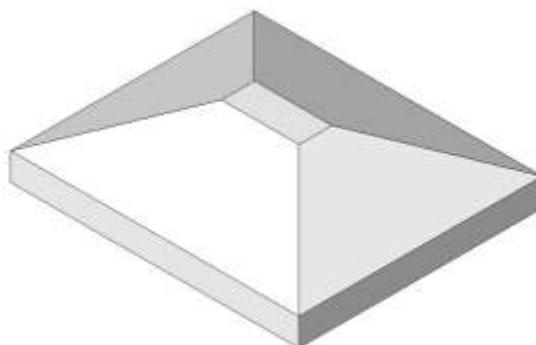
| RESUMO |                   |      |      |      |
|--------|-------------------|------|------|------|
| Sapata | Medidas da Sapata |      |      |      |
|        | A                 | B    | h    | h0   |
|        | (m)               | (m)  | (m)  | (m)  |
| S01    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S02    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S03    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S04    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S05    | 0,80              | 0,70 | 0,20 | 0,20 |
| S06    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S07    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S08    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S09    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S10    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S11    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S12    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S13    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S14    | 0,95              | 0,85 | 0,25 | 0,20 |
| S15    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S16    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| S17    | 0,80              | 0,70 | 0,20 | 0,20 |
| S18    | 0,70              | 0,60 | 0,20 | 0,20 |

Fonte: Autoria própria, 2024.

### 4.3. FAMÍLIA BIM PARAMETRIZADA

Posteriormente à confecção da planilha digital, foi modelada, no software Autodesk Revit 2023 (AUTODESK INC., 2024), uma família BIM parametrizada, sendo uma sapata de concreto armado cujo objetivo também é dimensionar de acordo com as informações inseridas pelo usuário, representada pela Figura 19.

Figura 19: Família de Sapata Modelada



Fonte: Autoria própria, 2024

Para isso, inicialmente, foi modelada apenas uma família sem parâmetros inseridos, apenas com sua geometria definida. Posteriormente, parâmetros de tipo foram criados e vinculados às cotas referentes às dimensões A e B da base do elemento estrutural, bem como as dimensões do pilar associado, como mostra a Figura 20.

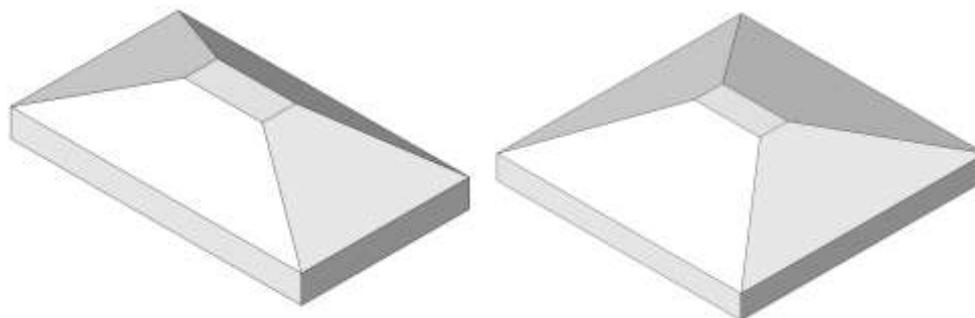
Figura 20: Parâmetros de Instância Relativos às Dimensões da Sapata (Dimensões em metro).

| Parâmetro                     | Valor  |
|-------------------------------|--------|
| <b>Construção</b>             |        |
| Dimensão a do Pilar (padrão)  | 0.7000 |
| Dimensão b do Pilar (padrão)  | 0.3000 |
| Dimensão A da Sapata (padrão) | 2.6000 |
| Dimensão B da Sapata (padrão) | 2.2000 |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Dessa forma, o elemento estrutural poderá ter quaisquer dimensões que sejam possíveis, assim como demonstrado na Figura 21.

Figura 21: Demonstração das Formas e Dimensões Possíveis com a Parametrização das Dimensões da sapata.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A partir desse momento, todas as informações necessárias para os cálculos tiveram seus parâmetros criados também, sejam eles destinados a cálculos ou ao recolhimento de informações. Nessa etapa, houve uma dificuldade maior para os cálculos devido a dois impasses:

1. O primeiro, referente à limitação do software perante algumas fórmulas usadas na planilha confeccionada utilizando o Microsoft Excel, visto que não havia todas as fórmulas usadas, como, por exemplo, a fórmula =MÁXIMO, que retorna o maior valor entre os selecionados. Para isso, algumas correções

foram feitas utilizando comandos, em inglês, que são aceitos pelo Revit 2023, como por exemplo o =IF;

2. Por último, foi necessário que houvesse maior cuidado com as unidades de medida, uma vez que o software não considera os valores inseridos como um número simples, mas considera suas unidades nos cálculos, realizando análises dimensionais para obter o resultado coerente. Assim, cada parâmetro inserido foi configurado anteriormente, como a disciplina e tipo do parâmetro, representados pelas Figuras 22 e 23.

Figura 22: Escolha da Disciplina do Parâmetro

Propriedades de parâmetros

Tipo de parâmetro

Parâmetro de família  
(Não pode aparecer em tabelas ou identificadores)

Parâmetros compartilhados  
(Pode ser compartilhado por múltiplos projetos e famílias, exportado para ODBC, e aparecer em tabelas e identificadores)

Selecionar... Exportar...

Dados de parâmetro

Nome:

Disciplina:

Estrutural  
Comum  
Elétrica  
Energia  
AVAC  
Infraestrutura  
Tubulação  
Estrutural

Tipo

Instância

Parâmetro do relatório  
(Pode ser utilizado para extrair o valor de uma condição geométrica e incluir em uma fórmula, ou como um parâmetro de tabela)

Descrição da dica de ferramenta:  
<Nenhuma descrição de dica de ferramenta. Edite este parâmetro para gravar

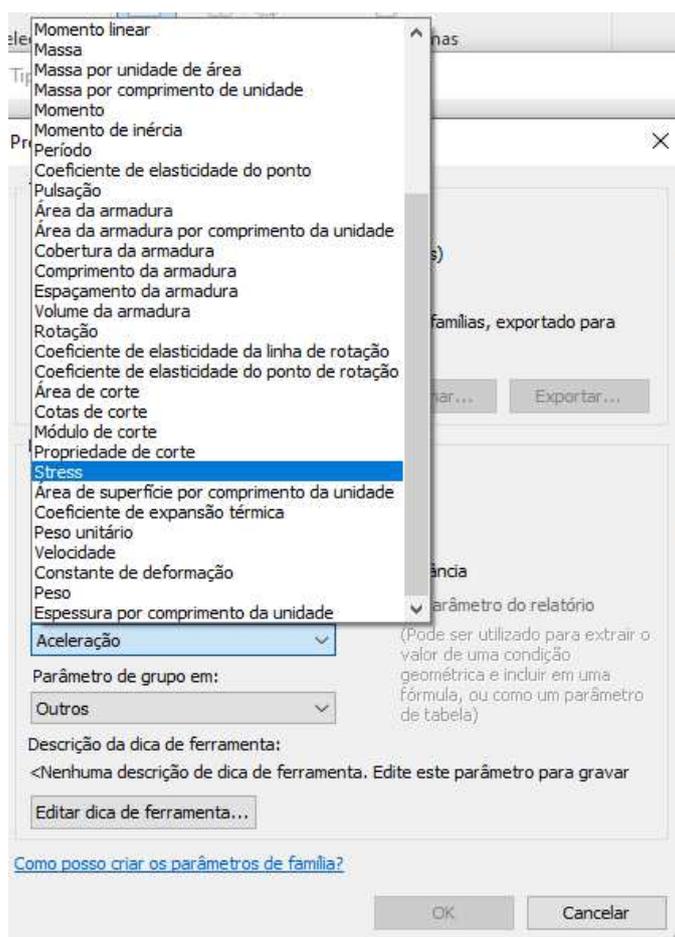
Editar dica de ferramenta...

[Como posso criar os parâmetros de família?](#)

OK Cancelar

Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 23: Escolha do Tipo de Parâmetro



Fonte: Autoria própria, 2024.

Além disso, cada parâmetro foi agrupado para separar adequadamente os tipos de cálculo. O grupo Construção foi destinado às dimensões inseridas pelo usuário para as iterações, enquanto o grupo Estrutural foi reservado para os cálculos de dimensionamento, como altura, área da base mínima,  $f_{ctd}$ ,  $f_{bd}$ , entre outros, conforme representado na Figura 24.

Figura 24:Grupo Estrutural

| Estrutural                        |           |   |                                     |
|-----------------------------------|-----------|---|-------------------------------------|
| Dimensão recomendada (padrão)     | 2.291288  | = sqrt(Área da base mínima)                       |                                     |
| H calculada (padrão)              | 0.6333    | = ((Dimensão A da Sapata - Dimensão               | <input checked="" type="checkbox"/> |
| H construída (padrão)             | 0.6500    | = roundup(H calculada / 0.05 m) * 0.05            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| H0 calculada (padrão)             | 0.2167    | = if(0.2 m > (H construída / 3), 0.2 m, (         | <input checked="" type="checkbox"/> |
| H0 construída (padrão)            | 0.2500    | = roundup(H0 calculada / 0.05 m) * 0.0            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Área da base mínima (padrão)      | 5.250000  | = (Solicitação * 1.05 S/m <sup>2</sup> ) / (σadm) |                                     |
| Diferença de dimensões A (padrão) | 1.9000    | = (Dimensão A da Sapata - Dimensão                | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Diferença de dimensões B (padrão) | 1.9000    | = (Dimensão B da Sapata - Dimensão                | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Área adotada (padrão)             | 5.720     | = (Dimensão A da Sapata * Dimensão                |                                     |
| fctd                              | 1.282482  | = (((Classe do Concreto ^ (2 / 3)) * 0.2          |                                     |
| fbd                               | 2.885584  | = (η1 * η2 * η3 * fctd)                           |                                     |
| lb                                | 60.269609 | = ((Bitola das barras do pilar / 4) * ((Cla       |                                     |
| α1                                | 0.700000  | = if(Possui gancho = 1, 0.7, 1)                   |                                     |
| η1                                | 2.250000  | = if(Classe do Aço = 50, 2.25, 1)                 |                                     |
| η2                                | 1.000000  | = if(Zona = 1, 1, 0)                              |                                     |
| η3                                | 1.000000  | = if(Bitola das barras do pilar > 32, 0.92        |                                     |

Fonte: Autoria própria, 2024.

O grupo de Análise Estrutural foi dedicado às verificações relativas ao cisalhamento, tensão na base e ancoragem, assim como ao cálculo do volume, tensão, ancoragem mínima, entre outros parâmetros essenciais. Para aprimorar a clareza dos cálculos e evitar quaisquer ambiguidades por parte do usuário, foram criados três parâmetros de texto específicos para separar essas verificações.

Além disso, dentro do grupo de Análise Estrutural, foram inseridos quatro parâmetros de texto adicionais, com o intuito de explicitar os resultados quanto à conformidade das verificações. Esses parâmetros incluem as três verificações previamente mencionadas e uma quarta, que é a proporção de crescimento das dimensões em ambos os lados, quando comparadas às do pilar e às respectivas da sapata. A organização e distribuição desses grupos de parâmetros são ilustradas nas Figuras 25 e 26.

Figura 25: Grupo Análise Estrutural

| Análise estrutural                       |              |  |
|--|--------------|--|
| Verificação ao Cisalhamento (padrão)     |              | =  |
| $\tau_{sd}$ (padrão)                     | 1.372549 MPa | = (Solicitação * 1.4) / (((2 * Dimensão a do Pilar) + (Dim         |
| $\tau_{Rd}$ (padrão)                     | 4.339286 MPa | = (((0.27 MPa * (1 - (Classe do Concreto / 250))) * (Classe        |
| Verificação da Ancoragem (padrão)        |              | =  |
| lb necessário (m) (padrão)               | 21.973295    | = ( $\alpha_1$ * lb * (AS calculado / (Quantidade de barras do pil |
| lb mínimo (m) (padrão)                   | 18.080883    | = if((0.3 * lb) > (10 * (Bitola das barras do pilar / 10)), if((   |
| Verificação da Tensão na Base (padrão)   |              | =  |
| Volume sapata (m <sup>3</sup> ) (padrão) | 2.778        | = (((((H - H0) / 3) * ((Dimensão A da Sapata * Dimensão            |
| Gsapata (padrão)                         | 69.45 kN     | = [Volume sapata (m <sup>3</sup> )] * $\gamma$ concreto            |
| $\sigma_s$ (padrão)                      | 0.158203 MPa | = (Gsapata + Solicitação) / (Área adotada)                         |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 26: Grupo Resultados da Análise

| Resultados da análise                                  |          |   |
|--|----------|---|
| (A-a)=(B-b) (padrão)                                   | SIM      | = if(Diferença de dimensões A = Diferença               |
| Conformidade da Verificação ao Cisalhamento (padrão)   | CONFORME | = if( $\tau_{sd}$ < $\tau_{Rd}$ , "CONFORME", "NÃO CON  |
| Conformidade da Verificação da Ancoragem (padrão)      | CONFORME | = if(lb necessário > lb mínimo, "CONFOR                 |
| Conformidade da Verificação da Tensão na Base (padrão) | CONFORME | = if( $\sigma_s$ < $\sigma_{adm}$ , "CONFORME", "NÃO CO |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os dados necessários para o usuário incluem a inserção da solicitação em kN e a Tensão Admissível em MPa. Adicionalmente, há um grupo denominado "Outros" destinado às informações pertinentes às classes do concreto e aço, bitola da armadura, entre outros detalhes técnicos. É importante destacar que os valores inseridos nesse grupo não possuem a precisão indicada pela quantidade de casas decimais mostradas, mas, por limitação do próprio software, as informações são automaticamente exibidas com essa precisão. Esses grupos são representados pelas Figuras 27 a 29, respectivamente.

Figura 27: Grupo Dados e Outros

| Dados   |                         |
|---|-------------------------|
| Solicitação (padrão)                            | 1000.00 kN              |
| $\sigma_{adm}$ (padrão)                         | 0.200000 MPa            |
| Outros  |                         |
| Classe do Concreto (MPa)                        | 25.000000               |
| Classe do Aço (MPa)                             | 50.000000               |
| Quantidade de barras do pilar (un)              | 6.000000                |
| Bitola das barras do pilar (mm)                 | 16.000000               |
| Majoração X                                     | 1.400000                |
| Majoração Y                                     | 1.050000                |
| AS calculado (cm <sup>2</sup> ) (padrão)        | 5.000000                |
| Possui gancho                                   | 1.000000                |
| Zona  | 1.000000                |
| $\alpha$ (°)                                    | 60.000000               |
| $\gamma$ concreto (kN/m <sup>3</sup> ) (padrão) | 25.00 kN/m <sup>3</sup> |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Salienta-se que os parâmetros “Possui gancho” e “Zona” têm uma dica de ferramenta que é exposta quando o usuário permanece com o cursor do mouse acima desses parâmetros, como representado nas Figuras 28 e 29, respectivamente.

Figura 28: Dica de Ferramenta do Parâmetro “Possui gancho”

Caso tenha gancho, digite 1  
Caso não, digite 0

Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 29: Dica de Ferramenta do Parâmetro “Zona”

Zona de Boa Aderência: digite 1  
Zona de Má Aderência: digite 0

Fonte: Autoria própria, 2024.

Assim, para verificar a precisão dos resultados, foram aplicadas as solicitações de cada pilar, associadas a uma tensão admissível de 0,42 MPa, escolhida para garantir a segurança, uma vez que não foi possível inserir parâmetros de cálculo para a tensão admissível devido à falta de recursos para a inserção da sondagem SPT no Revit 2023. Dessa forma, todas as sapatas mostraram coerência nos resultados quando comparados com a planilha eletrônica.

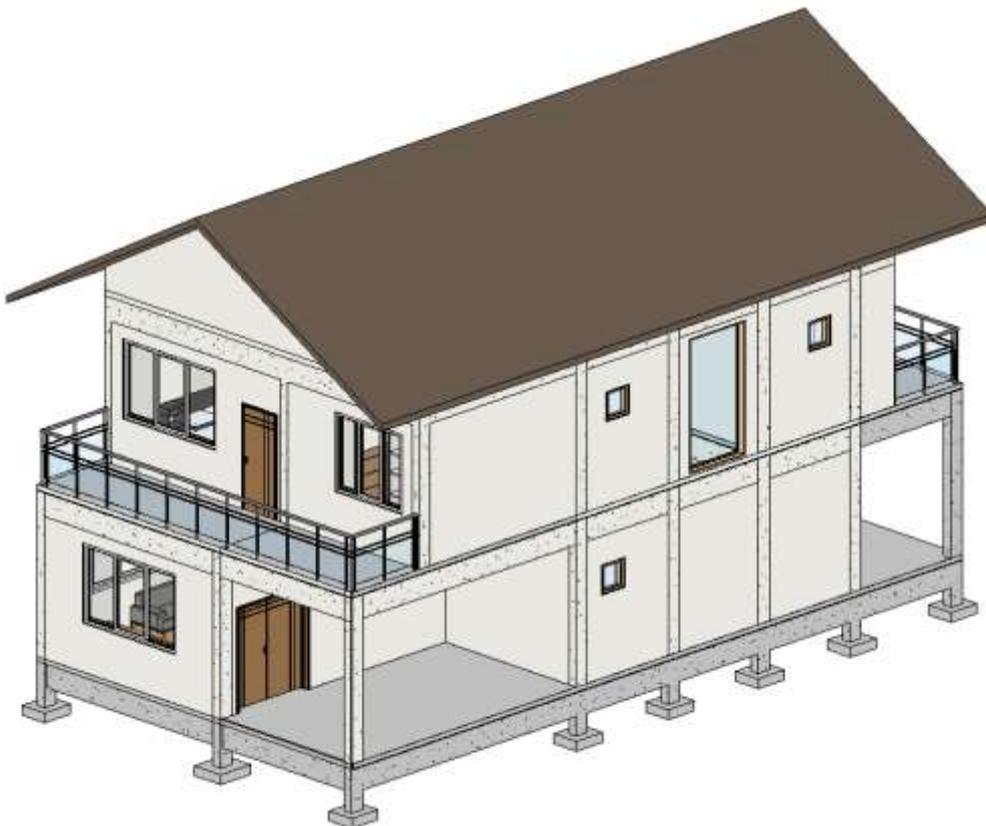
Por fim, após a inserção de todas as sapatas aos seus respectivos pilares e a realização dos cálculos, obteve-se a modelagem final. A vista da modelagem estrutural finalizada está representada na Figura 30, e a vista do empreendimento está na Figura 31.

Figura 30: Modelagem Estrutural Finalizada.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 31: Modelagem do Empreendimento Completo na Vista de Coordenação.



Fonte: Autoria própria, 2024.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Com base no exposto neste documento, foi possível, de maneira efetiva, produzir uma família constituinte de Modelo BIM capaz de retornar um elemento de fundação superficial de concreto armado de carga centrada com as dimensões calculadas e com as verificações quanto ao cisalhamento, tensão na base e ancoragem coerentes com os parâmetros normatizados. Este modelo não apenas cumpre com os requisitos normativos, mas também demonstra a viabilidade de integrar cálculos estruturais diretamente no ambiente BIM, facilitando a visualização e análise dos projetos.

Além disso, foi desenvolvida uma planilha eletrônica eficiente para quaisquer casos que envolvam o uso de sapatas de concreto armado de cargas centradas, conferindo maior credibilidade aos cálculos e oferecendo uma ferramenta adicional para validação de resultados. A criação desta planilha reflete a integração entre o BIM e ferramentas tradicionais de cálculo, possibilitando uma verificação cruzada e assegurando a precisão dos dados.

Um projeto arquitetônico, de fundações e uma modelagem estrutural foram criados, evidenciando mais uma vantagem do uso do BIM: a compatibilização de projetos. A redução de erros e retrabalho, contribuindo para a eficiência e economia do processo de projeto e execução, foi estudada na revisão bibliográfica, que abordou como a interoperabilidade e a integração de sistemas são cruciais para a eficácia e eficiência na construção. A revisão bibliográfica destacou que a integração eficaz de dados e a colaboração entre diferentes disciplinas são essenciais para a redução de ineficiências e custos elevados, reforçando a importância do BIM para melhorar a coordenação e a gestão dos projetos.

Assim, conclui-se que o uso do BIM proporcionou um processo mais prático e ágil, eliminando a necessidade de ferramentas adicionais para cálculos das fundações e apresentando valores de verificação próximos aos obtidos pela planilha eletrônica. As dimensões podem ser ajustadas automaticamente conforme a determinação do usuário, reduzindo o tempo necessário para verificação em outros sistemas e facilitando a modelagem com base nos valores calculados.

Contudo, o Modelo BIM apresentou limitações na inserção de informações sobre a Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT), exigindo cálculos prévios para a determinação das características do solo. Futuras atualizações poderiam incluir a integração de dados geotécnicos diretamente no ambiente BIM, ampliando a funcionalidade e a precisão dos modelos. Além disso, seria benéfico explorar a automação de processos para integrar ainda mais os cálculos estruturais e geotécnicos com a modelagem BIM, promovendo uma solução ainda mais robusta e eficiente.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15965-2: Sistema de classificação da informação da construção. Parte 2: Características dos objetos da construção.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2023. 284 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122:2022 – Projeto e Execução de Fundações.** Rio de Janeiro, 2022. 153 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484:2020 – Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2020. 34 p.

AUTODESK. AutoDesk Knowledge Network. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/support>> Acesso em: 15 jul. 2024.

BARATA, Fernando Emmanuel. **Propriedades Mecânicas dos Solos: uma introdução ao projeto de fundações.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984.

BARLISH, K.; SULLIVAN, K. **How to measure the benefits of BIM—A case study approach.** *Automation in Construction*, v. 24, p. 149-159, 2012.

BRASIL. **Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020. Institui a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling - BIM.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 abr. 2020. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/decreto/D10306.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10306.htm)>. Acesso em: 23 nov. 2023.

CAI, Y.; YANG, S. **A novel GIM-based approach to soil-structure interaction analysis in BIM.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(4), 04020012, 2020a.

CAI, Y.; YANG, S. **Improving the accuracy of geotechnical design using BIM.** *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 146, n. 3, p. 04019018, 2020b.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIEIRO, José Henrique. **Fundações Diretas: Projeto Geotécnico.** 4. reimpressão. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

EL-SHARAFI, A.; SHRESTHA, P.; HEGDE, S. **BIM-GIM integration framework for enhanced geotechnical modeling.** *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(5), 04019038, 2019b.

EL-SHARAFI, A.; SHRESTHA, P.; HEGDE, S. **Building Information Modeling for geotechnical engineering: A review.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 145, n. 12, p. 04019080, 2019a.

GALLAHER, M. P. et al. **Cost analysis of Inadequate Interoperability in the US. Capital Facilities Industry.** Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce Technology Administration, 2004.

GODOY, R. L. **Estimativa do Ângulo de Atrito Interno.** In: **Métodos de Investigação Geotécnica.** 1983.

GONÇALVES, Juliane Cristina. **A influência dos recalques das fundações no comportamento de edificações ao longo do tempo.** Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

LAISERIN, J. **“Foreword.” NIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Architects, Engineers, Contractors and Fabricators.** John Wiley and Sons, Hoboken, NK, 2008.

MARANGON, Márcio. **Capacidade de carga dos solos.** 2018. 18 f. Nota de aula, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

MEYERHOF, G. G. **Some recente research on the bearing capacity of foundations,** *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v.1, n.1, p. 16-26, 1963.

MEYERHOF, G. G. **The ultimate bearing capacity of foundations,** *Geotechnique*, Londres, n.2, 1951.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS (MDIC). **Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – BIM**. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/building-information-modelling-bim/26-11-2018-estrategia-BIM-BR-2.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

OLATUNJI, O. A.; SHER, W.; GU, N. **Building Information Modelling and Quantity Surveying Practice**. *Emirates Journal for Engineering Research*, v. 15, n. 1, p. 67-70, 2010.

PAUWELS, P.; ZHANG, S.; LEE, Y.-C. **Semantic web technologies in AEC industry: A review**. *Automation in Construction*, v. 73, p. 45-55, 2017.

ROJAS, María J. et al. **BIM use assessment (BUA) tool for characterizing the application levels of BIM uses for the planning and design of construction projects**. *Advances in Civil Engineering*, v. 2019, n. 1, p. 9094254, 2019.

SACKS, Rafael et al. **Manual de BIM: um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2021.

SUCCAR, B. **Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders**. *Automation in Construction*, v. 18, n. 3, p. 357-375, 2009.

SUN, J.; WANG, X.; WANG, J. **A new framework for integrating geotechnical data into BIM**. *Automation in Construction*, v. 83, p. 23-30, 2017b.

SUN, J.; WANG, X.; WANG, Y. **Geotechnical information modelling (GIM) for project lifecycle management**. *Automation in Construction*, 73, 13-24, 2017a.

TEIXEIRA, A. **Estimativa do ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e coesão em solos arenosos a partir de correlações empíricas**. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

TEIXEIRA, A.; GODOY, L. (1972). **Avaliação da Coesão dos Solos com Base no Ensaio SPT**. *Revista de Engenharia Civil*, v. 5, n. 2.

TERZAGHI, K. **theoretical soil mechanics**. new york: john wiley & sons, inc., 1943

ZHANG, X.; ARAYICI, Y. BIM and the built environment. In: **Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations**. 2013.

ZHOU, C.; LIU, Y.; ZHANG, J. **Enhancing geotechnical engineering analysis using BIM: A case study**. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 144, n. 7, p. 04018043, 2018a.

ZHOU, C.; LIU, Y.; ZHANG, J. **Integrating BIM and geotechnical models for subsurface information management**. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 433-442, 2018b.