



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE BALSAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

NADIA CRUZ DE JESUS

**ANÁLISE ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO DE RECALQUE DIFERENCIAL EM
EDIFÍCIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO- CAMPUS BALSAS**

**BALSAS
2026**

NADIA CRUZ DE JESUS

**ANÁLISE ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO DE RECALQUE DIFERENCIAL EM
EDIFÍCIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO- CAMPUS BALSAS**

Trabalho de conclusão de curso na modalidade monografia, submetido à coordenação de engenharia civil da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Beserra Costa



Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Cruz de Jesus, Nadia.

Análise Estrutural e investigação de recalque diferencial em edifício da Universidade Federal do Maranhão- Campus Balsas / Nadia Cruz de Jesus, Celso Henrique Rodrigues Borgneth, Willame Braga Lima. - 2025. 124 f.

Orientador(a): Daniel Beserra Costa.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, Balsas, 2025.

1. Interação Solo Estrutura. 2. Fundações Superficiais. 3. Recalque Diferencial. I. Beserra Costa, Daniel. II. Rodrigues Borgneth, Celso Henrique. III. Braga Lima, Willame. IV. Título.

NADIA CRUZ DE JESUS

**ANÁLISE ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO DE RECALQUE DIFERENCIAL EM
EDIFÍCIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO- CAMPUS BALSAS**

Trabalho de conclusão de curso na modalidade monografia, submetido à coordenação de engenharia civil da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Beserra Costa

Data de Aprovação 21/01/2026

Prof. Dr. Daniel Beserra Costa- Orientador

Prof. Esp. Celso Henrique Rodrigues Borgneth- Examinador 1

Prof. Me. Willame Braga Lima- Examinador 2

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, fonte de força e sabedoria em toda a trajetória.
Aos meus pais, Antônio Alves e Cinária Alves, pelo apoio e confiança.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre ter me iluminado, dando forças. Sempre sendo o meu Pastor, Amém.

Agradeço aos meus pais, por sempre me apoiarem e estarem comigo independente de tudo.

Ao meu orientador, obrigado pela ajuda, pelos conselhos, pela paciência e ajuda.

Aos meus amigos, por ajudarem e incentivarem a realização do presente trabalho.

À Universidade Federal do Maranhão campus Balsas, que tenho tanto orgulho de fazer parte.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise da interação solo-estrutura (ISE) e uma investigação de recalques diferenciais no bloco pedagógico da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Campus Balsas. O estudo justifica-se pela observação de manifestações patológicas evidentes, como trincas e fissuras estruturais, que comprometem a durabilidade e podem afetar a segurança do edifício. O objetivo geral constitui em analisar as reações da ISE com foco nos recalques diferenciais por meio de análise de cargas em software Eberick 2023, avaliações em campo e modelos teóricos. A metodologia aplicada realizou a análise in loco através de levantamento altimétrico, a definição do perfil geotécnico e do carregamento sobre as fundações, e a aplicação de modelos teóricos de previsão de recalque, incluindo os modelos de Elasticidade, Boussinesq, Barata e Burland e Burbidge. Adicionalmente, realizou-se a modelagem estrutural no software Eberick para analisar a transferência de cargas. Os resultados das análises altimétricas revelaram um quadro crítico nos módulos 2, 3 e 5, com deslocamentos verticais de até 7mm. Na comparação entre os modelos matemáticos e dos dados de campo, o método Burland e Burbidge apresentou discrepância significativas com previsões de até 195mm, enquanto as medições reais indicaram um máximo de 47mm. Em contrapartida, o método Boussinesq demonstrou resultados mais próximos da realidade observada. A pesquisa conclui que a desconsideração da deformabilidade do solo na fase de projeto foi o fator determinante para o surgimento das patologias, evidenciando que a estrutura e o solo atuam de forma conjunta na redistribuição de esforços.

Palavras-chaves: Interação Solo-Estrutura (ISE). Recalque Diferencial, Manifestações Patológicas, Modelagem Numérica. Fundações Superficiais.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of soil-structure interaction (ssi) and an investigation of differential settlements in the teaching block of the federal university of maranhão (ufma), balsas campus. The study is justified by the observation of evident pathological manifestations, such as cracks and structural fissures, which compromise the durability and may affect the safety of the building. The general objective is to analyze the reactions of ssi focusing on differential settlements through load analysis in eberick software, field evaluations, and theoretical models. The methodology applied involved in-situ analysis through altimetric surveying, definition of the geotechnical profile and the loading on the foundations, and the application of theoretical settlement prediction models, including the elasticity, boussinesq, barata and burland, and burbridge models. Additionally, structural modeling was performed in eberick software to analyze load transfer. The results of the altimetric analyses revealed a critical situation in modules 2, 3, and 5, with vertical displacements of up to 7 mm. Comparing the mathematical models with field data, the burland and burbridge method showed significant discrepancies, with predictions of up to 195 mm, while actual measurements indicated a maximum of 47 mm. In contrast, the boussinesq method demonstrated results closer to the observed reality. The research concludes that the disregard for soil deformability during the design phase was the determining factor in the emergence of the pathologies, demonstrating that the structure and the soil act together in the redistribution of stresses.

Keywords: Soil-structure interaction (ssi). Differential settlement. Pathological manifestations. Numerical modeling. Shallow foundations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fundações superficiais e profundas.....	17
Figura 2 - Principais tipos de fundações superficiais.....	19
Figura 3 - Principais tipos de fundações profundas.....	20
Figura 4 - Classificação do solo de acordo com sua granulometrias.....	21
Figura 5 - Sistema Estrutural.	22
Figura 6 - Diferentes contribuições de estruturas-galpão, b) caixa d'água, c) edifício.	24
Figura 7 - Carregamentos simultâneos.....	25
Figura 8 - Carregamentos não simultâneos.....	25
Figura 9 - Terceiro prédio construído entre dois existentes.....	26
Figura 10 - Prédios construídos vizinhos a um já existente.....	27
Figura 11 - Casos de interação solo-estrutura.	28
Figura 12 - Profundidade da investigação insuficiente	33
Figura 13 - Sobreposição de tensões.	33
Figura 14 - Fissuras e trincas em solos assentes em aterro	34
Figura 15 - Rebaixamento do lençol freático.....	35
Figura 16 - Movimentos verticais da fundação e medidas angulares.	36
Figura 17 - Local de estudo de caso, UFMA- Campus Balsas.....	47
Figura 18- Coleta de dados in loco	48
Figura 19- Análise geral de dados in loco.....	53
Figura 20- Perfil Altimétrico	54
Figura 21- Análise geral de dados in loco.....	55
Figura 22- Módulo 1- Pátio de Entrada.....	56
Figura 23- Variações altimétricas módulo 1	57
Figura 24- Manifestações patológicas -Módulo 1.....	59

Figura 25-- Módulo 2- Salas de aulas/corredores.	60
Figura 26- Módulo 2 plotagem 3D.	61
Figura 27- Manifestações patológicas- Módulo 2.....	63
Figura 28- Módulo 3- Salas de aula, auditório e corredor.	64
Figura 29- Módulo 3 -Plotagem 3D.....	65
Figura 30- Manifestações patológicas módulo 3.....	67
Figura 31- Módulo 4- Salas de Aula e corredores.....	68
Figura 32- Módulo 4 Plotagem 3D.....	69
Figura 33- Manifestações patológicas- Módulo 4.....	70
Figura 34- Módulo 5- Sala de aulas, corredor e auditório (refeitório).....	71
Figura 35- Módulo 5 Plotagem 3D.....	72
Figura 36- Manifestações patológicas- Módulo 5.....	73
Figura 37- Módulo 6- Pátio e cantina.....	74
Figura 38- Módulo 6 plotagem 3D.	75
Figura 39- Manifestações patológicas- Módulo 6.....	76
Figura 40- Módulo 7- Banheiros.	77
Figura 41- Módulo 7 plotagem 3D.	78
Figura 42- - Pórtico 3D Software Eberick.....	80
Figura 43- Análise estrutural bloco pedagógico	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISE	ISE Interação Solo Estrutura
CBR	California Bearing Ratio
ISC	Índice de Suporte Califórnia
SPT	Standard Penetration Test (Ensaio de Penetração Padrão)
CPT	Cone Penetration Test (Ensaio de Penetração de Cone)
CPTu	Cone Penetration Test with pore pressure measurement/ Ensaio de Penetração de Cone com Medida de Poropressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	JUSTIFICATIVA	12
3	OBJETIVO	14
	3.1 Objetivo Geral	14
	3.2 Objetivos Específicos	14
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
	4.1 Definição de Patologias em edificações	15
	4.2 Impactos Técnicos e Econômicos	15
	4.3 Fundações	17
	4.3.1 Fundações Superficiais (ou rasa ou direta)	18
	4.3.2 Fundações Profundas	19
	4.4 Estudo do Solo	20
	4.5 Investigações do Solo	21
	4.6 Interação Solo-Estrutura	21
	4.6.1 Rigidez relativa estrutura-solo	23
	4.6.2 Edificações vizinhas	24
	4.6.3 Influência do tempo	27
	4.6.4 Número de Pavimentos	29
	4.6.5 Comportamento do solo ao longo do tempo	29
	4.7 Recalque	29
	4.7.1 Tipos de Recalques	30
	4.7.2 Efeitos de Recalques em estruturas	31
	4.8 Causas dos Recalques nas Fundações	32
	4.8.1 Ausência de Investigação do Solo	32
	4.8.2 Superposição de Tensões	33
	4.8.3 Fundações Sobre Aterros	34
	4.8.4 Rebaixamento do Lençol Freático	34
	4.9 Recalque Diferencial	35
	4.9.1 Deformações em pilares e vigas	37
	4.9.2 Impactos de Recalque diferencial em solos coesivos	37
	4.10 Modelos Teóricos Para Previsão de Recalque	37

4.10.1 Teoria da Elasticidade	39
4.10.2 Solução de Boussinesq (1885)	40
4.10.3 Método de Schmertmann (1970)	42
4.10.4 Método de Barata (1984)	43
4.10.5 Método de Burland e Burbidge (1985)	45
5 MATERIAL E MÉTODOS	46
5.1 Metodologia da Pesquisa	47
5.1.1 Análise In loco	47
5.1.2 Seleção do Perfil geotécnico	48
5.1.3. Definição do Carregamento e da Fundação	49
5.1.4 Aplicação de Modelos teóricos	50
5.1.5 Análise dos Resultados	51
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
6.1 Análise in loco	52
6.2. Seleção do Perfil Geotécnico	79
6.3. Análise de Cargas em software Eberick	79
6.4. Aplicação de Modelos teóricos	81
7 CONCLUSÕES	101
8 SUGESTÕES FUTURAS	103
9 REFERÊNCIAS	104

1 INTRODUÇÃO

O sistema estrutural de uma edificação consiste basicamente de três segmentos, são eles as superestruturas que são compostas pelo conjunto de lajes, vigas e pilares, as infraestruturas que corresponde às fundações e por fim o maciço de solo (TONDO, 2023). Todos esses elementos interagem a fim de se obter um equilíbrio estático do conjunto, no qual as superestruturas, que resistem às solicitações de cargas, transferem-nas para as infraestruturas que por sua vez as transferem para o solo (ROCHA, 2020). A base de qualquer estrutura sólida e segura encontra-se o elemento muitas vezes invisível, mas indispensável: às fundações. Estas são o elo entre a edificação e o solo, e sua importância na garantia de segurança e estabilidade em uma edificação (RIBEIRO; DE OLIVEIRA; DE OLIVEIRA, 2023).

Segundo Dinis (2024) a fundação é definida como um elemento de transição entre a estrutura e o solo, onde toda a carga da superestrutura é absorvida e transferida ao solo, de modo que, os elementos de fundações apresentam deformabilidade que interferem na rigidez do conjunto estrutural de um edifício. Dessa forma, o solo sendo um material natural, suas características e propriedades apresentam grande variabilidade, tornando-se assim necessário uma análise aprofundada, uma vez que, o mal desempenho dessas atividades podem ocasionar em patologias nas edificações.

Historicamente, a análise das estruturas e do subsolo era realizada de forma independente. Os engenheiros estruturais tratavam os apoios como deslocáveis, calculando os esforços sem considerar a influência real da rigidez do solo. Conseqüentemente, o dimensionamento das fundações baseava-se em carregamentos teóricos, sem levar em conta a deformabilidade do terreno e sua influência durante a construção e ao longo da vida útil da edificação (GAVIOLI; DE ALBUQUERQUE, 2016).

Atualmente, mesmo com o avanço tecnológico, ainda há necessidades de metodologias consolidadas e softwares capazes de representar de forma precisa a interação solo estrutura (ISE). Por isso, muitos projetistas continuam a adotar modelos simplificados, desconsiderando a participação do solo no comportamento global da estrutura (ANTONIAZZI, 2011). Não considerar a ISE se mostra mais grave quando a

fundação está apoiada em solos que possuem maior deformabilidade como argilas, com consequências tanto na segurança, na economia e manifestações patológicas. (FERNANDES, 2014).

Segundo Gusmão (1990), a interação solo-estrutura gera dois efeitos marcantes: a redistribuição de esforços entre os elementos estruturais, principalmente as cargas nos pilares, e a uniformização dos recalques, consequência da solidarização dos elementos estruturais que agregam rigidez à estrutura. O autor alerta sobre o efeito da redistribuição dos esforços, pois pode provocar danos à estrutura, como esmagamento de pilares periféricos devido à sobrecarga.

Os autores Cintra, Aoki e Albiero (2010) em seus estudos aprofundados de fundações diretas, afirmam que todos edifícios recalcam, e com base nisso, a hipótese de apoios fixos dos pilares geralmente adotada no cálculo estrutural do edifício é considerada ficção. Os autores definem ainda o recalque como o deslocamento vertical para baixo da base da sapata em relação a um referencial fixo, indeslocável. Os exemplos mais comuns de recalque são a torre de Pisa na Itália, Catedral da cidade do México e alguns prédios no município de Santos (São Paulo). As patologias decorrentes principalmente de recalque podem comprometer a segurança da estrutura, ou ainda habitantes do edifício (SANTOS, 2014).

A previsão de recalque em fundações superficiais por meio de modelos matemáticos como a teoria da elasticidade é ainda abordado na atualidade. Nos modelos semi-empíricos como as soluções clássicas de Boussinesq (1885), é amplamente utilizada para estimar a distribuição de tensões no solo sob carregamentos. O método Schmertmann (1970) consolidou-se como uma das abordagens mais empregadas para estimar deformações a partir de ensaios geotécnicos, como abordado por Souza (2018). No contexto brasileiro o método de Barata destaca-se pela utilização de correlações baseado em provas de cargas e comportamento em solos locais. Destaca-se ainda o método de Bourland e Burdige oferece alternativas para previsão de recalque, principalmente em solos granulares evidenciando a influenciada pelas tensões efetivas e as dimensões da fundação (BUNGENSTAB, 2011).

Diante da relevância da ISE nos projetos estruturais, este estudo busca analisar a influência dessa interação no desempenho das edificações, considerando que a desconsideração desse fator nos métodos convencionais pode comprometer a segurança e estabilidade das construções. O trabalho tem como foco um estudo de caso do bloco pedagógico da Universidade Federal do Maranhão/Campus Balsas, no qual serão realizados comparativos entre dados obtidos em campo e modelos matemáticos, como equação de modelo da elasticidade, Boussinesq, Schmertmann, método Barata, Burland e Burbidge, a fim de identificar variáveis determinantes e avaliar possíveis danos ocasionados por recalque, contribuindo para a aprimoração a precisão e confiabilidade dos projetos geotécnicos e estruturais no polo universitário.

2 JUSTIFICATIVA

A estabilidade e segurança das estruturas são aspectos fundamentais no desempenho das edificações, as manifestações patológicas nas fundações, em destaque os recalques diferenciais representam uma das principais causas do comprometimento estrutural em edificações. Esse tipo de anomalia pode ocasionar em consequências como fissuras, deformações excessivas, problemas no funcionamento dos elementos estruturais e até risco de colapso, comprometendo a segurança da edificação e a durabilidade da construção (PAVAN, COSTTELA, GUARNIERI, 2014).

Segundo Gusmão (1990) destaca a falta de estudos na ISE na elaboração de projetos no Brasil. O autor ainda destaca as etapas primordiais a serem analisadas durante a elaboração do mesmo, sendo a estimativa da grandeza de recalques e o cálculo da real distribuição de cargas e esforços na estrutura. Mendonça (2012) ressalta a importância da interpretação solo-estrutura, havendo o surgimento de patologias e problemas estruturais graves, muitas vezes ocasionado por recalque diferencial.

Além disso, Gusmão (1990) relatou em seu estudo ainda casos de esmagamento de pilares periféricos no estado de São Paulo e Recife, ocasionada por sobrecarga consequente da redistribuição dos esforços. Em complemento, Mendonça (2012) salienta que, do ponto de vista do custo-benefício, o autor evidencia o

percentual de até 3% do custo total de obra para uma boa investigação geotécnica, sendo assim primordial a etapa em uma edificação levando ao comprometimento de uma execução de qualidade, evitando assim custos de reparos futuros nos quais são superiores ao custo inicial.

Diante disso, o estudo das patologias associadas a recalques diferencial tornasse essencial para compreender o comportamento estrutural das edificações e propor medidas corretivas e eficazes. No presente trabalho, será apresentado o caso específico do edifício pedagógico da Universidade Federal do Maranhão/ Campus 13 Balsas, em que foram observados manifestações patológicas evidentes, como, trincas e fissuras estruturais, que indicam de forma clara a ocorrência de recalques diferenciais e justificam a necessidade de um estudo aprofundado sobre o tema, visando avaliar a segurança e a integridade estrutural do edifício.

Assim, a relevância do estudo se justifica por sua contribuição técnico científica. Em que os resultados poderão subsidiar relatórios de diagnóstico e a recuperação estrutural, oferecendo suporte a futuras intervenções corretivas, manutenções e projetos de reforços. Além ainda, de contribuir para o avanço do conhecimento sobre o comportamento das fundações em solos com características deformáveis, auxiliando no aprimoramento dos métodos de análise da interação solo estrutura. Portanto, este estudo se torna essencial, visando compreender as causas e efeitos das patologias observadas na edificação de estudo, visando buscar a segurança e a confiabilidade das construções, contribuindo assim para estudos de projetos e relatórios de avaliação estrutural no âmbito da Universidade Federal do Maranhão.

3 OBJETIVO

3.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo, analisar as reações da interação solo-estrutura, com foco nos recalques diferenciais do bloco pedagógico (de aulas) do campus Balsas da UFMA por meio de simulações numéricas.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar as manifestações patológicas decorrentes de recalques diferenciais nas estruturas existentes;
- Analisar a distribuição e a transferência de cargas na estrutura por meio de modelagem e simulação no software Eberick.
- Realizar simulações numéricas de recalque para comparação com as condições observadas in loco;
- Avaliar a correlação entre resultados das simulações e os recalques medidos nas edificações;

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Definição de Patologias em edificações

O termo “patologia” é derivado do grego (pathos - doença, e logia - ciência e estudo) e significa “estudo da doença”. Na construção civil, pode-se atribuir patologia ao estudo dos danos ocorridos em edificações. Desta forma, a patologia das construções é a ciência que investiga, de forma sistêmica, estudar os defeitos incidentes nos materiais construtivos, componentes e elementos ou na edificação como um todo, visando diagnosticar as origens e compreender os mecanismos de deflagração. (BOLINA et. al, 2019). Essas patologias podem se manifestar de diversas formas: trincas, fissuras, rachaduras, entre outros. Portanto, por ser encontrada em vários aspectos recebe o nome de manifestações patológicas (ARIVABENE, 2015).

Milititsky et al. (2015), afirmam que podem ocorrer patologias a partir de incertezas quanto às condições do subsolo como ausência de investigação, investigação insuficiente e com falhas e uma má interpretação dos resultados das sondagens. Nesse contexto, é perceptível que alguns fatores podem influenciar no comportamento da fundação, e podem acontecer anterior ao projeto, continuando na construção e terminando com os efeitos de acontecimentos pós-implantação, além da sua possível degradação.

4.2 Impactos Técnicos e Econômicos

As patologias em fundações podem aparecer durante os estudos preliminares do solo, durante a elaboração do projeto, durante a execução da obra ou após a conclusão da obra, porém a causa mais frequente é a ausência ou incompleta investigação do solo. No Brasil, diferentemente de outros países, não existe uma compilação estatística de dados associando as origens e a ocorrência relativa das manifestações patológicas. É difícil estimar as causas mais frequentes de anomalias ou realizar um estudo mais abrangente, com propósito de desenvolver práticas de execução e de projeto que possam reduzir a reprodução de erros já cometidos.

No entanto, nas últimas décadas, a produção de levantamentos regionais, pesquisas científicas e uma literatura reunindo experiências adquiridas — como as

apresentadas por Sampaio (2017), Oliveira (2012) e Alves (2009) — contribuíram para a acumulação de conhecimento sobre os mecanismos de desenvolvimento e as configurações típicas das manifestações patológicas. Esses estudos são bastante relevantes para auxiliar os profissionais a tomar medidas de recuperação, assim como de prevenção, na construção civil (Rezende, 2019).

Entre os estudos de maior relevância, destaca-se o trabalho de Sampaio (2017), que analisou as patologias em fundações decorrentes de recalques diferenciais em edificações no município de Ipatinga-Mg. O autor realizou estudo de caso em que relacionou a ausência de ensaios de sondagem à ocorrência de recalques que provocam fissuras estruturais e problemas de nivelamento em edificações residenciais. No estudo, destacou-se a importância da investigação geotécnica preliminar.

Por conseguinte, o estudo De Oliveira (2012), analisou de forma aprofundada as fissuras, trincas e rachaduras causadas por recalques diferenciais. O autor apresentou uma classificação detalhada dos tipos de manifestações observadas e das respectivas causas, destacando que a presença de distintos solos de fundação e a falta de compatibilidade entre os projeto estrutural e geotécnico são fatores determinantes para o surgimento dessas anomalias. O estudo ainda propôs medidas de intervenções para casos semelhantes, como uso de fundações profundas em locais de solo de baixa resistência e o monitoramento sistemático de deformações estruturais.

Outro trabalho de grande relevância é o levantamento no CREA-GO. O estudo do autor Alves (2009) foi realizado através da análise de 545 relatórios técnicos registrados no CREA-GO, em que teve como objetivo identificar as principais causas e frequências de manifestações patológicas em fundações e estruturas de até 10 anos de idade. Os resultados indicam que mais de 60% das ocorrências estavam associadas à investigação geotécnica insuficiente e à execução inadequada das fundações rasas, reforçando a necessidade de normas e a importância de sondagens em todas as obras

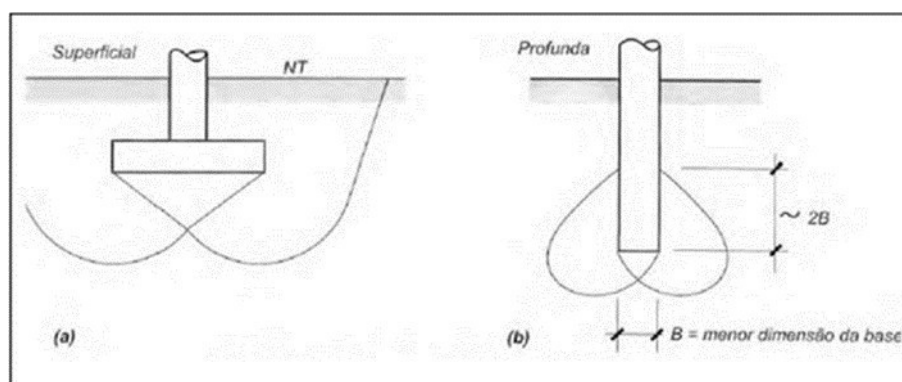
4.3 Fundações

Segundo Milititsky, Consoli e Schnaid (2015, p. 9), uma fundação é o resultado da necessidade de transmissão de cargas ao solo pela construção de uma estrutura. Desse modo, ela desempenha um papel crucial na estabilidade e segurança de um edifício, pois assegura que as forças geradas pelo peso da estrutura e outras cargas sejam distribuídas de maneira adequada para o solo subjacente (Silva, 2024).

Nesse contexto, as fundações são elementos que possuem finalidade em transmitir cargas de uma edificação para o solo de modo que não promova ruptura do terreno na fundação (CALISTO E KOSWOSKI, 2015). De modo que, a escolha do tipo de fundação a ser utilizado em uma edificação será em função da intensidade da carga e da profundidade da camada resistente do solo. Logo, a escolha da fundação é essencial para garantir a estabilidade da estrutura, pois diferentes solos exigem soluções específicas.

É importante destacar que os solos situados em fundações se deformam, e que conseqüentemente, toda fundação tende a sofrer recalque, e que todo acréscimo de tensões corresponde a uma deformação maciço do solo. Diante do exposto, é de suma importância que não sejam ultrapassados os deslocamentos/recalques limites (admissíveis), garantindo que cada edificação mantenha sua funcionalidade e segurança sem prejuízos à sua utilização (ALBUQUERQUE; GARCIA, 2024). De acordo com a ABNT NBR 6122/1996 as fundações são divididas em duas categorias, superficiais (rasas ou diretas) e profundas, ilustradas na Figura 1.

Figura 1 - Fundações superficiais e profundas.



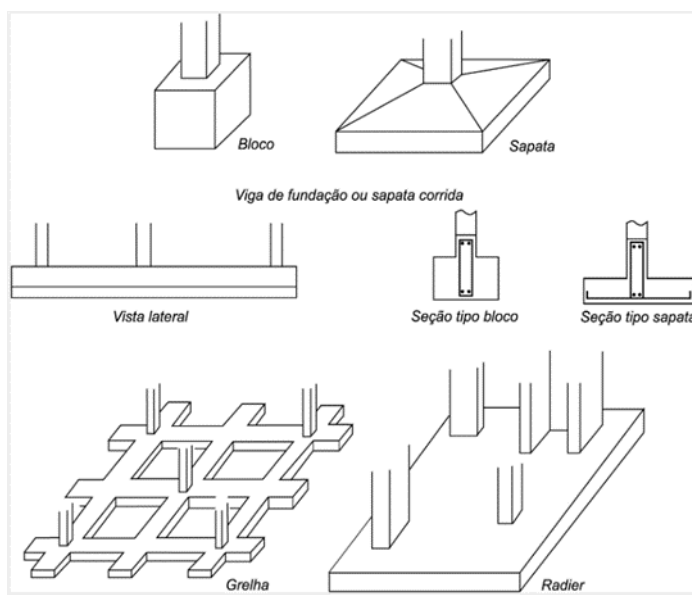
Fonte: VELLOSO; LOPES (2011).

4.3.1 Fundações Superficiais (ou rasa ou direta)

A norma ABNT NBR 6122/1996, define as fundações superficiais são elementos em que a carga é transmitida ao terreno, predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação, e em que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Nesse tipo de fundação são incluídas as sapatas, os blocos, os radier, as sapatas associadas, as vigas de fundação e as sapatas corridas. Segundo Velloso e Lopes (2011) os principais tipos de fundações superficiais são:

- Bloco: Elemento de fundação de concreto simples, dimensionado de modo que as tensões de tração nele produzidas possam ser resistidas pelo concreto, sem necessidade de armadura.
- Sapata: Elemento de fundação superficial de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele produzidas não sejam resistidas pelo concreto, mas sim pelo emprego da armadura.
- Sapata Corrida: Elemento de fundação superficial que abrange todos os pilares da obra ou carregamentos distribuídos (por exemplo: tanques, depósitos, silos, etc.) para o solo de maneira uniforme.
- Sapata Associada (ou radier parcial): Sapata comum a vários pilares, cujos centros, em planta, não estejam situados em um mesmo alinhamento.
- Radier: Elemento de fundação superficial que abrange todos os pilares da obra ou carregamentos distribuídos.
- Viga de Fundação: Elemento de fundação superficial comum a vários pilares, cujos centros, em planta, estejam situados no mesmo alinhamento.
- Grelhas: Elemento de Fundação constituído por um conjunto de vigas que cruzam os pilares (tipo não citado na norma NBR 6122/2010). Alonso (2019) ressalta ainda as fundações superficiais, como segmentos que apoiam logo a base da infraestrutura, e se caracteriza pela transmissão da carga ao solo através das tensões atribuídas distribuídas sobre sua base, os principais elementos são ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Principais tipos de fundações superficiais.



Fonte: VELLOSO; LOPES (2011).

4.3.2 Fundações Profundas

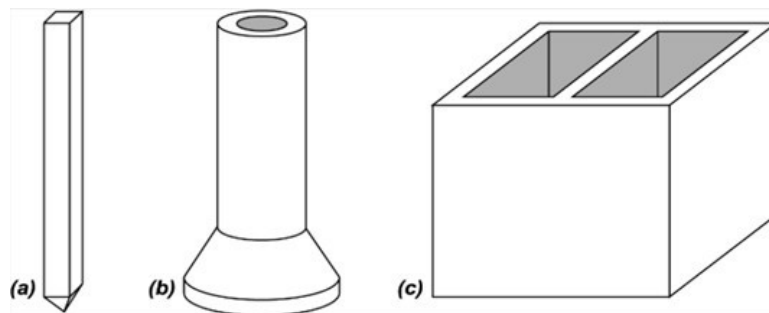
Segundo a ABNT NBR 6122/2010, as fundações profundas são definidas como elementos que transmitem a carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, e que está assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3m, salvo justificativa. As fundações profundas são utilizadas geralmente em projetos amplos que precisam transmitir maiores cargas ao terreno e quando as camadas superficiais do solo são pobres ou fracas (CALISTO; KOSWOSKI, 2015). Neste tipo de fundação incluem-se as estacas, os tubulões e os caixões, como ilustrado na Figura 3, de acordo com a ABNT NBR 6122/2010 são definidos:

- **Tubulões:** Elemento de fundação profunda, cilíndrico, em que, pelo menos na sua etapa final, há descida de operário. Pode ser feito a céu aberto ou sob ar comprimido (pneumático) e ter ou não base alargada, conforme indicado pela Figura 3 (b).
- **Estaca:** Elemento de fundação profunda executado inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que, em qualquer fase de sua execução, haja

descida de operário. Os materiais empregados podem ser: madeira, aço, concreto pré moldado, concreto moldado in situ ou mistos, conforme indicado pela Figura 3 (a).

- Caixão: Elemento de fundação profunda de forma prismática, concretado na superfície e instalado por escavação interna. Na sua instalação pode-se usar ou não ar comprimido e sua base pode ser alargada ou não como ilustrado pela Figura 3 (c).

Figura 3 - Principais tipos de fundações profundas.



Fonte: VELLOSO; LOPES (2011).

4.4 Estudo do Solo

A fase inicial na elaboração de um projeto de edificações, é de fundamental importância uma inspeção no local a ser construído, como nível de água, obras nas imediações, averiguar em buscas locais sobre existência de matacões, nível de rochas, existência de matacões (pedras com mais de 30cm de comprimento), análise da existência de aterros, ocasionando um solo com baixa capacidade de suporte de carga (BOTELHO, 2015).

O autor De Almeida (2005) define os solos como materiais provenientes da decomposição das rochas ou sedimentação não consolidada de seus grãos com ou sem matéria orgânica. São identificados pela sua textura, granulometria, plasticidade, consistência, compactidade, estrutura, forma de grãos, cor, fiabilidade, presença de outros materiais (conchas, matéria vegetal, etc.).

Segundo Campos (2015), os principais parâmetros característicos do solo, em que a mecânica dos solos classifica os materiais que cobrem o solo em alguns grupos como: Rocha, Solo arenoso, solo siltoso e solo argiloso. A ABNT NBR 6502

estabelece que um dos principais critérios de para fazer a classificação do solo é o tamanho dos grãos como apresentados pela Figura 4.

Figura 4 - Classificação do solo de acordo com sua granulometrias.

Tipo de solo	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho
Diâmetro dos grãos (mm)	< 0,002	0,002 a 0,06	0,06 a 0,2	0,2 a 0,6	0,6 a 2,0	> 2,0

Fonte: CAMPOS (2015).

4.5 Investigações do Solo

No Brasil, o custo envolvido na execução de sondagens de reconhecimento normalmente varia entre 0,2% a 0,5% do custo total de obras convencionais, podendo ser mais elevado em obras especiais ou em condições adversas do subsolo. O planejamento de investigação geotécnica deve ser concebido de forma que possa ponderar os custos e características da obra com base nas complexidades geológicas e geotécnica local de implantação. No que se refere à complexidade da obra, deve-se considerar aspectos como: tamanho, cargas aplicadas, topografia, escavação, rebaixamento do nível freático, obras vizinhas, canalizações e etc. (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

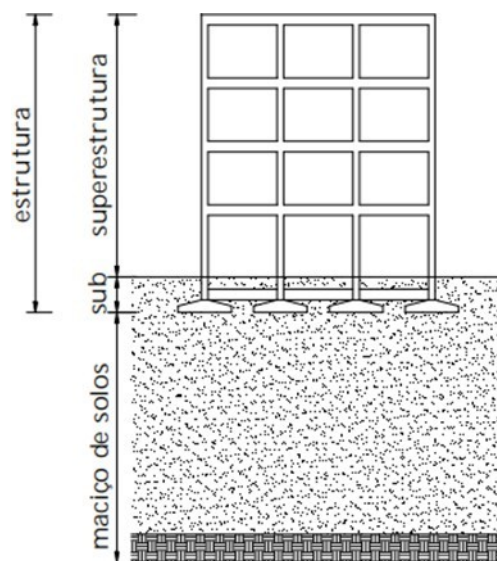
Os autores Veloso e Lopes (2011) destacam os principais processos de investigação do subsolo para fins de projeto de fundações de estrutura, como poços, sondagens de trado, sondagens de percussão com NSPT, sondagens rotativas, sondagens mistas, ensaio de cone (CPT), ensaio de pressiométrico (PMT). Os autores destacam ainda do ponto de vista de fundações para estruturas, a utilização de ensaios de campo de palheta (vane test) e de dilatômetro (DMT) sendo utilizados em casos de argilas moles.

4.6 Interação Solo-Estrutura

Os sistemas estruturais têm o objetivo de suportar os carregamentos que incidem sobre a estrutura e conduzi-los de forma segura para o solo. Com isso, a

determinação do carregamento incidente sobre a estrutura é uma das fases mais importantes do desenvolvimento do projeto estrutural quando referente a segurança da estrutura. É preciso assim que exista a estimativa das cargas com precisão para que o dimensionamento dos elementos possa ser feito de modo a evitar perda da estabilidade (SANTOS, 2019). Segundo Holanda (1998) as edificações são constituídas de três partes integradas: superestrutura, subestrutura e maciços do solo, no qual será considerado no presente estudo, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Sistema Estrutural.



Fonte: Adaptado de Holanda (1998).

A interação solo-estrutura (ISE) é definida como a capacidade de uma edificação em absorver e redistribuir as tensões geradas por recalques diferenciais nas fundações, na busca do reequilíbrio estrutural. Por essa razão, além de influenciar na evolução dos recalques de uma fundação, tem grande importância para a previsão de comportamento estrutural (Prellwitz, 2022). Dessa forma, a interação solo estrutura tem como objetivo fornecer deslocamentos reais da fundação e também da estrutura, se estiver incluída na análise, e seus esforços internos. Esses esforços podem ser obtidos através da diretamente pela análise da interação ou indiretamente por meio de pressão de contato (VELOSO, LOPES, 2011). O processo inicia-se na fase de construção e continua até que atinja o estado de equilíbrio em que as tensões e deformações tanto da estrutura quanto do solo atinjam um estado de equilíbrio.

A ISE pode estar associada a diversos fatores como número de pavimentos da edificação, influência dos primeiros pavimentos, processo construtivo, forma em planta da edificação, rigidez relativa estrutura solo, entre outros (ANTONIAZZI, 2011). As reações de apoio de uma estrutura passam primeiro pelas subestruturas antes de serem absorvidas pelo solo, desta maneira, ao projetar uma estrutura, supõe-se que o conjunto seja capaz de garantir a indeslocabilidade da base dos pilares. Nesse contexto, grande parte dos projetos estruturais são elaborados considerando a estrutura assente sobre base rígida e indeslocável (ANTONIAZZI, 2011).

Najar (2025), ressalta sobre a análise da ISE, em que uma das principais divergências entre engenheiros de estruturas e geotécnicos inicia na escolha do sistema de referência utilizadas para medir deslocamentos de recalques. Enquanto os projetistas de estruturas usualmente adotam a base da superestrutura como origem e o sentido positivo voltado para cima, os geotécnicos, por sua vez, consideram o referencial com orientação oposta, voltada para baixo em função do foco nas deformações do maciço do solo. Essa diferença conceitual pode gerar inconsistências quando os modelos estruturais e geotécnicos são executados sem uma padronização de eixos ou sinais.

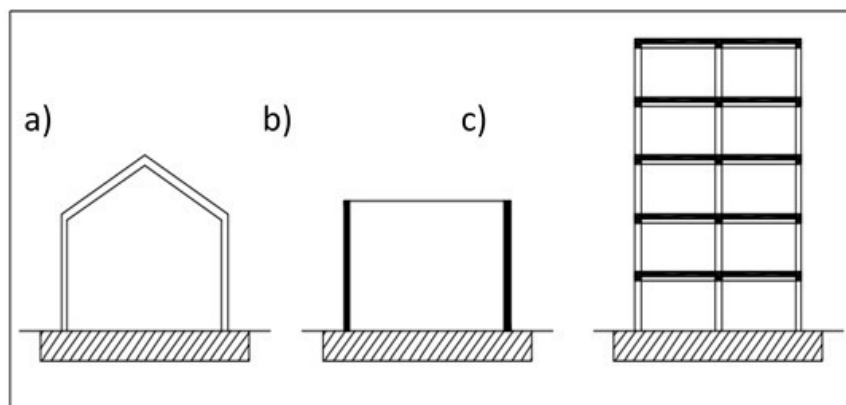
Em contrapartida, na prática, quando o solo é submetido a um carregamento de um edifício, o comportamento estrutural do mesmo será divergente de análise em projeto, de modo que, na realidade, ocorrerá deformação do solo devido ao carregamento sobre o mesmo. Em vista disso, quando não ocorre a consideração da ISE pode se agravar em condições de acordo com a deformabilidade do solo, podendo ser mais grave em solos argilosos, podendo afetar diretamente a segurança, economia e em manifestações patológicas (Silva, 2019).

4.6.1 Rigidez relativa estrutura-solo

A rigidez da estrutura é um dos principais fatores que deve ser analisado, podendo colaborar de forma marcante para a rigidez relativa do conjunto fundação - superestrutura – solo. A Figura 6 apresenta três situações em que a superestrutura oferece contribuições distintas ao comportamento da fundação. Na ilustração (a), correspondente a um galpão, essa contribuição é pequena; na ilustração (b), referente a uma caixa d'água ou silo com paredes de concreto, a influência é significativa; e na

ilustração (c), a participação estrutural é relevante e aumenta conforme o número de pavimentos (CRESPO, 2004).

Figura 6 - Diferentes contribuições de estruturas-galpão, b) caixa d'água, c) edifício.



Fonte: CRESPO (2004).

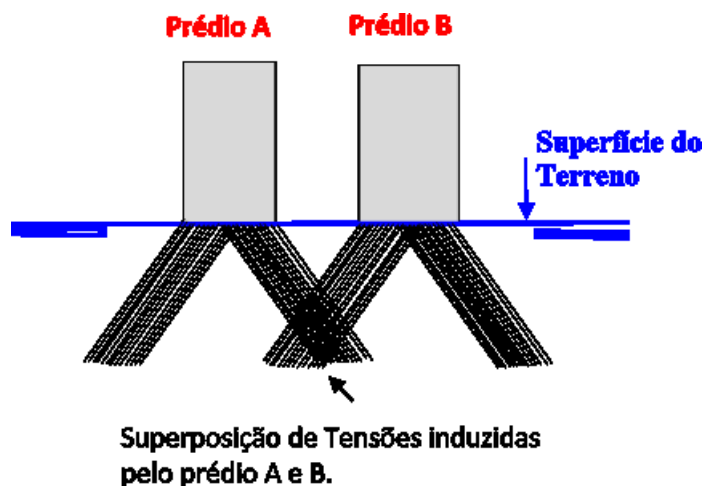
Ademais, outro aspecto relevante é a ligação entre os elementos estruturais (por exemplo, a ligação entre vigas e pilares), resultando em uma considerável rigidez, que restringe o movimento relativo entre seus apoios. Assim, os recalques diferenciais previstos convencionalmente são maiores que os medidos na obra. A consideração deste efeito pode até viabilizar projetos de fundações que não seriam aceitos em uma análise convencional (GUSMÃO, 1990).

4.6.2 Edificações vizinhas

Costa Nunes et al. (1956, apud Antoniazzi, 2011) foi pioneiro no Brasil nos estudos sobre a influência das construções vizinhas no comportamento dos recalques. O autor divide os movimentos característicos devido aos carregamentos vizinhos em quatro tipos.

- Tipo 1: Prédios vizinhos construídos simultaneamente, havendo uma superposição de tensões na região entre os prédios, ocasionados por seus carregamentos. Dessa forma, devido a concentração de tensões, a região está propícia a maiores recalques, tombamentos dos prédios, como abordados na Figura 7.

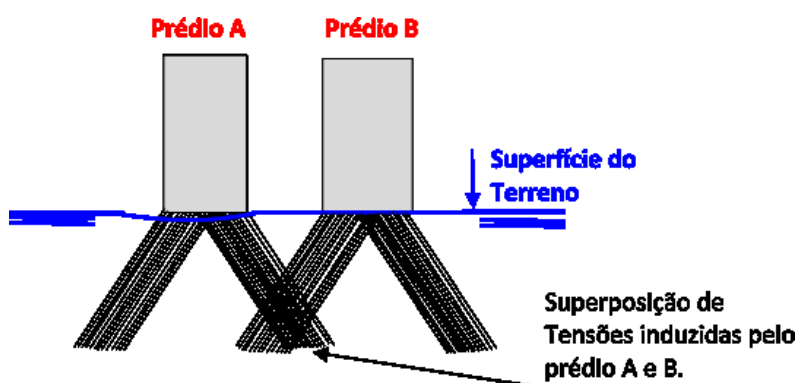
Figura 7 - Carregamentos simultâneos.



Fonte: Adaptada Costa Nunes et al. (1956, apud Antoniazzi, 2011).

- Tipo 2- Prédios vizinhos construídos em tempos diferentes, em que o primeiro prédio construído provoca o pré-adensamento do solo sobre sua base. O prédio construído posteriormente gera no maciço um acréscimo de tensões que superpostas as tensões devido ao prédio já existente, induzindo assim o aumento dos recalques, ilustrado na Figura 8. Desse modo, o segundo prédio executado sobre o solo pré-adensado, os recalques do lado do vizinho serão maiores que o lado adjacente, de modo que o tombamento dos prédios ocorrerá no mesmo sentido.

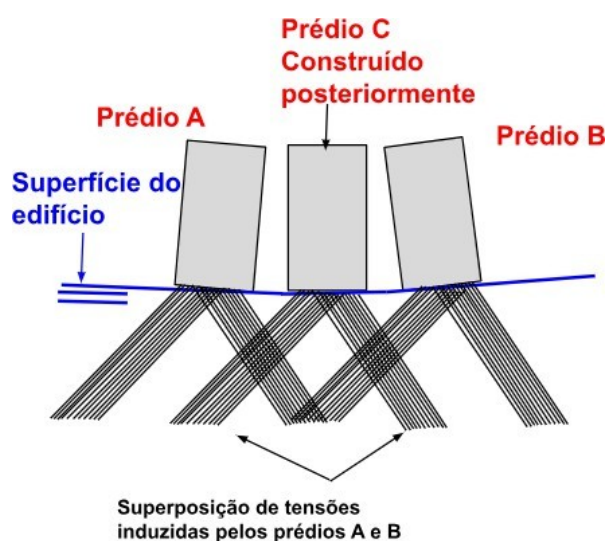
Figura 8 - Carregamentos não simultâneos.



Fonte: Adaptada de Costa Nunes et al. (1956, apud Antoniazzi, 2011).

- Tipo 3: Novo prédio construído entre dois já existentes, o prédio recém construído provoca acréscimo de tensões nas regiões centrais entre os vizinhos. Portanto, os prédios vizinhos irão tombar na direção da última construção. Sendo simétrico, o prédio central não sofrerá desaprumo, ilustrado na Figura 9.

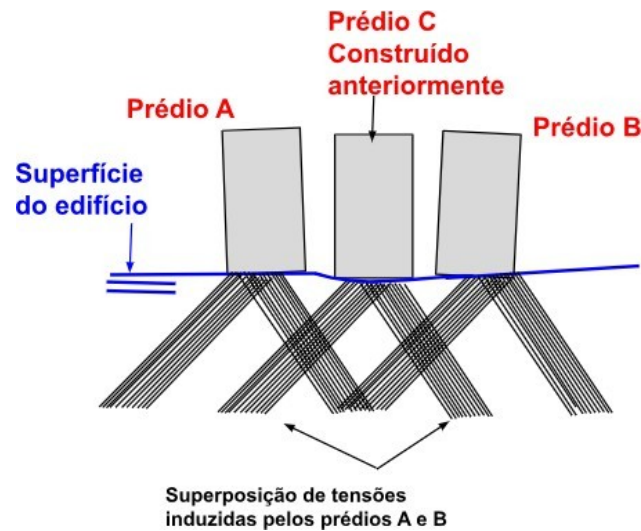
Figura 9 - Terceiro prédio construído entre dois existentes.



Fonte: Adaptada de Costa Nunes et al. (1956, apud Antoniazzi, 2011).

- Tipo 4: Edifícios construídos vizinhos a um já existente. O prédio construído primeiro provocará o pré-adensamento do maciço, de modo que os novos prédios ao serem construídos podem sofrer tombamento em sentidos contrários. O diagrama de tensões será simétrico com relação ao prédio pré-existente, de modo que o prédio, de modo que não sofrerá desaprumo, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Prédios construídos vizinhos a um já existente.



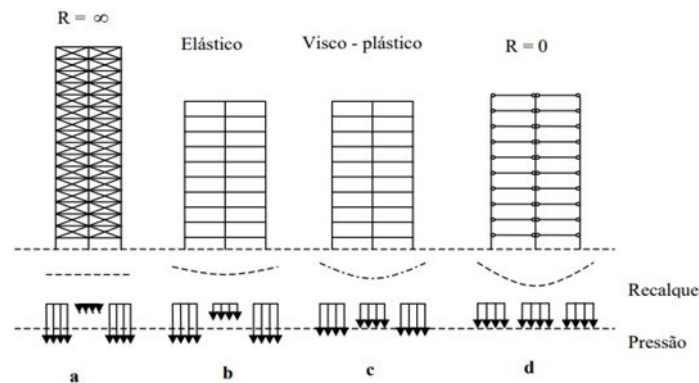
Fonte: Costa Nunes et al. (1956, apud Antoniazzi, 2011).

Reis (2000) analisou a influência de dois prédios simultâneos (tipo 1) em que a influência do grupo do edifício, os edifícios foram comparados a blocos com afastamentos de 5,10,15 e 20m de distância. Em seus estudos, o autor evidenciou que prédios vizinhos têm maior influência nos bulbos de tensões, causando maiores tensões em regiões de contato, e menor influência quando construídos em maiores afastamentos.

4.6.3 Influência do tempo

Segundo Zucchi (2021) a interação solo-estrutura é um tema complexo que exige a consideração da rigidez da superestrutura e do comportamento ao longo do tempo. O autor destaca a classificação de CHEMECKI (1969) abordando casos de entre rigidez da estrutura e da velocidade da progressão do recalque ao longo do tempo, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Casos de interação solo-estrutura.



Fonte: CHAMECKI (1969), IWAMOTO (2000).

No caso (a), são estruturas infinitamente rígidas, em que apresentam assim recalques uniformes. Nesse caso, as distribuições de tensão nos apoios são menores no centro e máximo nos extremos, em contrapartida o solo tende a deformar mais no centro do que em periferias. O caso é um exemplo prático de edifícios com fechamento de paredes resistentes como alvenaria estrutural, podem ser exemplificadas nesse caso.

Nos casos (b) e (c) são considerados intermediários. O caso (b) apresenta uma estrutura perfeitamente elástica, em que a rigidez não depende da velocidade de progressão dos recalques, na prática, as estruturas metálicas se assemelham ao caso. No caso (c) são estruturas visco elásticas como o de concreto armado, apresentam rigidez que depende da velocidade da progressão de recalques diferenciais. Dessa forma, se os recalques acontecem em um curto espaço de tempo a estrutura tem um comportamento elástico caso (b), porém se a progressão é bastante lenta, a estrutura apresenta o comportamento como um líquido viscoso e tenderá ao caso (d).

No caso (d), o comportamento é oposto ao caso (a), em que a estrutura não apresenta rigidez, ou seja, estrutura extremamente flexível, e com isso acomoda-se com as deformações do solo. As estruturas isostáticas e edifícios compridos no Figura 11 - Casos de Interação solo-estrutura sentido horizontal (comprimento maior que a largura vista em planta) se assemelham ao caso.

4.6.4 Número de Pavimentos

O aumento do número de pavimentos de um edifício conduz a uma estrutura global mais rígida. No entanto, essa relação não apresenta comportamento linear monótono, ou seja, os primeiros pavimentos exercem influência significativamente maior que os últimos (COLARES, 2006). O autor Gusmão (1990), ao avaliar a influência do número de pavimentos na interação solo estrutura na uniformização de recalques, fez análise com diferentes Kss para um pórtico plano, para 01, 02, 03,04, 05, 08, 11 e 15 pavimentos. Observou-se que para um estimado valor de Kss o valor da uniformização do recalque diminui à medida que aumenta o número de pavimentos. Em vista disso, o número de pavimentos promove o aumento global da rigidez da estrutura, diminuindo assim o nível de recalques diferenciais.

4.6.5 Comportamento do solo ao longo do tempo

A previsão e análise do comportamento do solo ao longo do tempo são um dos principais problemas enfrentados pela mecânica dos solos. De modo que, na maioria dos casos, se baseiam na utilização de modelos reológicos ou semi empíricos REIS (2000). O mesmo autor, ressalta ainda os modelos utilizados na prática da geotecnia, em que consideram três tipos de recalque: recalque imediato ou elástico, recalque por adensamento primário, que ocorre devido a expulsão da água dos vazios do solo, e recalque por adensamento secundário, devido a influência do esqueleto sólido que ocorre após a dissipação de todas as pressões neutras (REIS 2000).

4.7 Recalque

Define-se recalque como sendo o deslocamento vertical para baixo sofrido pela base da fundação em relação à superfície do terreno. Esse deslocamento é resultante da deformação do solo proveniente da aplicação de cargas ou devido ao peso próprio das camadas sobre a qual se apoia o elemento da fundação (DE OLIVEIRA, 2012).

O fenômeno ocorre tanto em fundações rasas, como nas fundações profundas, sendo de fundamental importância analisar nos dois casos, de forma que, para cada tipo de fundação existe uma maneira específica de cálculo de recalque. Contudo, para o caso de fundações rasas em que esteja apoiada em elementos estruturais que servem para transmitir a carga ao terreno e, esses elementos agirem como fundação

profunda, o cálculo do deslocamento da fundação rasa se dará da mesma maneira que o cálculo de fundações profundas (Pereira, 2018).

Ademais, os valores limites de projeto para os deslocamentos e deformações das fundações, devem ser considerados alguns fatores, como: tipo de estrutura, material de construção, tipo de fundação, natureza do solo, entre outras.

4.7.1 Tipos de Recalques

Albuquerque e Garcia (2020), distinguem o recalque em três tipos devido a carga estática: por deformação elástica, adensamento e compressão secundária. O autor Silva (2024) acrescenta ainda o recalque por adensamento lateral, sendo assim:

- Recalque elástico (Se): o solo se deforma de maneira temporária e reversível, retornando à sua forma original quando a carga é removida, desde que o comportamento do solo permaneça dentro de seu limite elástico. O recalque ocorre imediatamente após a aplicação de carga no solo. Dessa forma, o caso em específico é mais evidente em solos que não possuem coesão, ou seja, solos que não contêm argila (ALBUQUERQUE; GARCIA, 2020).
- Recalque por adensamento: o recalque por adensamento ocorre quando o solo sob a fundação se compacta lentamente devido à expulsão de água dos poros do solo, especialmente em solos coesivos, como argilas. Esse processo ocorre de forma lenta, no qual, a aplicação da carga no solo ocasiona a pressão no solo, em que a velocidade do processo vai variar de acordo com as características de permeabilidade do solo (ALBUQUERQUE; GARCIA, 2020).
- Compressão secundária: O recalque por compressão secundário ocorre após o recalque primário e está relacionado a reorganização estrutural das partículas do solo causadas por tensão de cisalhamento internas. Ocorre lentamente em solos argilosos saturados, e é geralmente desconsiderado em cálculos de fundações, por ser de baixa magnitude e ocorrer a longo prazo (ALBUQUERQUE; GARCIA, 2020).
- Recalque por escoamento lateral: O recalque por escoamento lateral ocorre quando o solo sob uma estrutura sofre deslocamentos horizontais

significativos, geralmente devido a pressões induzidas por cargas externas, como fundações ou aterros. É comum em solos moles e saturados, onde a carga aplicada causa o movimento lateral do solo para regiões menos confinadas (SILVA, 2024).

4.7.2 Efeitos de Recalques em estruturas

Segundo Gomes (2014), os efeitos decorrentes dos recalques podem ser classificados em três categorias principais: danos estruturais, danos arquitetônicos e danos funcionais. Os danos estruturais manifestam-se quando os recalques afetam diretamente os elementos resistentes da edificação, como pilares, vigas e lajes, ocasionando deformações excedentes, perda de continuidade estrutural e fissuração capaz de comprometer a estabilidade global. Já os danos arquitetônicos relacionam-se às alterações perceptíveis nos elementos de acabamento e vedação, entre as quais se destacam trincas em revestimentos, desprendimento de peças cerâmicas, ruptura de painéis de vidro ou mármore e desalinhamento de esquadrias. Por sua vez, os danos funcionais consistem nos prejuízos ao uso adequado da edificação, podendo ser observados pelo emperramento de portas e janelas, obstrução de tubulações e desgaste acentuado de elevadores em função do desaprumo da estrutura.

A classificação proposta por Gomes (2014) é corroborada pelo estudo clássico de Skempton e MacDonald (1956), que avaliaram cerca de 100 edificações, apresentando ou não manifestações patológicas. Os autores concluíram que os danos funcionais estão associados, predominantemente, aos recalques totais, ao passo que os danos estruturais e arquitetônicos derivam, em grande medida, dos recalques diferenciais, especialmente daqueles que geram distorções angulares significativas no sistema resistente.

Pesquisas posteriores aprofundam essas distinções. De Almeida Maia (2022) destaca que a inadequada estimativa dos recalques pode resultar em distorções angulares substanciais, alterando o comportamento global da edificação e intensificando o risco de danos estruturais. No âmbito dos danos arquitetônicos, Holanda Júnior (2002) observa que, em obras de alvenaria estrutural, os painéis estão sujeitos tanto às ações mecânicas quanto às tensões induzidas por recalques diferenciais, tornando-se especialmente vulneráveis. Bortoli (2019), ao analisar casos

reais, identificou manifestações típicas desse tipo de dano, como fissuras inclinadas a 45°, rachaduras verticais em pilares e trincas em muros de divisa.

Quanto aos danos funcionais, Silveira, de Souza e Quadreli (2022) evidenciam que tais efeitos afetam diretamente a operacionalidade da edificação, relacionando-se a rompimentos de tubulações hidráulicas e sanitárias, falhas no escoamento, além de desgaste prematuro de trilhos de elevadores decorrente de recalques e desaprumo do edifício.

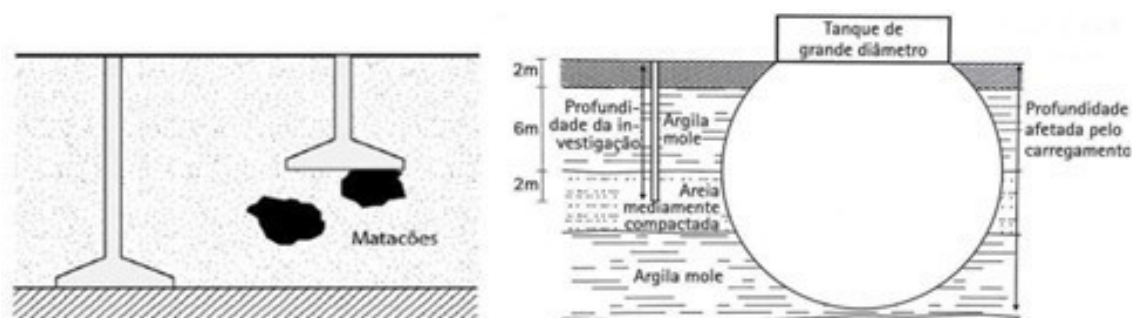
4.8 Causas dos Recalques nas Fundações

Os recalques em fundações apresentam múltiplas origens, decorrentes das características do solo, das condições de carregamento e das intervenções executivas ou ambientais que alteram o comportamento do terreno ao longo do tempo. De modo geral, as causas mais recorrentes estão associadas a falhas ou limitações na investigação geotécnica, interferências entre edificações vizinhas, implantação de fundações sobre aterros, variações no nível do lençol freático e à presença de solos com comportamento problemático. Além dessas, vibrações, escavações próximas e demais modificações no entorno podem intensificar os deslocamentos diferenciais e comprometer o desempenho da estrutura.

4.8.1 Ausência de Investigação do Solo

A ausência de completa investigação do subsolo é corriqueira, principalmente em fundações de obras de pequeno e médio porte, resultando em aproximadamente 80% dos casos. Os principais problemas em fundações diretas são definidos como: recalques inadmissíveis ou ruptura dependendo da condição do solo, fundações sobre solos compressíveis sem estudos de recalque, resulta em grandes deformações fundações apoiadas em materiais de comportamento muito diferente, como ilustradas na Figura 12 (MILITITSKY, CONSOLE, SCHNAID, 2015).

Figura 12 - Profundidade da investigação insuficiente.

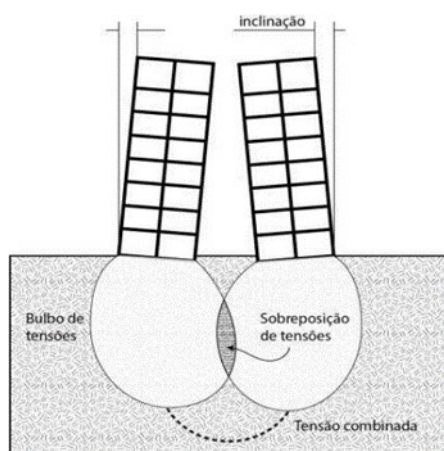


Fonte: MILITITSKY, CONSOLE, SCHNAID (2008).

4.8.2 Superposição de Tensões

O fenômeno da superposição de tensões, ocorre quando as tensões geradas pelas fundações se propagam no solo até determinada profundidade, formando assim um bulbo de tensão. O bulbo de tensão tende a se estabilizar naturalmente nas camadas do solo, contudo, quando outra edificação vizinha é implantada nas proximidades, o novo bulbo de tensão pode interferir na mesma região de concentração de esforços, como ilustrado na Figura 13. Dessa forma, essa interferência resulta no acréscimo de tensões do solo, podendo provocar recalque diferencial (Ferreira, 2016).

Figura 13 - Sobreposição de tensões.



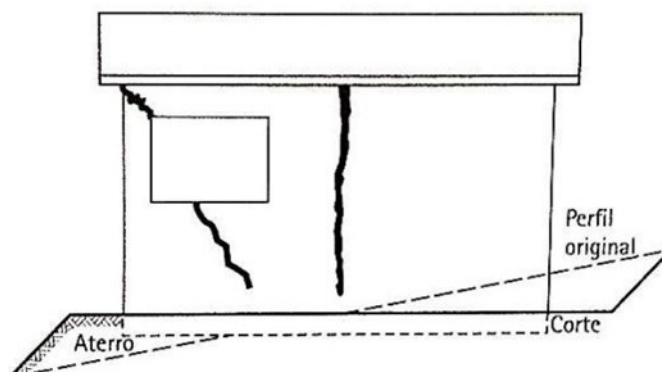
Fonte: MILITITSKY, CONSOLE, SCHNAID (2008).

4.8.3 Fundações Sobre Aterros

A execução de fundações sobre aterros pode representar uma fonte significativa de problemas quando não são adotados os cuidados necessários durante sua execução. É essencial garantir uma compactação eficiente do material, análise prévia do solo e dos materiais compostos no aterro. Ademais, deve-se proceder a remoção das camadas superficiais de solos moles, evitar a execução de aterros sobre solos inclinados, sendo necessário investigar a espessura e homogeneidade das camadas compactadas, de modo a assegurar a estabilidade do solo (Ferreira, 2016).

Os recalques resultantes de fundações assentes sobre aterros podem ocorrer por: deformações do corpo do terreno por causa do seu próprio peso, deformações do solo natural abaixo do aterro (MILITITSKY, CONSOLI e SCHNAID, 2015). Conseqüentemente, os recalques podem resultar em trincas, fissuras, assegurando a estabilidade dos edifícios, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Fissuras e trincas em solos assentes em aterro.

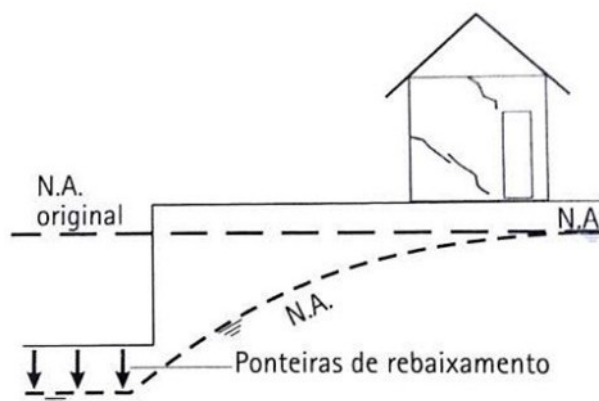


Fonte: MILITITSKY, CONSOLI e SCHNAID (2008).

4.8.4 Rebaixamento do Lençol Freático

O rebaixamento do lençol freático é uma das principais causas de recalque diferencial em edificações, especialmente em solos compressíveis e em áreas urbanas com obras subterrâneas, ocasionando assim o rebaixamento do lençol freático, provocando vazios no solo, resultando em recalques diferenciais, como ilustrado na Figura 15 (Ferreira, 2016).

Figura 15 - Rebaixamento do lençol freático.



Fonte: MILITITSKY, CONSOLI e SCHNAID (2008).

Segundo Gomes (2014), ressalta ainda algumas causas frequentes de recalques, como:

- Solos Colapsíveis: solos de elevadas porosidades, quando entram em contato com a água, ocorre a destruição da cimentação inter angular, resultando um colapso súbito deste solo;
- Escavações em áreas adjacentes à fundação mesmo com paredes ancoradas, podem ocorrer movimentos, ocasionando recalques nas edificações vizinhas.
- Vibrações: oriundas da operação de equipamentos como: bate-estacas, rolos-compactadores vibratórios, tráfego viário etc;
- Escavação de Túneis: qualquer que seja o método de execução, ocorrerão recalques da superfície do terreno.

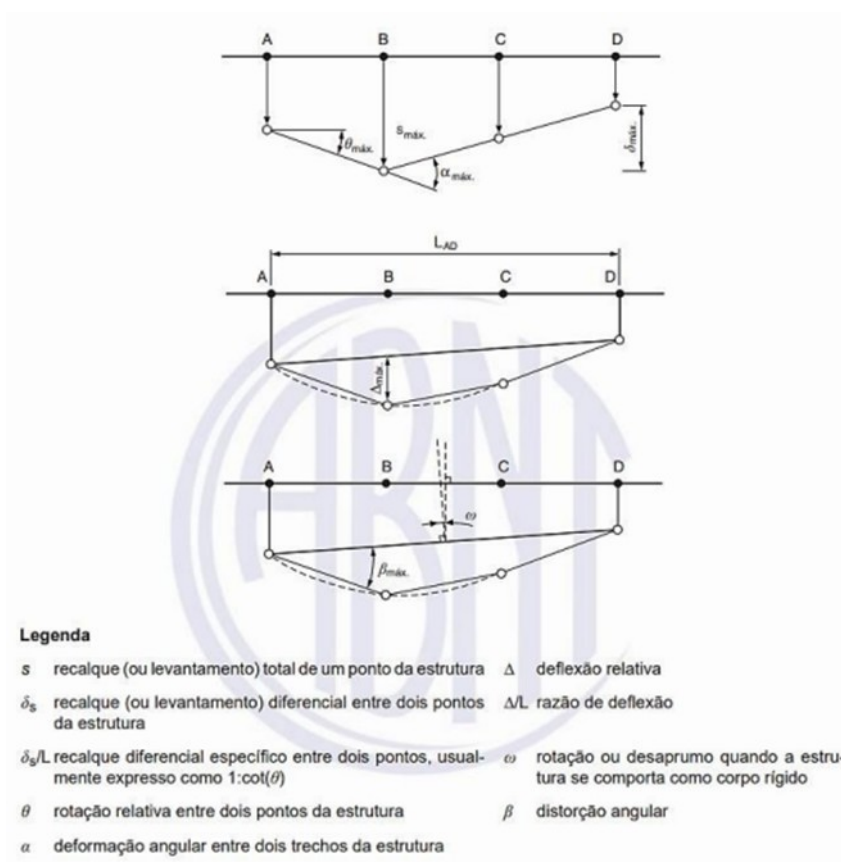
4.9 Recalque Diferencial

Os recalques diferenciais, quando uma parte da fundação se move mais que outra, podem resultar em fissuras e desníveis críticos. A leitura frequente é essencial para captar pequenas variações e antecipar o desenvolvimento de deformações desiguais, permitindo que intervenções corretivas ocorram antes de grandes danos estruturais (Silva, 2024). Portanto, para monitorar recalques diferenciais, é

recomendado realizar leituras semanais ou quinzenais durante o início da obra, quando as variações podem ser mais significativas.

A NBR 6122/2022 estabelece ainda a ocorrência de movimentos verticais da fundação e medidas angulares, ilustrados na Figura 16, possibilitando visualizar as modificações do solo na ocorrência de movimentos verticais possíveis, facilitando assim uma análise e monitoramento ideal.

Figura 16 - Movimentos verticais da fundação e medidas angulares.



Fonte: NBR 6122/2022.

A Figura 16 ilustra os efeitos dos recalques (ou assentamentos) que ocorrem nas fundações de uma estrutura, representando graficamente as deformações e rotações. Em síntese o recalque uniforme todos os pontos se deslocam igualmente, sem gerar esforços adicionais, o recalque diferencial provoca rotação, flexão e distorção angular.

4.9.1 Deformações em pilares e vigas

As deformações observadas em pilares ou vigas pode ser indicada por sobrecarga ou de uma possível falha estrutural progressiva. A realização frequente de leituras é essencial para identificar a taxa de deformação das estruturas, principalmente em edificações recentes ou submetidas a condições de carregamentos incomum. Conseqüentemente, essas estruturas são apresentadas com flexão excessiva ou a perda de resistência dos elementos estruturais, ocasionando em padrões típicos de deslocamento e correspondem a fissuras (MILITITSKY, CONSOLI e SCHNAID, 2015).

4.9.2 Impactos de Recalque diferencial em solos coesivos

Os solos coesivos, como as argilas, tendem a apresentar recalques lentos e graduais ao longo do tempo, em decorrência do processo de adensamento. Nesses movimentos verticais da fundação, o monitoramento deve ser realizado de maneira contínua e prolongada, ainda que com menor frequência de medições, é possível identificar a evolução de deslocamentos e as tendências de recalques. Esse acompanhamento específico, garante antever efeitos cumulativos e minimizar impactos estruturais futuros. Dessa forma, a análise contínua dos dados obtidos auxilia na tomada de decisões sobre intervenções necessárias para garantir a estabilidade e segurança, pois em determinadas situações, o perfil geotécnico pode apresentar camadas com diferentes graus de compressibilidade, e mesmo que o projeto de fundação atenda a profundidades previstas, pode ocorrer adensamento nas camadas inferiores (SILVA, 2024).

4.10 Modelos Teóricos Para Previsão de Recalque

A previsão precisa de recalques constitui um dos principais fundamentos do dimensionamento geotécnico, estando intimamente relacionado à segurança estrutural, à funcionalidade e a economicidade das obras de engenharia. A complexidade do comportamento dos solos, materiais naturalmente heterogêneos, anisotrópicos e não lineares, de modo que impõe desafios significativos à confiabilidade dos modelos teóricos. Em virtude disso, o avanço do conhecimento na área tem ocorrido por meio do desenvolvimento de diversas metodologias de previsão, que abrangem desde as soluções elásticas clássicas até modelos empíricos mais sofisticados (Consoli, Fonini, Rua, 2020).

A seleção do método de cálculo mais adequada está relacionada a fatores como o tipo de solo (granular ou coesivo), a natureza do carregamento aplicado e a qualidade dos parâmetros geotécnicos disponíveis, obtidos por meio de ensaio de campo ou em laboratório. Os autores Das Luo (2017), não existe um método universalmente aplicável ou superior para a previsão de recalques. Assim, a competência técnica do engenheiro geotécnico consiste em compreender as bases teóricas, as hipóteses e as limitações de cada abordagem, de modo a selecionar o procedimento mais coerente e confiável para problema em análise, garantindo equilíbrio e precisão, segurança e viabilidade prática.

O avanço contínuo das pesquisas em engenharia geotécnica, aliado ao desenvolvimento de modelagens numéricas com o uso dos elementos finitos, não tornou obsoletos aos métodos analíticos e empíricos tradicionais. Em contrapartida, essas abordagens continuam desempenhando um papel fundamental na prática profissional, servindo como instrumento de validação de modelos complexos e para uma compreensão física intuitiva do problema. Estudos comparativos, como o de Cunha et al. (2019), evidenciam que a confiabilidade das previsões de recalque está diretamente associada a representatividade dos parâmetros de deformabilidade adotados, aspecto que constitui um desafio comum a todas as metodologias de cálculo.

Este tópico dedicar-se-á a apresentar e discutir os fundamentos dos principais modelos teóricos utilizados para a previsão de recalques, com ênfase nos que possuem ampla aplicação na geotecnia brasileira e internacional. Serão abordados, de forma crítica, os modelos baseados na Teoria da Elasticidade, as soluções de Boussinesq para distribuição de tensões, a teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi, os métodos semiempíricos baseados em ensaios in situ, como os propostos por Schmertmann (CPT) e Burland e Burbidge (SPT), e as contribuições de pesquisadores como Barata e Alpan, que trouxeram importantes adaptações para solos tropicais. A análise dessas diferentes abordagens, à luz de recentes publicações, como as de Consoli et al. (2020) e Viana e Carvalho (2021), permite uma visão abrangente e atualizada sobre o estado da arte nesse campo fundamental da Engenharia Geotécnica.

4.10.1 Teoria da Elasticidade

A Teoria da Elasticidade representa a base conceitual mais fundamental para a previsão de deslocamentos em materiais sólidos sob carregamento. Sua aplicação à Mecânica dos Solos, embora simplificadora, fornece as ferramentas analíticas iniciais para a estimativa de recalques, constituindo-se como um ponto de partida essencial na análise geotécnica. O modelo se apoia na idealização do solo como um Material de Hooke, caracterizado por um comportamento elástico, linear, homogêneo e isotrópico (ZHANG & YIN, 2020). Nesta concepção, o material recupera integralmente sua forma original após o descarregamento, a relação tensão-deformação é representada por uma linha reta, suas propriedades são constantes em qualquer ponto (homogeneidade) e idênticas em todas as direções (isotropia).

As equações fundamentais que regem este modelo são dependentes de dois parâmetros críticos: o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν). O módulo E, também conhecido como módulo de Young, quantifica a rigidez do material, definindo a relação tensão-deformação uniaxial. O coeficiente de Poisson (ν) descreve a razão entre a deformação transversal e a deformação axial. Para o cálculo de recalques imediatos em solos, é realizado pela Equação 1 apresentado pela seguinte forma:

$$w = q * B * \frac{1-\nu^2}{E} I_s * I_d * I_h \quad (1)$$

Onde: w é o recalque, q é a tensão aplicada, B uma dimensão característica da fundação, I_s é o fator de forma da sapata e de sua rigidez (no caso flexível, depende da posição do ponto: centro, bordo etc.), I_d é o fator de profundidade/ embutimento, I_h é o fator de espessura de camada compressível (DAS & LUO, 2017).

A principal aplicação deste modelo reside na estimativa de recalques imediatos ou elásticos em solos granulares (areias e siltes) e em solos sob condições não drenadas ($\varphi=0$), onde a resposta inicial do solo pode, em uma primeira aproximação, ser considerada elástica (ATKINSON, 2020). Sua simplicidade matemática o torna uma ferramenta valiosa para projetos preliminares e para a verificação de resultados de métodos mais complexos.

Contudo, as limitações da teoria da elasticidade para solos são significativas e amplamente reconhecidas na literatura. A premissa mais crítica é a de que o solo é um material elástico linear, o que está em desacordo com seu comportamento real, marcadamente não linear, inelástico e dependente do histórico de tensões (KAYNI, 2018). Solos exibem deformações permanentes (plásticas) mesmo sob carregamentos modestos, e seu módulo de elasticidade não é uma constante, mas sim uma função do nível de tensão confinante e da trajetória de tensões (MAYNE, 2022). Ademais, a suposição de homogeneidade e isotropia raramente se verifica em depósitos geológicos naturais, que frequentemente apresentam estratificação, heterogeneidades e anisotropia (LIKITLERSUANG, 2019).

Apesar dessas limitações, a teoria mantém sua relevância. Estudos recentes, como o de Salgado (2022), enfatizam que o uso de valores de módulo de elasticidade (E) obtidos de forma apropriada, por exemplo, a partir de ensaios de campo como o CPTU ou através de correlações avançadas com o SPT, pode melhorar significativamente a precisão das previsões. Da mesma forma, Phoon & Kulhawy (2023) destacam que a simplicidade do modelo elástico o torna um componente valioso em procedimentos de calibração e em análises probabilísticas de confiabilidade, onde sua forma fechada é uma vantagem computacional. Portanto, a teoria da elasticidade deve ser compreendida não como uma representação fiel da realidade, mas como uma ferramenta poderosa e insubstituível dentro de seu contexto de aplicabilidade e de suas limitações inerentes.

4.10.2 Solução de Boussinesq (1885)

A solução matemática desenvolvida por Joseph Boussinesq em 1885 representa uma contribuição seminal não apenas para a teoria da elasticidade, mas especificamente para os métodos de previsão de recalques em geotecnia. Ao resolver analiticamente o problema da distribuição de tensões e deslocamentos em um semi-espaço infinito, homogêneo, isotrópico e elástico-linear sob a ação de uma carga pontual na superfície, Boussinesq forneceu o ferramental teórico para o cálculo direto de deformações (DAS & SOBRAL, 2023).

O conceito fundamental vai além do simples cálculo de tensões. A solução completa de Boussinesq inclui equações para os deslocamentos verticais em qualquer ponto do maciço. Para uma carga pontual “ P ”, o recalque vertical imediato (w) em um

ponto na superfície localizado a uma distância r do ponto de aplicação da carga é dado pela Equação 2, expressa por:

$$w = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi E r} \quad (2)$$

Onde: E é o módulo de elasticidade do solo e ν é o coeficiente de Poisson.

Esta fórmula é a expressão mais pura da aplicação da teoria da elasticidade ao problema de recalques, fornecendo uma solução fechada e elegante (ATKINSON, 2020). A aplicação prática dessa solução para o cálculo de recalques de fundações reais (sapatas, radiers) é feita por meio do princípio da superposição. Uma fundação com carga distribuída é discretizada em inúmeras cargas pontuais, e o recalque total em um ponto específico (geralmente o centro ou um canto) é obtido pela integração (soma) dos efeitos de todas essas cargas pontuais. Este processo de integração da solução de Boussinesq sobre uma área carregada levou ao desenvolvimento de fatores de influência para diferentes formas de carregamento (BOWLES, 2021). A fórmula geral para o recalque imediato de uma fundação superficial flexível assume a forma expressa na Equação 3.

$$w = \frac{q B (1-\nu^2) I_p}{E} \quad (3)$$

Onde: q é a pressão líquida aplicada, B é a largura característica da fundação, e I_p é o fator de influência para recalque, que depende da geometria da fundação, da espessura da camada compressível e da posição do ponto onde o recalque é calculado.

A determinação de I_p é, em essência, a aplicação prática da solução de Boussinesq integrada (SALGADO, 2022). A importância da solução de Boussinesq é, portanto, dupla no contexto de recalques. Primeiramente, ela estabeleceu a base teórica direta para os métodos de recalque elástico, sendo a gênese de todas as tabelas e ábacos de fatores de influência utilizados até hoje para estimativas rápidas de recalques imediatos em solos (KNAPPETT & CRAIG, 2020). Em segundo lugar, sua derivação para o cálculo de acréscimos de tensão vertical ($\Delta\sigma_v$) tornou-a um componente indireto, porém crucial, de outros métodos. Por exemplo, o cálculo do recalque por adensamento em argilas, utilizando a teoria de Terzaghi, requer o

conhecimento do perfil de $\Delta\sigma_v$ com a profundidade, que é classicamente obtido via integração de Boussinesq (CONSOLI et al., 2019).

Embora as premissas de homogeneidade e elasticidade linear sejam limitações reconhecidas para os solos reais, a solução de Boussinesq permanece como um ponto de partida insubstituível e um benchmark de referência. Estudos avançados, como análises por Elementos Finitos, frequentemente utilizam soluções baseadas em Boussinesq para validação de seus modelos (PHOON, 2022). Sua simplicidade, robustez conceitual e ampla divulgação a consagram como a ferramenta mais fundamental para a estimativa inicial de recalques na prática da engenharia geotécnica.

4.10.3 Método de Schmertmann (1970)

O conceito chave do método de Schmertmann é a substituição do perfil de tensões elásticas (de Boussinesq) por um perfil de distribuição de deformações mais realista. Schmertmann percebeu, a partir de medições em modelos físicos e observações de campo, que o pico de deformação por cisalhamento sob uma fundação não ocorre imediatamente abaixo da base, como sugere a distribuição de tensões verticais, mas a uma profundidade de cerca de $B/2$ (para sapatas quadradas) ou B (para sapatas corridas), onde B é a largura da fundação. Esse comportamento é capturado pelo diagrama de fator de influência de deformação (I_2), que possui um pico triangular nessa profundidade característica e se estende até uma profundidade de influência de $2B$ para sapatas quadradas e $4B$ para sapatas corridas (DAS & SOBRAL, 2023; KNAPPETT & CRAIG, 2020).

O método calcula o recalque total (w) pela soma das deformações verticais de subcamadas elementares dentro da zona de influência, ponderadas pelo fator I_2 e pelo módulo de deformação do solo. A fórmula geral é expressa pela Equação 4, sendo:

$$w = C_1 C_2 \frac{q B}{E_s} I_z \quad (4)$$

Onde: w é o Recalque imediato total (mm ou m); C_1 é o Fator de correção da embutimento da fundação. Corrige o alívio de tensões devido à escavação, calculado como $C_1 = 1 - 0.5 * (\sigma'_0 / \Delta q) \geq 0.5$, onde σ'_0 é a tensão efetiva no nível da base da fundação e Δq é o acréscimo líquido de tensão; C_2 é o Fator de correção do tempo

(creep). Considera o aumento do recalque com o tempo devido aos efeitos do fluência (creep) em solos granulares, dado por $C_2 = 1 + 0.2 * \log_{10}(t / 0.1)$, onde t é o tempo em anos; q é o acréscimo líquido de tensão aplicado pela fundação (kPa); I_2 é o Fator de influência de deformação na profundidade média da subcamada; E_s é o Módulo de deformação do solo para a subcamada (kPa).

A grande inovação prática reside na correlação direta com o ensaio CPT. O módulo de deformação (E_s) é obtido empiricamente a partir da resistência de ponta do cone (q_c). Schmertmann (1978) e outros autores posteriormente propuseram correlações como $E_s = \alpha * q_c$, onde o fator α varia tipicamente entre 2.0 e 4.0, dependendo do tipo de solo e da forma da fundação (CONSOLI et al., 2020). Isso permite a construção de um perfil contínuo de rigidez com a profundidade, essencial para a aplicação do método.

A principal vantagem do método de Schmertmann é que ele considera explicitamente a variação não linear da rigidez do solo com a profundidade e o tipo de solo, através do perfil de q_c e da correlação com E_s . Isso representa um avanço significativo em relação aos métodos que utilizam um único valor de módulo de elasticidade para todo o maciço (ATKINSON, 2020). Além disso, por ser baseado no CPT, um ensaio de campo robusto, repetível e que fornece um perfil contínuo, o método reduz a subjetividade e incerteza inerentes às correlações com o SPT (PHOON, 2022).

Estudos de caso e análises comparativas, como os compilados por Farias & Bello (2021), demonstram que o método de Schmertmann, quando aplicado com parâmetros adequados, apresenta uma boa concordância com recalques medidos em obra, consolidando sua confiabilidade e precisão superiores para solos granulares quando comparado a abordagens puramente teóricas ou empíricas mais antigas.

4.10.4 Método de Barata (1984)

A aplicação de teorias clássicas de recalque, desenvolvidas predominantemente para solos sedimentares, frequentemente mostra-se inadequada para os solos típicos de regiões tropicais e subtropicais. Estes solos, especialmente os residuais e lateríticos, possuem uma estrutura complexa e metaestável, com cementação natural e macroporos, que confere um comportamento atípico sob

variações de umidade. Foi neste contexto que Barata (1984) propôs contribuições, focando especificamente na previsão de recalques em solos poro-colapsíveis, cujo colapso estrutural upon wetting (ao serem umedecidos) representa um dos problemas geotécnicos mais críticos em fundações (NOGAMI & VILLIBOR, 2021).

Os solos tropicais colapsíveis exibem uma resistência apreciável e baixa compressibilidade em seu estado natural (não saturado), mas sofrem um rearranjo estrutural brusco e um significativo afundamento quando inundados sob carga. Este fenômeno não é capturado pelos modelos de adensamento de Terzaghi, que pressupõem uma estrutura estável e a expulsão lenta de água, nem pelos métodos elásticos convencionais. A avaliação desse potencial colapsivo tornou-se, portanto, uma etapa fundamental no dimensionamento de fundações em vastas áreas do território nacional (FUTAI et al., 2020).

O método proposto por Barata utiliza a teoria da elasticidade para o cálculo do recalque, determinando sendo modulo Yong através da Equação 5 sendo:

$$E = \eta \cdot q_c \quad (5)$$

Em que: $\eta = 2,0$ para areias e $8,0$ argilas parcialmente saturadas; q_c = Resistência de ponta no ensaio CPT (kgf/m^2).

Ademais, a solução de Barata utiliza-se da equação geral da elasticidade para determinar o recalque das fundações. A grande vantagem e contribuição do método de Barata é fornecer um procedimento quantitativo e direto para estimar a magnitude de um problema que, até então, era frequentemente tratado de forma apenas qualitativa. Ao integrar o ensaio de colapso no cálculo de recalques, o método alerta o projetista para a possibilidade de deformações muito superiores às previstas pelas teorias convencionais, permitindo a adoção de medidas de fundação ou tratamentos de solo adequados (GUIMARÃES, 2022).

Estudos de caso, como os compilados por Almeida & Mascaró (2021), demonstram a efetividade da abordagem de Barata na previsão de desempenho de fundações em solos poro-colapsíveis, consolidando-a como uma ferramenta indispensável para a prática da engenharia geotécnica brasileira.

4.10.5 Método de Burland e Burbidge (1985)

Em um esforço para superar as incertezas associadas aos métodos teóricos e fornecer uma ferramenta de previsão robusta para solos granulares, Burland e Burbidge (1985) publicaram um trabalho seminal que se tornou referência internacional. Diferente de abordagens puramente teóricas, este método é estritamente empírico, desenvolvido a partir de uma extensa compilação de mais de 200 casos reais de recalques medidos em fundações superficiais assentes em areias (SALGADO, 2022). Sua principal força reside no fato de ter sido calibrado diretamente com o comportamento observado de estruturas reais, oferecendo uma validação prática única.

A metodologia partiu de uma análise estatística criteriosa de casos históricos bem documentados, estabelecendo correlações entre o recalque medido, as dimensões da fundação, a tensão aplicada e a resistência do solo caracterizada pelo Ensaio de Penetração Padrão (SPT). O conceito central do método é a definição de um "índice de compressibilidade" do solo, que é inferido a partir do perfil de resistência do SPT, evitando assim a necessidade de determinar um módulo de elasticidade (ATKINSON, 2020).

O método prevê o recalque de uma fundação quadrada ou circular (w) em uma camada de espessura influente (H) por meio de uma relação poder expressa na sua forma básica pela Equação 6, em que:

$$w = q * B^{0,7} * \frac{1,71}{N^{1,4}} * f_s * f_l \quad (6)$$

Em que: w = Recalque (mm); Pressão aplicada (KN/m²); B =Menor dimensão da fundação (m); N = Média do N_{spt} na profundidade de influencia z_l ; f_l = fator de fórmula.

O fator de fórmula é definido pela relação da Equação 7, em que:

$$f_s = \left(\frac{1,25 * A}{B + 0,25} \right) \quad (7)$$

Sendo: A = Maior dimensão da fundação (m);

Para o fator de espessura, tem-se (Equação 8):

$$f_l = \frac{H}{z_l} * (2 * \frac{H}{z_l}) \quad (8)$$

Sendo que para $H > z_l = f_l = 1$

A principal vantagem do método de Burland e Burbidge é sua combinação de simplicidade de aplicação com uma sólida base empírica. Por utilizar diretamente o resultado do SPT, um ensaio universalmente disponível, e por incorporar fatores de correção para condições realistas, ele oferece uma previsão notavelmente confiável para uma ampla gama de casos (KNAPPETT & CRAIG, 2020).

Sua ampla validação com casos de campo lhe confere uma credibilidade que métodos puramente teóricos, com suas premissas idealizadas, nem sempre alcançam. Estudos comparativos modernos, como o de Farias & Bello (2021), continuam a demonstrar seu bom desempenho na previsão de recalques em solos granulares quando comparado a métodos mais complexos, consolidando-o como uma ferramenta de primeira escolha para projetos práticos e análises preliminares.

5 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo visa compreender o comportamento dos recalques em fundações localizadas na Universidade Federal do Maranhão, campus de Balsas-Ma, buscando identificar as principais causas, efeitos e correlações com geotécnicas locais ou falhas em execução. O estudo em questão trata-se de uma pesquisa aplicada, com abordagem quantitativa através de análise in loco e aplicações de abordagens literárias.

O presente trabalho foi realizado na Universidade Federal do Maranhão, localizado em Balsas- Ma, identificado na Figura 17. Tornando possível o estudo dos principais pontos da interação solo-estrutura e como influenciam no comportamento de uma estrutura com o decorrer do tempo.

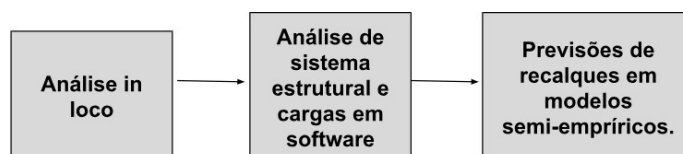
Figura 17 - Local de estudo de caso, UFMA- Campus Balsas.



Fonte: Do Autor.

5.1 Metodologia da Pesquisa

A metodologia adotada no presente estudo foi estruturada de forma sequencial e sistematizada, sintetizada por um fluxograma que organiza todas as etapas da pesquisa desde a aquisição dos dados até a análise final dos resultados.



5.1.1 Análise In loco

A primeira etapa consiste no levantamento in loco e avaliação prática em campo de estudo, localizado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA) / Campus Balsas realizando métodos de medições para determinações de recalques em pontos específicos com uso de nível a laser e medições diretas com trena de 8m. Nessa etapa, tem como finalidade identificar o comportamento das fundações e detectar

eventuais deslocamentos diferenciais entre os elementos estruturais da edificação em que será possível identificar posicionamento de recalques diferenciais no edifício em análise, como apresentado na Figura 18.

Figura 18- Coleta de dados in loco



Fonte: Do autor.

5.1.2 Seleção do Perfil geotécnico

A definição do perfil geotécnico será realizado com base nas características predominantes do solo da região de estudo, levando em conta dados de investigações geotécnicas, relatórios e estudos anteriores. O objetivo é identificar o tipo de solo (coesivos ou granulares) e comportamento mecânico, de forma que o modelo adotado represente adequadamente as condições reais de subsolo e permita análises seguras de recalques.

Os parâmetros geotécnicos (peso específico, coesão, ângulo de atrito, N-SPT, índice de vazios, índices de compressão C_c e C_r , coeficiente de adensamento C_v , resistência de cone q_c) serão obtidos a partir de bibliografia especializada e tabelas de correlação, visando representar um solo típico da região de estudo. Para os dados de resistência do solo, serão utilizadas a partir de estudos geotécnicos apresentados

pela Secretaria de Estado de Infraestrutura (SINFRA) referente ao Projeto executivo de engenharia para obras de melhoramento e pavimentação de segmentação de rodovia Estadual MA 140, elaborado em abril de 2014.

O parâmetro analisado para a obtenção da resistência do solo é denominado ISC (Índice de Suporte Califórnia) – do inglês California Bearing Ratio (CBR). Trata-se de um parâmetro geotécnico de caráter científico e empírico, utilizado principalmente no dimensionamento de pavimentação flexível, permitindo avaliar a resistência do solo ao cisalhamento e sua susceptibilidade à deformação.

No relatório do SINFRA foi observado pontos de sondagens a cada 20m, sendo o ponto no km 2,5km localizado em frente ao campus universitário em análise, em que foi determinado na estaca 126 o CBR de 9% e solo A-4, sendo assim a classificação do solo segundo Highway Research Board-HRB adotada pela AASHT definido como solos siltoso.

A relação de adaptação do CBR com o N_{spt} , foi abordada por Livneh e Ishai (1989), apresentada pela Equação 9 na qual:

$$\log CBR = -5,13 + 6,55 (\log SPT)^{-26} \quad (9)$$

Ademais, a análise do módulo de elasticidade é de fundamental importância para determinação e previsões de recalque. O estudo de Putri, Rao e Mannan (2012), abordam equações para obtenção do módulo de elasticidade com base em métodos empíricos adotados pela NAASRA (Associação Nacional das Autoridades Rodoviárias Estaduais Australianas) (1950), sendo calculada pela equação 10:

$$E = 22,4 \cdot CBR^{0.5} \quad (10)$$

5.1.3. Definição do Carregamento e da Fundação

Inicialmente, será realizada a análise das cargas atuantes nas fundações, com base nos dados fornecidos pelo projeto estrutural. As fundações serão do tipo superficial, conforme estabelecido no projeto existente do edifício em análise. Serão considerados os fatores de segurança e os coeficientes de correção de cargas

previstos. Para cada elemento estrutural vertical, serão calculadas as tensões verticais na base da fundação.

A metodologia inclui a identificação das dimensões da fundação — largura, comprimento, altura e profundidade de assentamento —, parâmetros que influenciam diretamente a distribuição de tensões no subsolo e o comportamento dos recalques. Essas informações serão obtidas a partir do projeto estrutural e servirão como referência para a aplicação dos métodos de cálculo de deformação do solo, garantindo a consistência entre o elemento estrutural e a análise geotécnica.

A análise de sobrecarga será realizada com base no dimensionamento do projeto estrutural. Os projetos foram desenvolvidos no software Revit para análise arquitetônica, considerando as dimensões e o sistema estrutural (sub e superestruturas) de projetos executivos previamente utilizados na construção do edifício. Posteriormente, o modelo foi importado para o software Eberick 2023 para verificação de relatórios de cálculo de esforços, deslocamentos, estados limites, cargas e sobrecargas nos elementos estruturais.

5.1.4 Aplicação de Modelos teóricos

Para o perfil e carregamento definidos, os recalques serão calculados utilizando cada um dos métodos estudados:

1. Elasticidade: Nesse método será considerado como um meio elástico linear, homogêneo e isotrópico. O cálculo inicia-se pela determinação do acréscimo de tensões vertical na base da fundação, resultante da aplicação das cargas transmitidas pelos pilares. Em seguida, será utilizada a equação elástica clássica em que será abordada no presente trabalho pela Equação 1, em que irá relacionar a tensão, módulo de elasticidade e coeficiente de poisson do solo para estimar a deformação vertical. O recalque total será obtido pela integração das deformações ao longo da profundidade de influência da carga, permitindo uma estimativa teórica do comportamento do solo sob a fundação.
2. Boussinesq: Baseado na teoria da elasticidade, será calculada pela Equação 3, o método é aplicado para determinar a distribuição das tensões verticais no interior do solo em função da profundidade e da distância ao ponto de aplicação da carga. A partir da equação para uma carga distribuída, é calculado o

acréscimo de tensão sob o centro e bordas da fundação, possibilitando uma análise mais precisa da variação das tensões no subsolo. Com esses valores, aplica-se novamente a relação elástica entre tensão e deformação para estimar o recalque correspondente, considerando as propriedades do solo.

3. Barata: O método fundamenta-se em correlações empíricas entre os resultados do ensaio de penetração padrão (SPT) e os recalques observados em fundações superficiais, no qual será calculada pela Equação 5. O procedimento será realizado com valores de NSPT ao longo do perfil de sondagem e sua conversão em parâmetros de deformabilidade do solo como módulo de elasticidade equivalente. A partir dessas correlações, será estimado o recalque total com base na distribuição de tensões atuantes sob a fundação.
4. Burland e Burbidge: Será calculado pela Equação 6, no qual, será ainda necessário a utilização de fatores de fórmula pela Equações 7 e 8 para o presente trabalho. O método empírico será adotado como referência comparativa, a metodologia considera a média ponderada dos valores de NSPT ao longo da profundidade equivalente a duas vezes a largura da fundação, relacionando esses valores as estimativas de recalque esperado, de modo que serão aplicados ainda fatores de correção relacionados ao tipo de solo.

5.1.5 Análise dos Resultados

Os resultados numéricos (valores de recalque total, recalque ao longo do tempo) serão tabulados. Será realizada uma “análise comparativa crítica”, discutindo: A discrepância entre os valores obtidos pelos diferentes métodos. As vantagens e desvantagens de cada abordagem no contexto do perfil de solo adotado. A influência da escolha dos parâmetros geotécnicos nos resultados. Qual método apresenta a previsão mais conservadora ou mais realista.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

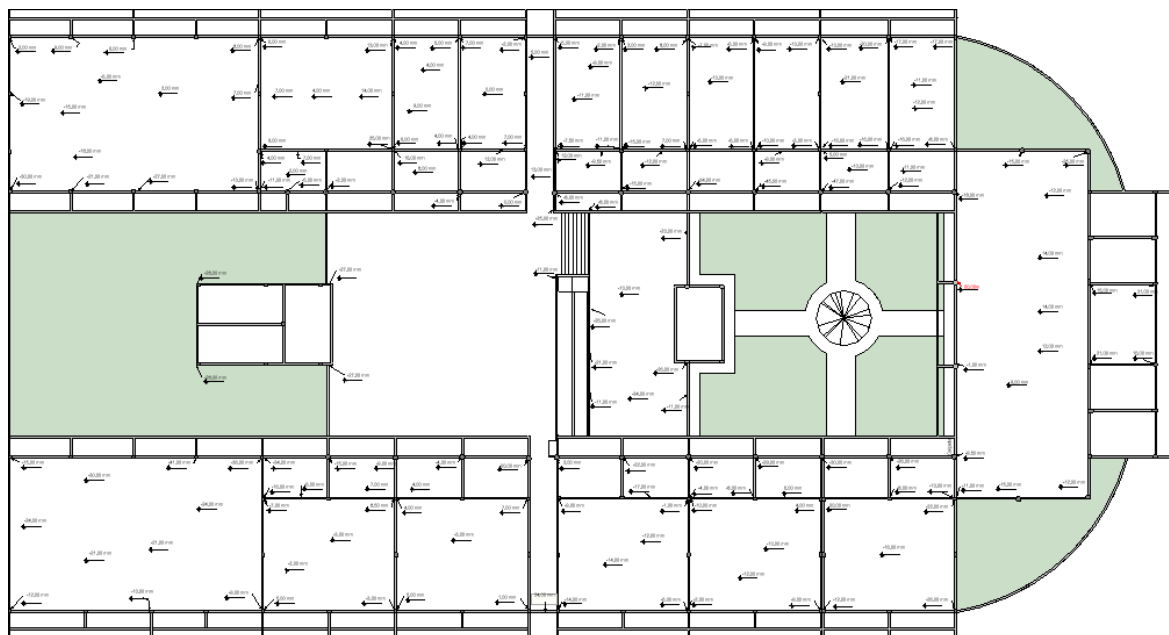
6.1 Análise in loco

A análise realizada in loco teve como finalidade identificar e quantificar os recalques presentes na edificação. A partir dos dados, é possível determinar com precisão os desníveis e variações altimétricas entre os pontos observado. No estudo in loco, adotou-se um ponto específico utilizado como referência altimétrica para a análise dos recalques, sendo a arvore central no edifício por apresentar condições estáveis e não sofrer influência significativa de cargas estruturais. A seleção do ponto ocorreu devido à ausência de um ponto externo fixo no qual deveria ser utilizado como referência inicial, de modo que adotou-se a escolha de um elemento que mantivesse comportamento praticamente constante ao longo do tempo fixo.

Nas proximidades do ponto de referência foi identificado um desnível entre o piso e o ponto inicial da estrutura, indicando a presença de um recalque inicial, o qual foi interpretado como o recalque geral da edificação em relação ao ponto fixo. Para a análise detalhada dos deslocamentos, adotou-se o ponto inicial como referência altimétrica, atribuindo-lhe valor zero. Dessa forma, as leituras realizadas nos demais pontos representam somente os recalques diferenciais da estrutura em relação a esse ponto. Os resultados apresentados, portanto, estão expressos em função do recalque diferencial. Caso seja necessário determinar o recalque global da estrutura, basta somar o recalque diferencial de cada ponto ao recalque geral previamente identificado de 4 mm.

Inicialmente os dados coletados foram organizados em uma planta 2D (Figura 19) (ANEXO A), com o intuito de análise de variações de desníveis em relação ao ponto 0,00mm, sendo apresentadas em mm.

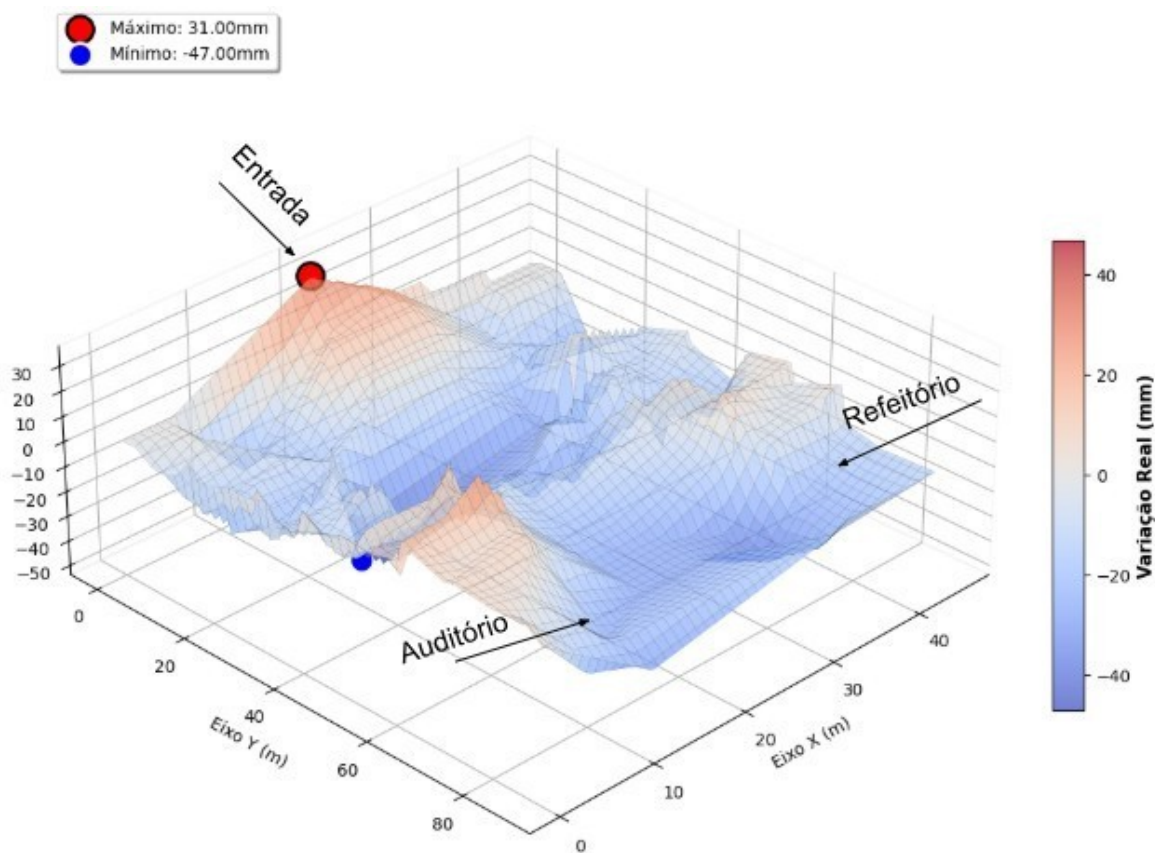
Figura 19- Análise geral de dados in loco.



Fonte: Do Autor.

De forma similar determinou-se assim o perfil altimétrico das variações do solo no estudo in loco, apresentada pela Figura 20.

Figura 20- Perfil Altimétrico.



Fonte: Do Autor.

A Figura 20 ilustrada pelo gráfico do perfil altimétrico, evidencia pontos centrais em que não foram realizadas leituras, devido principalmente a ausência de influência de sobrecarregamentos, não sendo considerado como área de interesse para o estudo. É notório ainda a localização de pontos com variações altimétricas máximas positivas (vermelha) e negativas (azul), revelando assim o comportamento espacial do terreno que merece análise aprofundada. As variações altimétricas registradas, indicam indícios de um padrão de resposta do solo às cargas aplicadas e a heterogeneidade inerente ao maciço do solo. A presença de valores extremos alcançando aproximadamente +30mm e -47mm demonstra uma amplitude significativa de recalque diferencial, ressaltando o comportamento elástico instantâneo, influenciando assim as deformações.

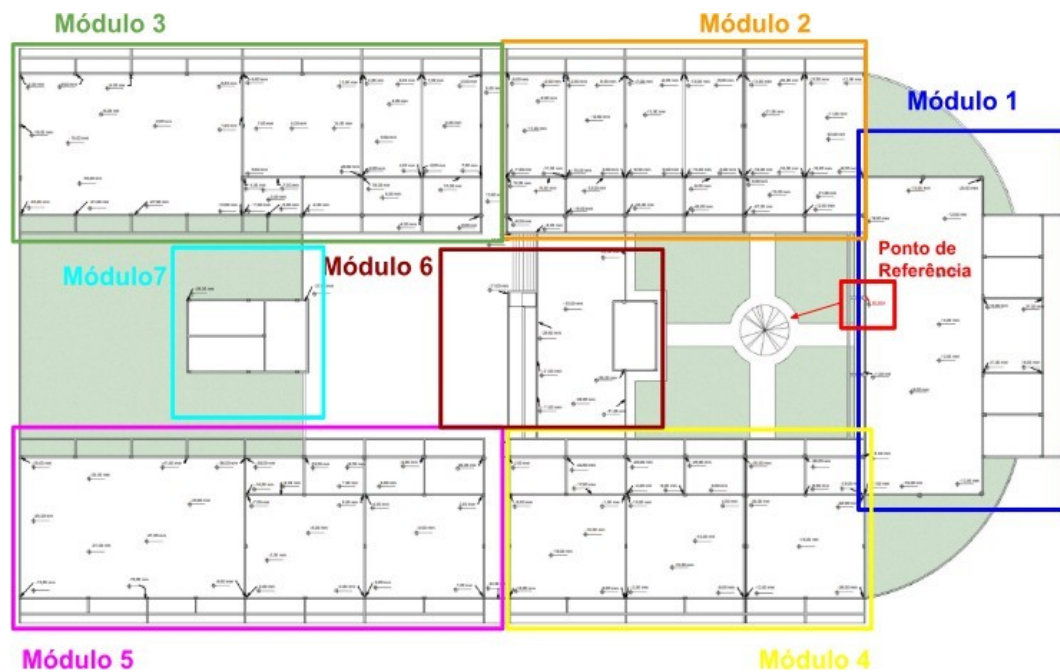
A amplitude de cerca de 77mm entre os extremos, sugere recalque diferencial significativo, com potencial para ocasionar redistribuição de tensões, deformações desiguais e manifestações. Segundo Lu et al. (2025) afirma que variações de recalque de magnitude significativa, tipicamente na faixa de dezenas de milímetros, e em casos

extremos acima de 80mm, associam esses valores a risco elevado de danos estruturais quando não tratados por medidas geotécnicas adequadas, como monitoramento por sensoriamento, remoto e monitoramento em campo. Os autores destacam que variações nessa magnitude indicam deformações contínuas ou concentrada (consolidação ou escavações próximas no solo).

Dessa forma, assim como em estudos observados, os pontos máximos de recalque representam um componente fundamental do processo de avaliação da segurança e do desempenho estrutural de uma edificação quando o terreno evidencia amplitudes máximas observadas. Portanto, os valores identificados têm potencial para alterar significativamente o comportamento do edifício ao longo do tempo.

Para a análise ampla, o edifício em estudo foi dividido em módulos sendo ilustrado na Figura 21.

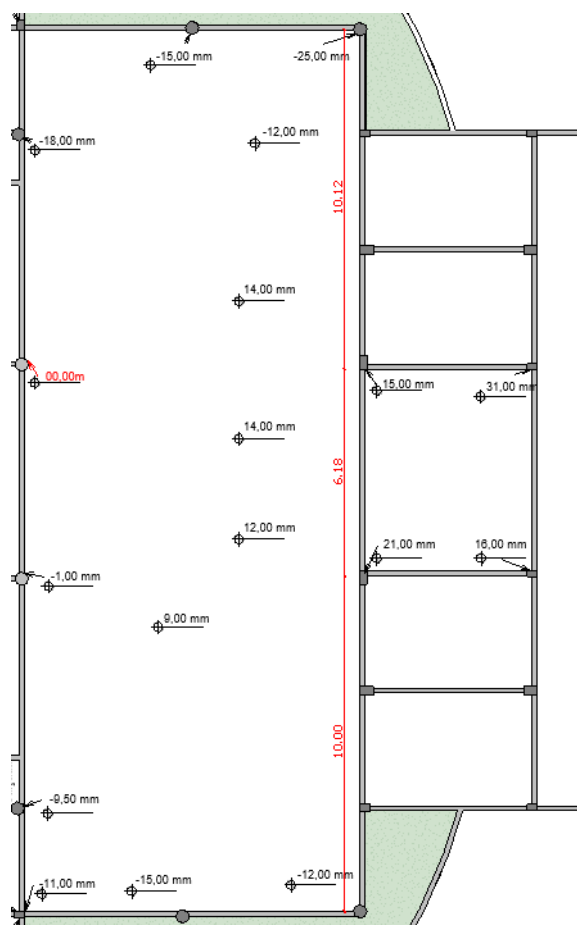
Figura 21- Análise geral de dados in loco.



Fonte: Do Autor.

Dessa forma, o módulo 1 no plano 2D é apresentado pela Figura 22.

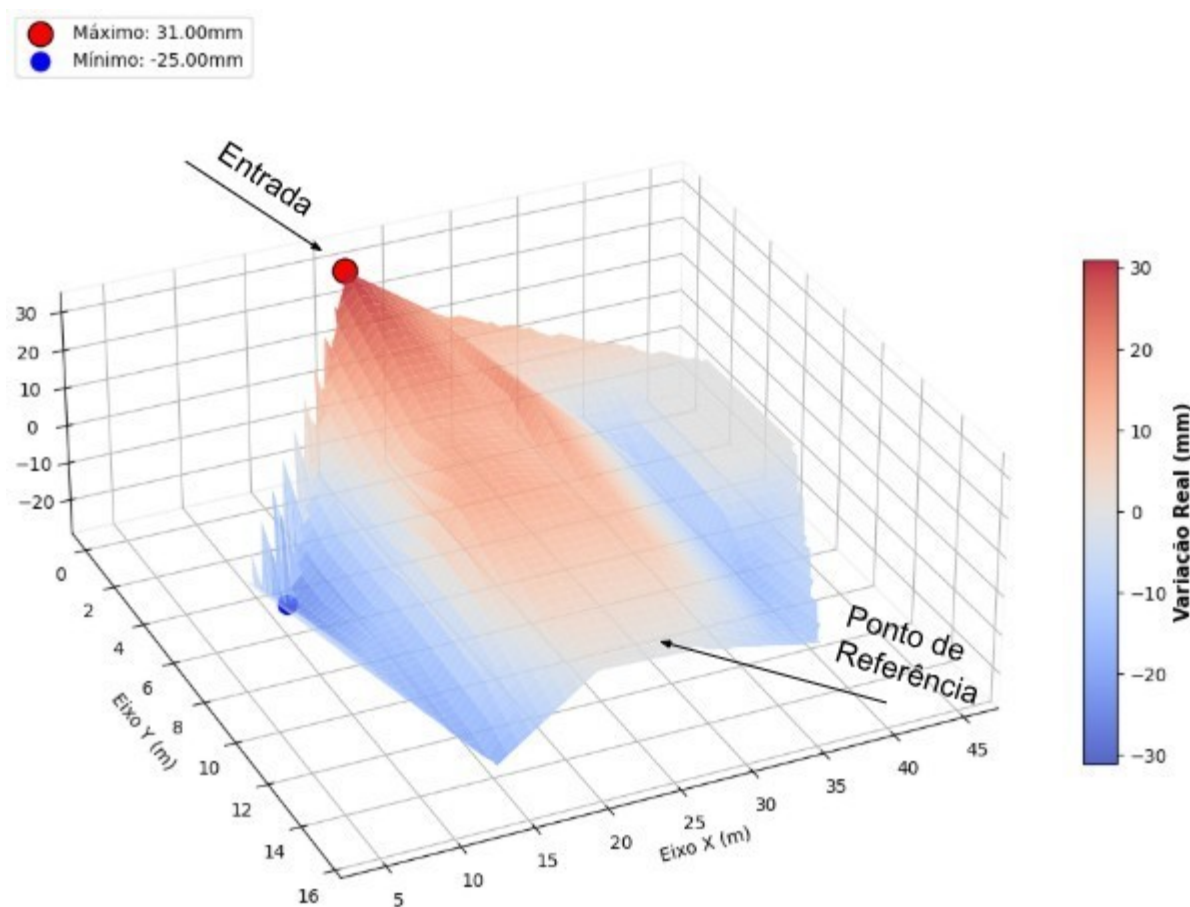
Figura 22- Módulo 1- Pátio de entrada.



Fonte: Do Autor.

A partir dos resultados expostos na Figura 22 foi possível traçar as leituras obtidas em 3D (Figura 23), onde é possível ainda analisar picos e vales representando variações altimétricas significativas no edifício.

Figura 23- Variações altimétricas módulo 1.



Fonte: Do Autor.

A distribuição dos recalques apresentada na figura revela um comportamento heterogêneo da fundação no módulo em análise. As áreas periféricas, onde foram identificados recalques (adensamentos) de -25 mm, -18 mm e -15 mm, caracterizando zonas de maior suscetibilidade ao adensamento do solo ou à concentração de esforços, sendo um cenário que é consistente como evidência de solos heterogêneos subjacentes. Assim, os estudos de Raheem (2022) as fundações em solos com variação de rigidez e estratificação tendem a apresentar recalque diferenciais acentuados, especialmente sob lajes, paredes ou encontro de estrutura, na qual alteram a tensão do solo. O autor ressalta ainda que sob certas combinações de carga, forma da fundação e profundidade do lençol freático, o recalque pode atingir valores que implicam a complicação de serviço, ressaltando que qualquer valor superior ao teor crítico, pode comprometer a estrutura.

Na região oposta, particularmente na área de entrada, surgem valores positivos como +31 mm, +21 mm e +16 mm (região de entrada do edifício). Contudo, a análise geométrica da edificação indica que esses valores não representam uma “elevação” da estrutura, mas sim uma diferença construtiva prévia: o piso de entrada encontra-se executado em nível superior, possivelmente para impedir o ingresso de água pluvial. Assim, ao considerar essa elevação como nível de referência, verifica-se que a diferença altimétrica entre a entrada e os pontos mais rebaixados da estrutura alcança cerca de 56 mm, o que reforça a necessidade de interpretar os dados de forma relativa e não absoluta.

Além disso, observa-se a ocorrência de transições abruptas de recalque em trechos curtos, como entre os pontos de -9 mm e +1 mm (situado próximo ao ponto de referência), sendo uma distância de 4m entre os pontos. Variações tão bruscas em distâncias pequenas apontam para o efeito de elementos rígidos dentro da edificação — como alvenarias resistentes, encontros estruturais, contraventamentos locais ou trechos onde cargas se concentram ou são redistribuídas. Pesquisas relatadas por Ou et al. (2022) mostram que paredes estruturais e elementos verticais tendem a restringir movimentos diferenciais, gerando gradientes de recalque elevados e, conseqüentemente, fissuração nas regiões adjacentes. Prosperi et al. (2023) complementam que descontinuidades geométricas, mudanças súbitas de rigidez e a presença de aberturas podem induzir concentrações locais de deslocamentos, o que está plenamente coerente com o padrão visto no módulo analisado.

Outro ponto relevante é que o comportamento altimétrico demonstra que o módulo não sofre um recalque uniforme. É notório em pontos próximos transições bruscas, no qual existe tendência a um afundamento nas extremidades e uma região intermediária com valores moderados (-12 a +1 mm), sugerindo que o subsolo pode apresentar variação de rigidez, “bolsões” de solo mais compressível ou influência de cargas distintas ao longo do perímetro. Esse comportamento é típico em edificações com interferência de aterros parciais, variações de capacidade de suporte entre taludes e regiões centrais, ou ainda efeitos de drenagem diferenciada nos bordos da fundação.

Portanto, o gradiente de recalque global ($\approx 1/470$), considerando a diferença total de 56 mm ao longo de 26,3 m, encontra-se próximo ao limite inferior dos critérios usuais de serviço (entre $1/300$ e $1/500$). Isso indica que a estrutura opera em estado limítrofe, com possibilidade de ocorrência de manifestações patológicas, especialmente fissuras em alvenarias e desprendimentos de revestimentos. No estudo em análise foi observado áreas no módulo 1 com presença de manifestações patológicas, como fissuras em elementos estruturais e deformações no piso, sendo ilustradas na Figura 24.

Figura 24- Manifestações patológicas -Módulo 1.



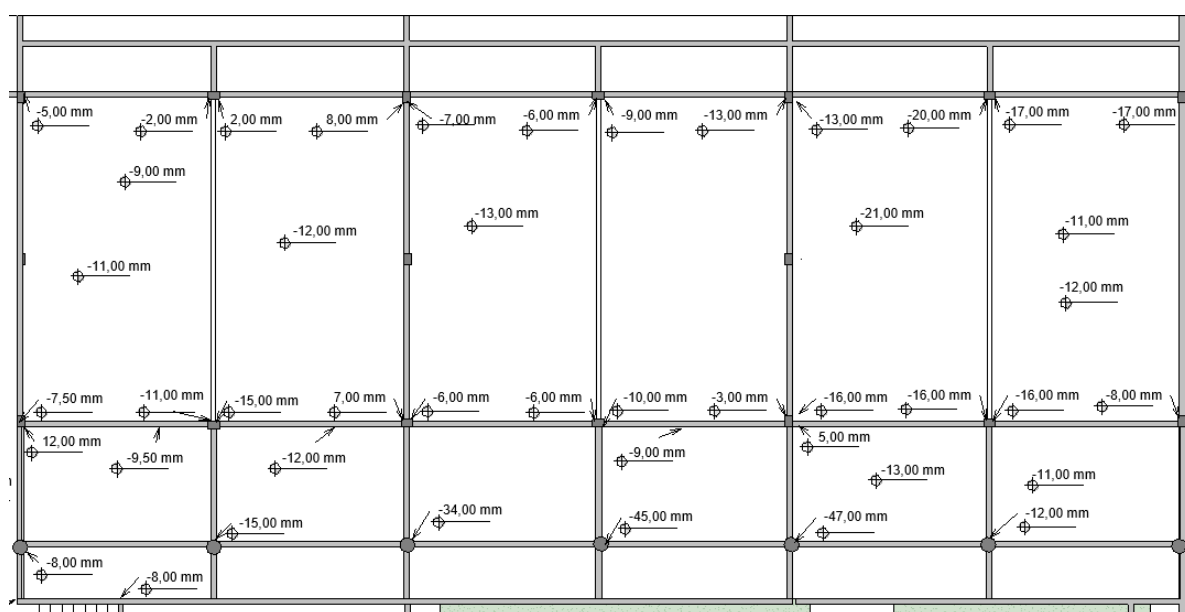
Fonte: Do Autor.

Os pontos analisados abordados na imagem, refletem a variação de recalques com base ao ponto de referência, exibe manifestações patológicas principalmente em pontos periféricos da área em análise, assim como evidenciada Figura 24, em que a extremidade direita apresenta valores de -15mm e -25mm próximo principalmente de pilares, no qual observa-se deformações como rachaduras e desprendimentos no próprio elemento estrutural (pilar). Por conseguinte, na lateral esquerda, observa-se variações de -15mm e -12mm em que apresentam deformações no piso como desprendimento do piso com o elemento de vedação (peitoril na Figura 24). Desse modo, a presença de transições bruscas —

mais críticas que o gradiente global — reforça a necessidade de monitoramento e eventual intervenção, priorizando regiões onde há queda rápida de cota.

O autor Gusmão (1990) em sua dissertação sobre interação solo-estrutura, destacou que a rigidez da superestrutura tende a reduzir o recalque total, mas é ineficaz em eliminar o recalque diferencial nas áreas de maior concentração de carga (pilares), justamente onde a maior tensão é transmitida para o solo. Essa concentração de deformação nas extremidades, onde a restrição lateral é menor ou a variação do bulbo de tensão é mais acentuada, é um indicativo de que a capacidade de suporte local está sendo mais exigido. Por conseguinte, o módulo 2, ilustrado pela Figura 25 apresenta variações em blocos de salas de aulas e corredores.

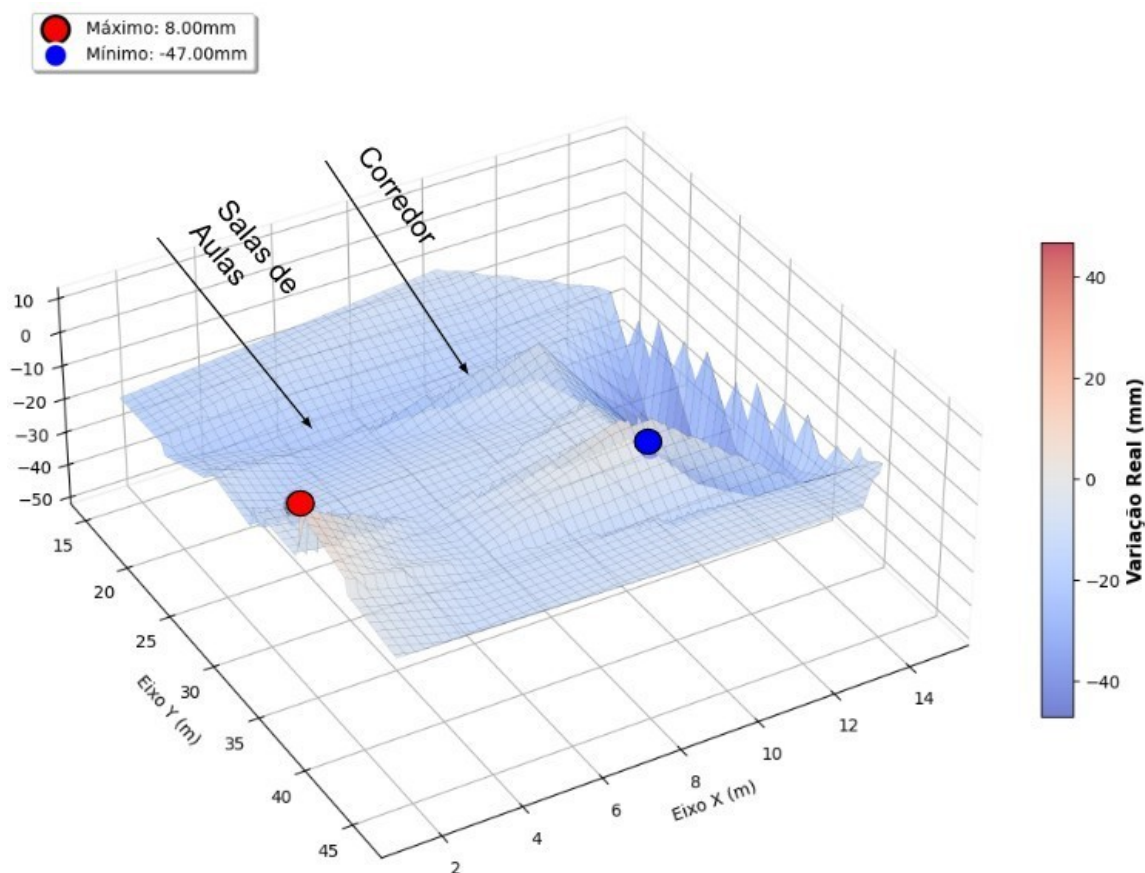
Figura 25-- Módulo 2- Salas de aulas/corredores.



Fonte: Do Autor.

A partir da imagem 2D foi possível ainda analisar a região em um gráfico 3D com as variações altimétricas observadas na Figura 26.

Figura 26- Módulo 2 plotagem 3D.



Fonte: Do Autor.

Nessa região evidencia os pontos críticos de assentamento do solo de - 47mm, - 45 mm e - 35 mm localizados próximos de pilares e em áreas com existência de laje (corredores), configuram um padrão de concentração de esforços localizados em áreas próxima de pilares e fundações nessa região, sendo os maiores recalques observados no edifício. Isso sugere que a fundação nessa região, está submetida a sobrecargas pontuais ou o terreno apresenta menor rigidez ou compressibilidade maior, comprometendo assim a sua capacidade de suporte. Com isso, a magnitude de recalques (próximos de 5 cm) em fundações superficiais implicam uma falha crítica no sistema de fundação, superando os limites de tolerância estabelecidos pela NBR 6122, evidenciando assim a insuficiência da capacidade de suporte local, ocasionando assim em falhas estruturais.

Além disso, em pontos específicos de salas de aula é evidente ainda desníveis acentuados de - 21 mm, - 20 mm, - 17 mm em regiões próximas, assim como no módulo 1, tornando-se assim essa região com assentamentos máximos, no qual a

tensão do solo nessa região é crítica. Vale ainda analisar, pequenas variações de ascensão de menor magnitude como de 2mm a 12mm, em que considera-se pontos de recalque quase nulos, devido a existência de um recalque geral da edificação (4 mm) como abordado anteriormente.

Os estudos de Burland e Wroth (1975) afirma que gradientes diferenciais de deslocamentos, são do ponto de vista estrutural mais crítico quanto o recalque absoluto. Essa variação abrupta entre os pontos próximos gera distorções angulares capazes de produzir esforços adicionais não previsto ao dimensionamento original, como cisalhamento indireto, momentos fletores secundários e rotações não previstas nas lajes e vigas, tornando assim alta possibilidade de surgimento de manifestações patológicas. Dessa forma, o conhecimento da influência do recalque diferencial principalmente em pontos de variações distintas é fundamental na verificação do Estado Limite Último (ELU), pois os momentos fletores adicionais podem influenciar diretamente a margem de segurança da estrutura inicialmente dimensionada.

Além disso, os estudos sobre interação solo-estrutura, como dos autores Júnior, et al. (2021) evidenciam que a própria geometria da estrutura e a distribuição de cargas são determinantes na formação de áreas de recalque. De forma que, a interpretação de variações altimétricas deve sempre coincidir com os esforços que alteram a rigidez local da edificação, sendo de fundamental importância a condição geotécnica do solo, como diferenças de perfil do solo, existência de reaterros e etc.

As análises experimentais desenvolvida por Lopes e Oliveira (2020), ao estudarem fundação radier em solo silto-argiloso, identificam que zonas com maior rigidez geométrica e com presença de lajes contínuas tendem a apresentar recalques mais expressivos, de modo que, os pilares localizados a baixo dessas áreas tendem a concentrar maiores deformações, aumentando de forma significativa a tensão transmitida ao solo na região reduzindo assim a capacidade de acomodação de deformações da fundação nesse ponto, ocasionando no aumento de tensão nesses pontos, de modo que, reduz a capacidade do solo de acomodar deformações previstas.

Portanto, alguns pontos analisados no módulo 2 evidenciaram presença de deformações em sua estrutura, como apresentados na Figura 27.

Figura 27- Manifestações patológicas- Módulo 2.



Fonte: Do Autor.

Na região em análise, observa-se pontos próximos de máximos com deformações no piso, em áreas extremas do bloco, valores médios de -47mm e -45mm, de modo que, essas variações indicam as condições físicas da estrutura, confirmando assim as deformações consequentes do assentamento do solo. Os autores Branco e Oliveira (2013) enfatizam que a magnitude desses valores é comumente associado ao adensamento primário e secundário em solos compressíveis, sendo necessário o acompanhamento com precisão para evitar deformações extremas.

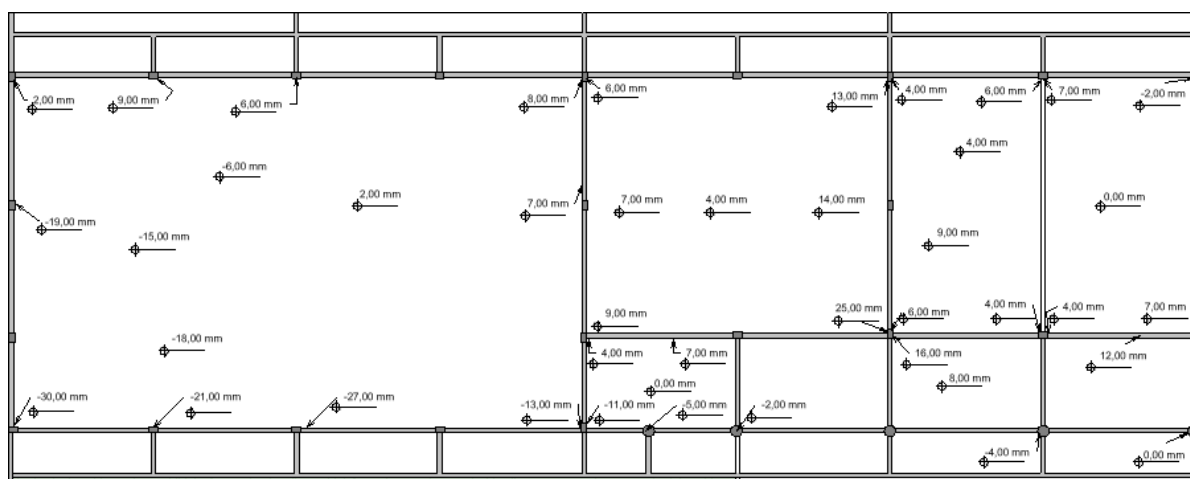
Segundo Jordão Júnior et al. (2021) reforçam ainda que recalques localizados superiores a 30mm em fundações superficiais são indicativos de redistribuição de esforços e de possíveis estado crítico de tensão no solo. Esses fenômenos podem ser ainda intensificados por variações hidrológicas, que afetam diretamente solos argilosos, aumentando sua compressibilidade. Consequentemente, foram observados in loco áreas com fissuras e trincas, deformações do solo, como especificado na Figura 25.

Além disso, é notório nessa região fissuras em salas de aulas, sendo regiões próximas de assentamentos de -21mm, -16mm e -8mm. Embora os valores sejam

próximos, a diferença entre assentamentos em pontos adjacentes caracteriza a existência de um gradiente de recalque, expresso na forma de distorção angular. Essa condição é fundamental para análise, pois diferenças de deslocamento vertical entre apoios vizinhos tendem a concentrar tensões na superestrutura, favorecendo o surgimento de danos principalmente em elementos de alvenaria. No estudo de Mohamed et al. (2020) modelaram recalques diferentes, e concluíram que variações altimétricas entre 20mm e 30mm é suficiente para iniciar fissuras por cisalhamento diagonal nas alvenarias devido ao efeito de restrição imposta pela estrutura rígida.

Por conseguinte, o módulo 3 é analisado conforme as obtenções de dados in loco, ilustrado na Figura 28. Sendo apresentando as variações altimétricas em região de salas de aulas, auditório e corredor.

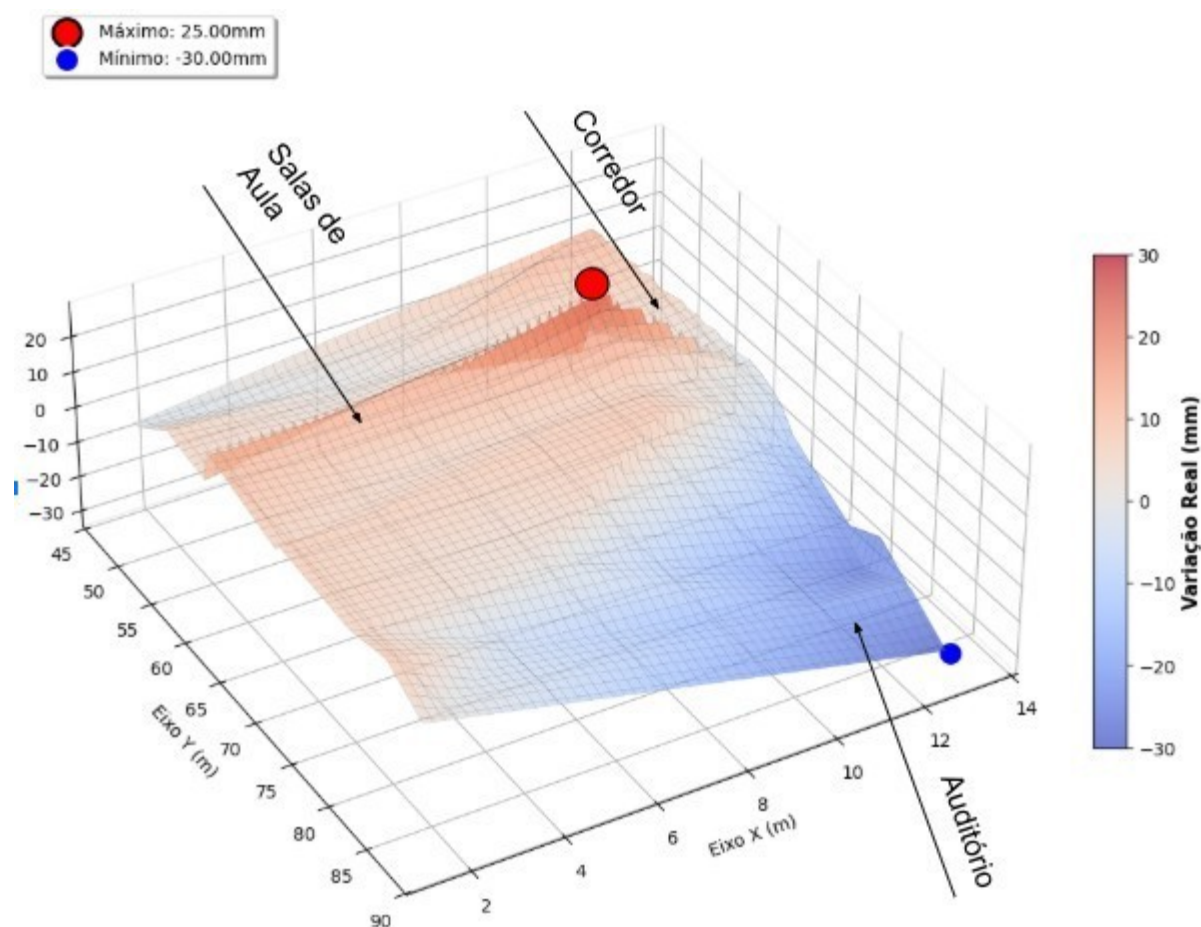
Figura 28- Módulo 3- Salas de aula, auditório e corredor.



Fonte: Do Autor.

A partir da modelagem 2D, modelou-se a projeção 3D das variações, como apresentadas na figura Figura 29.

Figura 29- Módulo 3 -Plotagem 3D.



Fonte: Do Autor.

No módulo 3, a evidência de recalques concentrados nas extremidades da edificação com valores de -30mm e -27mm sugere a ocorrência gradativa de assentamentos localizados. Esse tipo de recalque diferencial está associado a danos advindos de sobrecargas pontuais (como marquises ou bordas com concentração de cargas) ou de solo com rigidez insuficiente ou heterogêneo.

Estudo comparativo de previsões de recalque em fundações realizado por Júnior, de Melo Ferreira e Gusmão (2021), demonstra que a heterogeneidade na rigidez do solo e o dimensionamento inadequado da fundação podem levar a recalques diferenciais significativos, quando há redistribuição de esforços ao longo da estrutura tornando esses pontos mais críticos. Essa condição, devido aos esforços não previstos podem concentrar em regiões específicas, tornando extremidades ou pontos em extremidades críticas. Essa concentração de tensões pode gerar patologias como fissuras inclinadas, desprendimento de revestimentos, deformações em vergas e

empenamentos locais, exatamente em locais próximos onde o recalque manifesta, evidenciando assim o recalque diferencial nessas regiões.

Internamente, a edificação apresenta cotas positivas de até +25mm, resultando em um desnível geral de 57mm entre os pontos mais baixos e mais altos da planta. Esse contraste altimétrico surge a ocorrência simultânea de levantamento e recalque. Os autores Alnmr, Ray e Alzawi (2024) evidenciam que fundações superficiais sobre solos expansivos podem sofrer tanto assentamento quanto levantamento na base. Nessa condição é comum surgimento de fissuras em paredes internas, abertura de juntas de alvenaria, empenamento de pisos, deslocamento de rodapés e problemas de esquadrias.

Os autores Abden et al. (2024) apontam que edificações sobre solos expansivos frequentemente apresentam comportamento misto, no qual partes da estrutura sofrem expansão enquanto outras passam por contração ou adensamento. Isso resulta em gradientes de deformação, incompatibilidades estruturais e concentração de esforços em pontos vulneráveis da superestrutura. Os autores mencionam consequências como deslocamento de rodapés, fissuras inclinadas, abertura irregular de juntas presentes nessas situações. Na análise em campo foram observados manifestações patológicas como fissuras, deformações em piso e rodapés, assim como abordado por alnmr, Ray e Alzawi (2024) e Abden et al. (2014), como apresentado na Figura 30.

Figura 30- Manifestações patológicas módulo 3.



Fonte: Do autor.

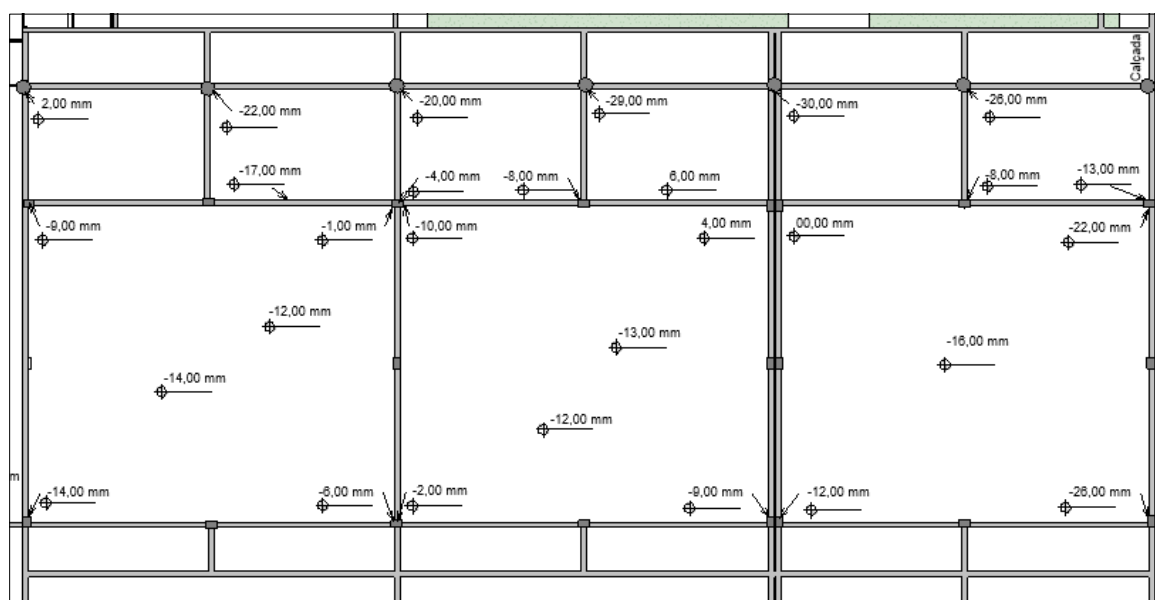
Na Figura 30 observa-se manifestações patológicas principalmente em regiões de extremos da edificação. As deformações são observadas em pontos observados em corredores identificados entre 0mm, 12mm e -4mm, sendo perceptível irregularidades no piso, fissuras entre pilares e vigas, fissuras em vergas. É perceptível que o local de maiores patologias, encontra-se próximo de pontos variados, em que cotas superiores e inferiores apresentam uma distinção de -16mm, acarreta uma distorção angular que é o principal agente causador de patologias, assim como observadas nessa região.

O estudo de Holanda (2003) analisou que deslocamentos inferiores a 10mm em edificações rígidas podem resultar em fissuras localizadas em vergas e encontros entre alvenarias e elementos estruturais. No estudo verificou-se ainda recalques de -1,8mm sendo observado manifestações patológicas como fissuras horizontais nessa mesma região, apresentando fissuras com abertura de 2,5mm. Dessa forma, torna-se perceptível que edifícios de elevada rigidez e baixa capacidade de resistência do solo influenciam diretamente variações milimétricas do solo devido ao sobrecarregamento, provocando redistribuição de tensões de estruturas, resultando manifestações significativas.

Segundo Oliveira (2012), observou em edificações com lajes e pilares e paredes de vedação (vedação ou estrutural), verifica-se com certa frequência a ocorrência de fissuras horizontais entre os três elementos, refletindo a existência de movimentações diferentes ou deformações concentradas em estrutura. O autor confirma assim a existência de diferenças entre as deformações entre fundações, estrutura e elementos de vedação, concluindo a diversificação de movimentações das fundações, na qual uma cede mais que a outra, havendo uma incompatibilidade de movimentos entre pilares/vigas e alvenaria suportada.

Em sequência das análises in loco, observa-se o módulo 4, apresentado na Figura 29, demonstra as variações altimétricas em salas de aula e corredores.

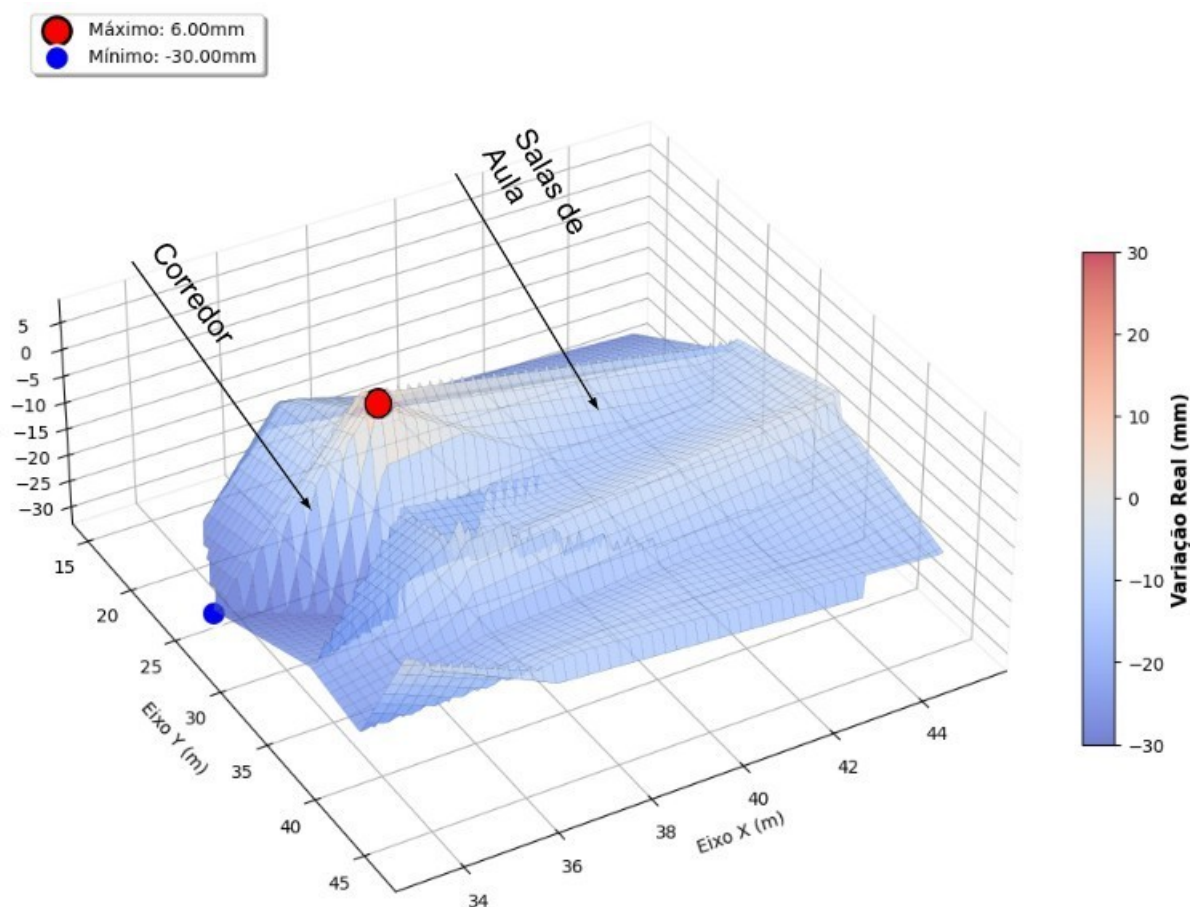
Figura 31- Módulo 4- Salas de Aula e corredores.



Fonte: Do Autor.

A representação da área foi plotada no gráfico 3D, representado pela Figura 32.

Figura 32- Módulo 4 Plotagem 3D.



Fonte: Do Autor.

A região do módulo 4 aborda os pontos críticos de assentamento do solo, consiste nos valores de -30 mm, -29 mm e -26 mm localizados em pontos em pilares extremos próximos de pilares assim como abordado nos módulos 1, 2 e 3. Em contrapartida aos módulos 1 e 3 apresentam variações altimétricas reduzidas, o módulo 4 mostra variação mínima média porém concentra rebaixamentos próximos máximos igual a -30 mm, configurando um gradiente vertical excessivo, caracterizando o recalque diferencial em zonas próximas de fundações, o gradientes desse tipo produzem distorções angulares notáveis na superestrutura (OLIVEIRA, 2012).

A partir disso, evidencia-se a presença de valores expressivos de deslocamentos verticais localizados, próximos de -30 mm, tornando perceptível o comportamento não uniforme do solo, no qual está associado a distorções angulares significativas na superestrutura. Ademais, ao abordar estudos sobre variações

volumétricas do solo expansivo e sua compressibilidade, como analisados no módulo 4, representam um indicativo consistente de instabilidade geotécnica localizada.

Dessa forma, foram observadas manifestações patológicas in loco, evidenciando fissuras e deformações de piso na sala 1 e 3 (Figura 33), em que correspondem a pontos de rebaixamento máximo. Em estudos sobre solos expansivos confirmam que variações volumétricas ocasionam em assentamento ou elevação do solo/piso surgem tensões de tração e cisalhamento que se manifestam principalmente em elementos de vedação e acabamentos (MOHAMED, 2024).

Figura 33- Manifestações patológicas- Módulo 4.



Fonte: Do Autor.

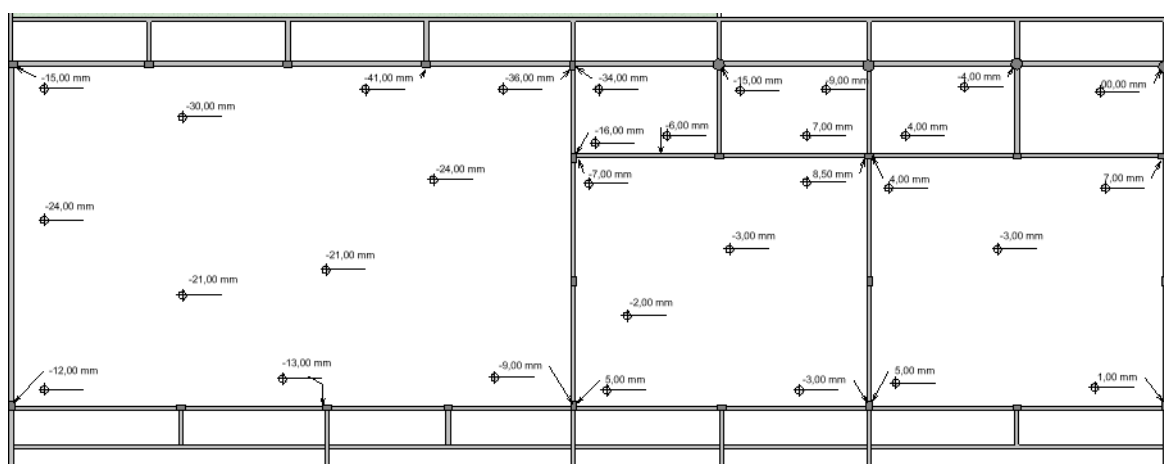
A figura retrata de manifestações em áreas próximas, correspondendo a áreas de sala de aula com variações em áreas internas de recalque de 0mm a -22mm, -8mm e -26mm resultando em fissuras diagonais em parede de vedação e rebaixamento do piso próximo de rodapés. Em contrapartida, observa-se ainda a existência de deformações no piso, como trincas e desnivelamento.

A existência de pontos negativos nessa região ressalta a existência de concentração de esforços no revestimento e nas junções de acabamentos e parede, sendo essa área identificada com menores pontos positivos. Esse gradiente promovem o destacamento de rodapés e fragilizam a aderência do assentamento

cerâmico ou contrapiso, além disso, o estudo de Rauecker (2018), através de provas de placa e monitoramento em campo, os recalques estimados e medidos atingiram a ordem de -65,03mm em que foram observados fissuras em piso, além ainda de rebaixamento acentuado na base de pilares, relacionadas ao recalque diferencial e não somente a falhas locais de estruturas.

Em sequências as análises in loco, observa-se a região do módulo 5, apresentado pela Figura 34 abordando pontos de recalques entre sala de aula e corredores.

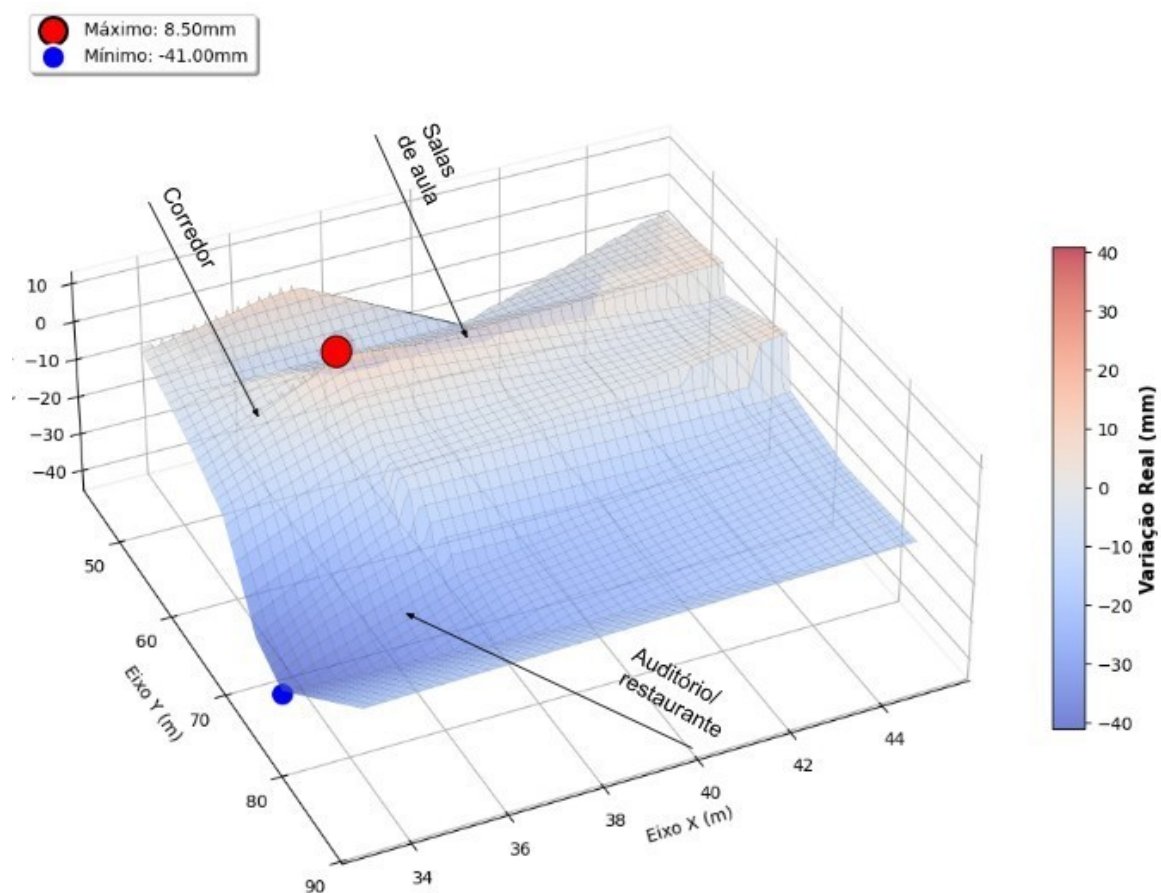
Figura 34- Módulo 5- Sala de aulas, corredor e auditório (refeitório).



Fonte: Do Autor.

A partir da figuram em análise, realizou-se a plotagem do gráfico em 3D do modelo, como apresentado na Figura 35.

Figura 35- Módulo 5 Plotagem 3D.



Fonte: Do Autor.

No módulo 5 existem recalques acumulados de - 41 mm, - 36 mm e - 34 mm para os maiores pontos críticos indicam falhas geotécnicas ou sobrecarga estrutural nessa região, em consequência disso, foram observados ainda fissuras e trincas nessa área (auditório/refeitório) como apresentada na Figura 36.

Figura 36- Manifestações patológicas- Módulo 5.



Fonte: Do Autor.

Ademais, é observado ainda que o recalque diminui progressivamente de -41 mm para -38 mm e -9 mm evidenciando uma zona de flexão vertical intensa nessa área. A partir dos dados observados nesse módulo demonstra que a edificação apresenta variações altimétricas significativas. Dessa forma, os recalques acumulados apresentam uma instabilidade do sistema solo-subestrutura, sendo possível a sobrecarga excêntrica, como a presença de marquises, intensificando os recalques nesses locais.

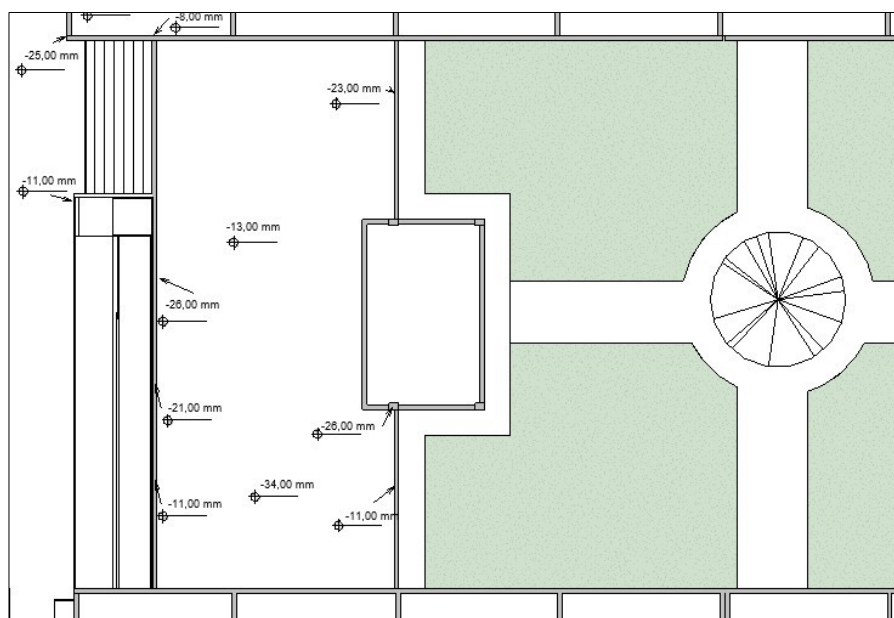
Os pontos apresentados na Figura 36 com fissuras diagonais, trata-se de pontos próximos de -36 mm e -41 mm, sendo esses pontos considerados máximos para essa região. O comportamento indica a presença de uma zona com tendência a flexão vertical, onde a base da estrutura é submetida a curvatura diferencial do solo ao apoio, como observado. Dessa forma, a superestrutura passa a responder a deformação ocasionadas por esforços adicionais dos elementos rígidos. Segundo Gonsalves (2004), fissuras diagonais inclinadas são típicas de pórticos quando há redistribuição forçada de esforços devido ao recalque diferencial severo. Nesse caso, a estrutura passa a trabalhar em flexão composta devido ao deslocamento vertical entre pilares, com isso, a não uniformidade altera o prumo dos pilares o que induz a variação de momento.

Em análise de pontos variações significativas, como pontos variando entre -36mm, -41mm e -9mm aborda área de desnível acentuado entre os pontos de apoio vizinhos principalmente em trechos curtos, confirma a possibilidade de flexão a base estrutural. Assim como estudos mencionados anteriormente, Jordão Júnior et al, (2022) reforçam que recalques diferenciais acentuados em pontos de apoio são resultantes da falha do sistema estrutural, de modo que tende a perder a sua funcionalidade estrutural, tornando-se seu limite de absorção de deformação no limite.

A estimativa aceitável geral de variação de recalque é de 4mm esse valor quando comparado com a literatura técnica nacional, encontra-se dentro do intervalo considerável aceitável para recalques principalmente em edificações de pequeno e médio porte, desde que não haja aumento significativo da distorção angular, assim como afirma Holanda Júnior (2003). Portanto, os valores observados quando comparados com a literatura relatam pontos superiores ao estimado em sua estrutura, justificando assim a presença de manifestações patológicas.

Em continuidade as análises in loco, o módulo 6 ilustra, ilustrado na Figura 37, aborda variações altimétricas da cantina.

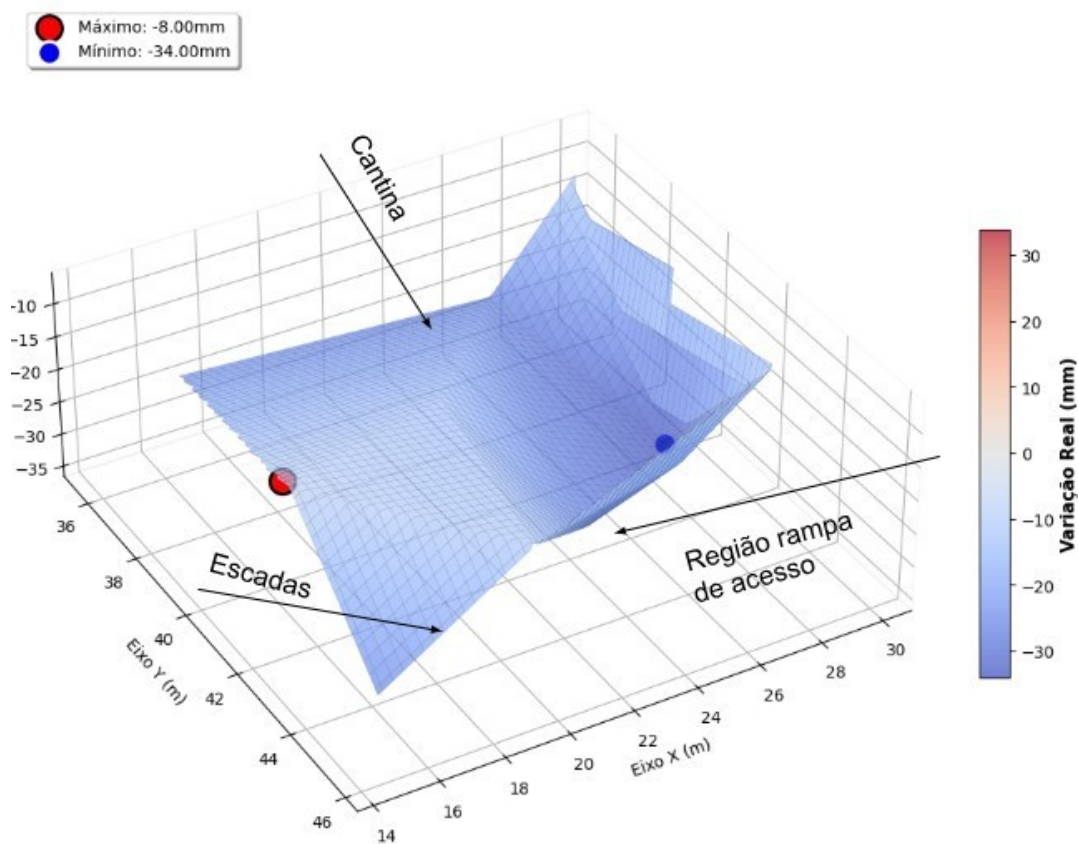
Figura 37- Módulo 6- Pátio e cantina.



Fonte: Do Autor.

A partir dos dados analisados, os dados foram plotados na Figura 38.

Figura 38- Módulo 6 plotagem 3D.



Fonte: Do Autor.

No módulo 6 a cantina é um ambiente independente do edifício, não se conecta por vigas (baldrames ou superficial) existindo somente ligação utilizando alvenaria. Contudo, as análises altimétricas evidenciam um deslocamento vertical em pilares, registrando recalques de -26mm e -11mm em pontos adjacentes. Por conseguinte, a ausência de ligação entre vigas superiores ou vigas baldrames na região, permite que as fundações do elemento estrutural central e a estrutura do edifício se movimente de forma adjacente, movimentando-se de forma autônoma. De modo que, essa independência observou-se um desnível de 15mm em uma curta distância, sendo assim, a magnitude desse deslocamento é um indicativo de recalque diferencial.

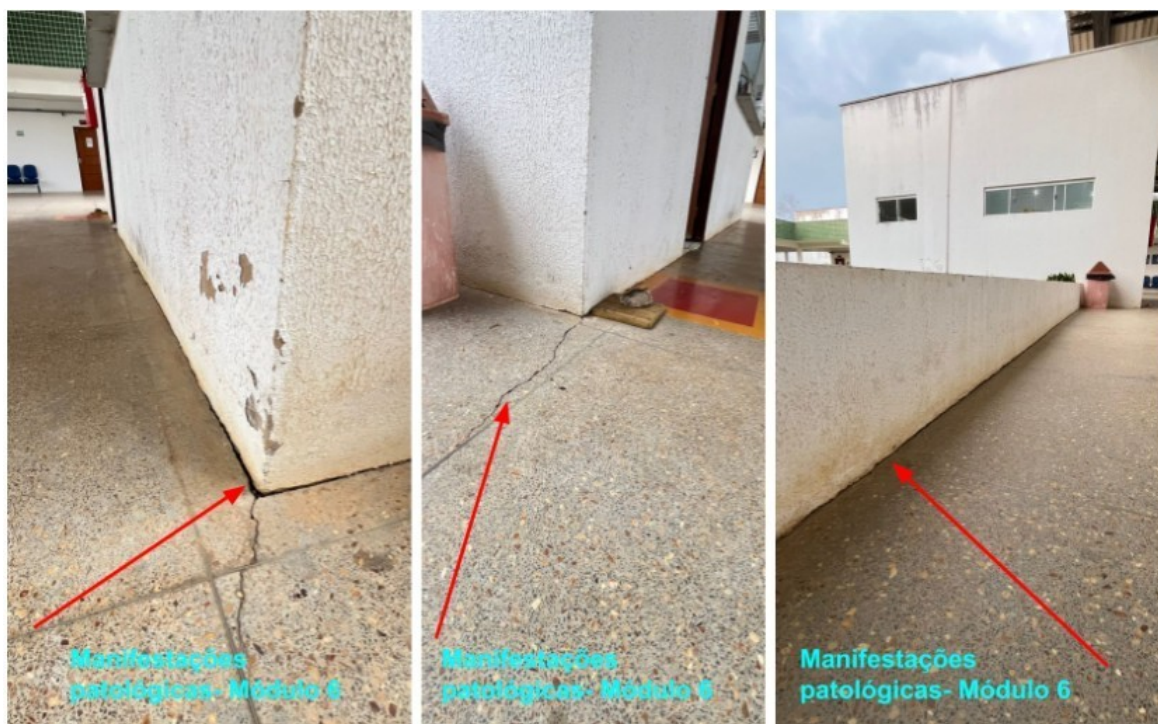
As análises experimentais desenvolvida por Lopes e Oliveira (2020), ao estudarem fundação radier em solo silto-argiloso, identificam que zonas com maior rigidez geométrica e com presença de lajes contínuas tendem a apresentar recalques mais expressivos, de modo que, os pilares localizados a baixo dessas áreas tendem a concentrar maiores deformações, aumentando de forma significativa a tensão

transmitida ao solo na região reduzindo assim a capacidade de acomodação de deformações da fundação nesse ponto.

Segundo Jordão Júnior et al. (2022) reforçam que recalques localizados superiores a 30mm em fundações superficiais são indicativos de redistribuição de esforços e de possíveis estado crítico de tensão no solo. Esses fenômenos podem ser ainda intensificados por variações hidrológicas, que afetam diretamente solos argilosos, aumentando sua compressibilidade.

No módulo 6, observa-se que os valores de máximos como -34mm, -26mm e -24mm, indica regiões onde o solo subjacente teve maior adensamento, ou falhas. Na área não apresenta pontos de elevação do solo, o que indica área de assentamento total na região, sendo o rebaixamento máximo no centro da área. Por conseguinte, foram observados falhas, fissuras em revestimentos e no piso nessa área, como apresentado na Figura 39.

Figura 39- Manifestações patológicas- Módulo 6.



Fonte: Do Autor.

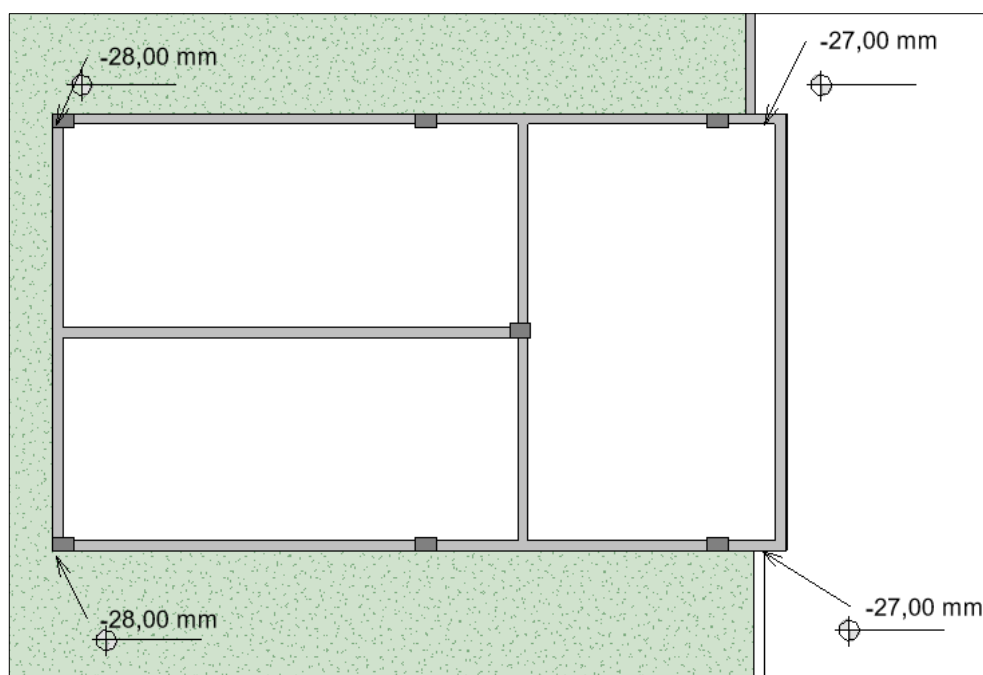
Na Figura 39, observa-se deformações principalmente no piso da área em análise, como tricas próximas de pilares, além ainda de desprendimento do piso com a parede, apresentado na primeira imagem e em peitoril, tornando não homogêneo a

movimentação dos elementos nessa região. De acordo com Velloso e Lopes (2011), a análise de fundações em solos menos rígidos exige considerar que sistemas sem rigidez global limitam a capacidade da estrutura de redistribuir esforços, resultando em deformações mais intensas onde não há continuidade estrutural.

Portanto, as manifestações observadas, podem ser explicadas pela não vinculação estrutural do edifício principal, ao contrário de um sistema contínuo, onde vigas baldrame, sapatas associadas permitem a redistribuição de tensões. Na região em estudo, os pilares isolados recebem e transmitem cargas diretamente ao solo, de modo que, cada fundação corresponde de maneira autônoma as condições do solo, como variações de umidade e a resistência do solo.

Por fim, a análise in loco concluiu-se no módulo 7 em que é apresentado na Figura 40.

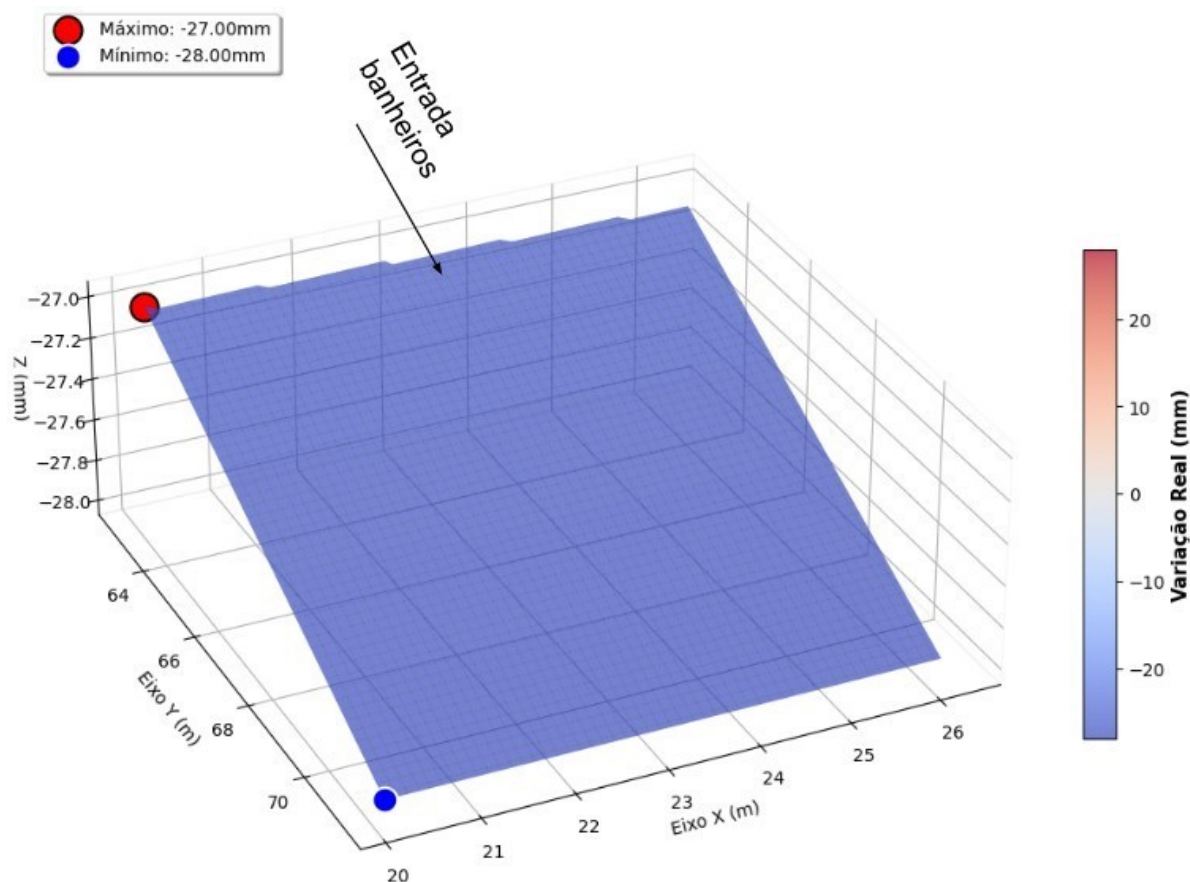
Figura 40- Módulo 7- Banheiros.



Fonte: Do Autor.

As análises observadas in loco na modelagem 2D, foram plotadas na Figura 41.

Figura 41- Módulo 7 plotagem 3D.



Fonte: Do Autor.

O módulo apresenta uma região independente da estrutura, os rebaixamentos observados sugerem a possibilidade de causas geotécnicas relevantes, como variação da umidade, redução da rigidez por processos de assentamento do solo. Estudos como de González-Arteaga et al., (2020) analisam que recalques pontuais em setores independentes de edificação podem ser os primeiros indicadores de deformações diferenciais mais amplas, podendo evoluir, caso não sejam monitoradas de maneira eficiente. Algumas manifestações patológicas são evidenciadas como desnivelamento de pisos e aberturas de juntas estruturais. Ademais, Tondo (2023) reforça que mesmo áreas isoladas podem transferir deformações para elementos próximos como paredes estruturais ou vigas de transição, agravando o risco de danos quando o deslocamento vertical excede limites admissíveis.

6.2. Seleção do Perfil Geotécnico

No relatório do SINFRA foi observado pontos de sondagens a cada 20m. Com isso, obteve-se o valor de Spt da região igual a 10,06 utilizando-se a Equação 19. O valor do SPT caracteriza o solo com sua resistência de média a baixa, sendo ainda correspondente a areias mediamente compactas ou argilas de consistência média (VELLOSO E LOPES, 2010). Dessa forma, a instabilidade ou colapso localizado de elementos estruturais dependem diretamente da resistência e valores de N_{spt} , sendo valores próximos de 12, o risco de consequências graves é menor, porém existindo uma margem de risco, em contrapartida N_{spt} igual a 8 é característico de solo com maiores riscos de recalques diferenciais acentuados (PINTO, 2006).

O módulo de elasticidade foi obtido com base na relação da Equação 10, no qual utilizou-se a correlação do CBR com o módulo de elasticidade, obtendo-se 67,2Mpa. O estudo de Putri, Rao e Mannan (2012), ao investigarem a relação entre parâmetros de rigidez e o comportamento deformacional de solos, reforçam que diminuições no módulo de elasticidade resultam em maior suscetibilidade de recalques localizados.

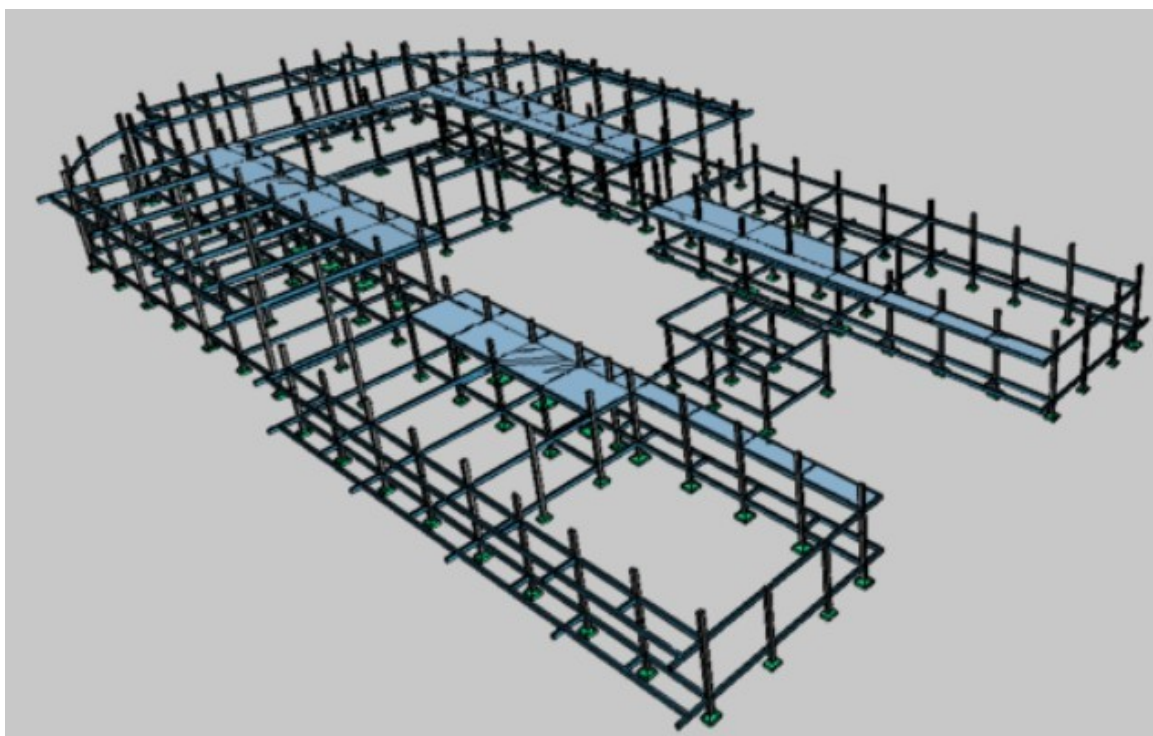
O estudo de Welter (2014) correlaciona o N_{spt} e o módulo de elasticidade (E_s) do solo, sendo os fatores fundamentais para a deformação dos solos. Dessa forma, o N_{spt} igual a 10, o subsolo possui módulo de deformação menor, evidente em solos mais compressíveis, conseqüentemente aumenta os riscos de recalques diferenciais nessas regiões, comprometendo a funcionalidade e a integração da edificação. O comportamento, é explicado pela ocorrência do subsolo possuir menor capacidade de limitar deformações verticais induzidas por cargas estruturais, favorecendo a ocorrência de recalques diferenciais. O autor Aoki e Velloso (2010) indicam que o módulo de elasticidade pode variar de forma significativa mesmo dentro de um mesmo perfil, intensificando as diferenças de comportamento entre pontos adjacentes da fundação.

6.3. Análise de Cargas em software Eberick

O processamento da superestrutura no software Eberick permitiu a obtenção das reações de apoio, fundamentais para a compreensão do comportamento da

edificação e sua interação com o maciço do solo através do processamento de diagnósticos da estrutura e relatório. A modelagem em pórtico espacial revelou uma distribuição de cargas que reflete a complexidade geométrica do bloco pedagógico, evidenciando que os carregamentos verticais não são uniformes em toda a base da fundação. A análise do software é apresentada na Figura 43 e consta relatório no Anexo C.

Figura 42- Pórtico 3D Software Eberick.



Fonte: Do Autor.

Ao analisar os dados de carga de fundação (ANEXO C), observou-se que os pilares centrais e situados próximos às zonas de maior rigidez estrutural, apresentaram as maiores solicitações. Entre estes, os pilares P30 (17,30 tf) e P122 (21,01 tf) destacaram-se com cargas verticais excessivas. A atuação dessas cargas elevadas, associada às características geotécnicas do subsolo, pode influenciar os efeitos de recalques significativos nessa região. Este fenômeno evidencia que a distribuição heterogênea de cargas na fundação é o fator determinante para o surgimento das manifestações patológicas localizadas.

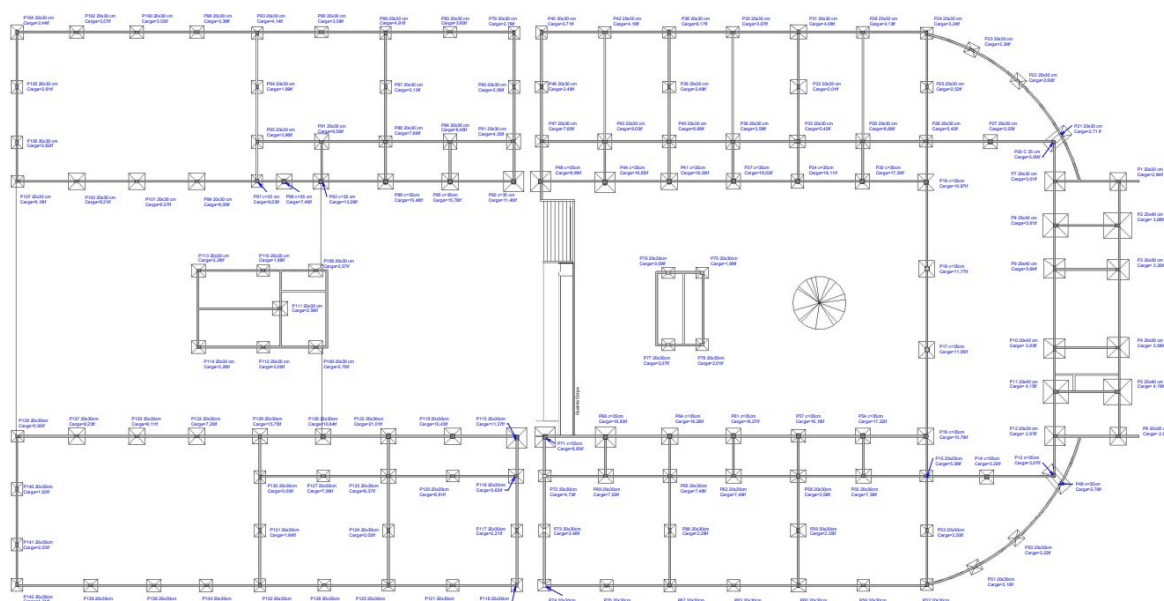
Os dados analisados através do relatório de cargas evidenciam cargas excessivas identificadas em maioria de pilares de seção circulares periféricos. Dessa forma, embora a seção circular apresente vantagens arquitetônicas e simetria na distribuição de tensões, o relatório do Eberick demonstrou que estes pilares atuam como núcleos de alta rigidez, concentrando esforços que geram bulbos de pressões profundos. Foram observados pontos como pilares com carregamentos de: 11,95tf (P17); 17,30tf (P30); 21,01 tf (P122). Segundo Milititsky, Consoli, Schnaid (2015), em sua obra sobre patologia das fundações, a geometria da base, aliada a picos de carga vertical, pode acelerar recalques em solos compressíveis se a tensão de contato não for devidamente compatibilizada com a interação solo estrutura.

A discussão desses resultados demonstra que a adoção de modelos de apoios fixos, padrão inicial do software antes da consideração da ISE, tende a subestimar a redistribuição de esforços. Através da extração de cargas no Eberick, foi possível constatar que a rigidez da superestrutura de forma limitada, em que a magnitude das reações nos pilares periféricos, identificada no processamento, superou a capacidade de redistribuição da estrutura, resultando nas fissuras diagonais observadas in loco.

6.4. Aplicação de Modelos teóricos

Os resultados a seguir apresentam o comportamento das fundações do edifício objeto de estudo, fundamentados na extração de dados obtidos no software Eberick e na posterior análise teórica dos recalques diferenciais. A análise objetiva na relação entre os carregamentos reais da superestrutura e a resposta do maciço do solo, buscando identificar as distorções angulares que afetam a integridade do edifício existente. Através da comparação entre as reações de apoio e os limites normativos, evidenciando assim como a distribuição de esforços influencia o desempenho estrutural e a estabilidade global da edificação. Os dados foram reunidos e apresentados na Figura 42 (ANEXO B), sendo de suma importância para análises de cargas e previsões de recalques.

Figura 43- Análise estrutural bloco pedagógico



Fonte: Do Autor.

Por conseguinte, os resultados obtidos a partir da aplicação da teoria da elasticidade permitiram estimar os recalques para cada pilar em função das cargas transmitidas ao solo e a largura da sapata (B) e as propriedades de deformação do maciço do solo, como apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Teoria da Elasticidade

Teoria da Elasticidade				Teoria da Elasticidade				Teoria da Elasticidade				Teoria da Elasticidade			
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalqu e (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalqu e (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
1	2,94	0,65	4,231	12	2,97	0,65	4,274	23	2,34	0,65	3,367	34	16,11	1,30	28,931
2	3,68	0,65	5,296	13	3,07	0,75	3,180	24	3,24	0,65	4,662	35	3,67	0,65	5,281
3	3,30	0,65	4,749	14	3,22	0,75	3,336	25	2,00	0,75	3,321	36	3,58	0,60	4,755
4	3,58	0,65	5,152	15	5,36	0,75	8,900	26	5,42	0,75	9,000	37	16,02	1,30	28,770
5	4,19	0,65	6,030	16	10,79	1,05	15,651	27	3,25	0,75	3,367	38	6,17	0,75	10,245
6	2,92	0,65	4,202	17	11,95	1,05	17,333	28	4,13	0,65	5,943	39	2,04	0,75	3,387
7	3,01	0,65	4,331	18	11,77	1,05	17,072	29	8,66	0,85	16,297	40	8,66	0,90	17,256
8	3,61	0,65	5,195	19	10,87	1,05	15,767	30	17,30	1,30	31,068	41	16,26	1,30	29,201
9	3,64	0,65	5,238	20	3,00	0,75	3,108	31	4,08	0,85	7,678	42	4,16	0,65	5,986
10	3,93	0,65	5,655	21	2,71	0,65	3,900	32	2,01	0,75	3,337	43	9,06	0,90	18,053
11	4,15	0,65	5,972	2	2,60	0,65	3,741	33	5,42	0,85	10,200	44	16,65	1,30	29,901

Continuação															
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
45	2,71	0,65	3,900	59	2,35	0,75	3,902	73	2,46	0,75	4,084	87	2,13	0,65	3,065
46	2,49	0,75	4,134	60	6,07	0,80	5,244	74	2,81	0,65	4,043	88	7,69	0,85	14,472
47	7,60	0,85	14,302	61	16,27	1,30	29,219	75	1,99	0,65	2,863	89	15,48	1,25	26,731
48	8,99	0,95	11,798	62	7,46	0,85	14,039	76	3,09	0,65	4,446	90	3,39	0,65	4,878
49	2,76	0,65	3,970	63	3,25	0,65	4,677	77	3,07	0,65	4,418	91	6,56	0,75	10,893
50	3,22	0,65	4,634	64	16,26	1,30	29,20	78	2,01	0,65	2,892	92	13,26	1,15	21,065
51	3,70	0,65	5,324	65	7,48	0,85	14,077	79	2,78	0,65	4,000	93	4,14	0,65	5,958
52	3,44	0,65	4,950	66	2,28	0,75	3,786	80	2,06	0,60	2,736	94	1,99	0,60	2,643
53	2,50	0,75	4,151	67	4,53	0,65	6,519	81	4,35	0,65	6,260	95	3,86	0,65	5,555
54	17,32	1,30	31,104	68	16,83	1,30	30,224	82	11,40	1,05	16,535	96	7,44	0,85	8,736
55	7,38	0,85	13,888	69	7,02	0,85	13,211	83	3,60	0,65	5,180	97	9,03	0,95	18,993
56	4,18	0,65	6,015	70	4,24	0,65	6,101	84	6,45	0,75	10,710	98	3,38	0,65	4,864
57	16,18	1,30	29,057	71	8,83	0,95	11,588	85	15,78	1,25	27,249	99	8,05	0,85	15,149
58	3,58	0,60	4,755	72	4,73	0,65	6,807	86	4,91	0,65	7,068	100	3,57	0,65	5,137

Continuação															
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
101	8,07	0,85	15,187	113	2,28	0,65	3,281	125	2,95	0,65	4,245	137	2,72	0,65	3,914
102	3,57	0,65	5,137	114	2,28	0,65	3,281	126	2,05	0,60	2,723	138	8,23	0,85	15,488
103	8,21	0,85	15,450	115	11,37	1,00	15,707	127	10,84	1,0	14,974	139	3,09	0,65	4,446
104	2,43	0,65	3,497	116	3,63	0,65	5,224	128	7,09	0,75	11,773	140	5,92	0,75	9,830
105	2,81	0,60	3,732	117	6,91	0,75	11,474	129	2,78	0,65	4,000	141	1,62	0,60	2,152
106	2,62	0,60	3,480	118	2,21	0,65	2,935	130	15,75	1,15	40,102	142	2,53	0,60	
107	6,18	0,75	10,262	119	2,02	0,65	2,904	131	3,00	0,65	4,317				
108	2,57	0,60	3,414	120	10,83	1,0	14,961	132	1,84	0,60	2,444				
109	2,70	0,60	3,586	121	6,91	0,65	6,204	133	2,90	0,65	4,173				
110	1,96	0,60	2,603	122	2,89	0,65	4,159	134	7,26	0,85	13,662				
111	2,56	0,65	3,684	123	21,01	0,75	40,633	135	2,50	0,65	3,597				
112	2,00	0,60	2,656	124	6,37	0,65	10,577	136	8,11	0,85	15,262				

Fonte: Do Autor.

A partir das análises de previsão de recalques, observou-se suas variações desde valores reduzidos, próximos de 2 a 6mm, para pilares submetidos a tensões menores e com larguras de base entre 0,60m e 0,75m, até valores mais elevados, superiores a 25mm e atingindo em alguns casos cerca de 30 a 40mm de recalque. Esses resultados confirmam a revisão de Shahriar, Das e Sivakugan (2015), que conclui que o recalque elástico em solos granulares mantém em relação linear diferente na profundidade do bulbo de tensões. Essa magnitude de 40mm observada nos maiores pilares alinha-se aos limites de serviço discutidos por Poulos (2016), indicando que, embora elevados, tais valores são inerentes ao “efeito de escala” em solos menos rígidos, onde a área de influência da fundação mobiliza camadas de solos mais profundas.

Segundo Abdelrahman (2021) a discrepância de deformação entre pilares adjacentes, como pilares com recalques de 10,84 (pilar 126) próximo de pilares com 40,104mm (pilar 129) e 13,662 (pilar 133), gera uma distorção angular que impõe esforços de tração e cisalhamento na superestrutura não previstos no cálculo inicial. Isso pode resultar em patologias estruturais graves, como fissuras diagonais em vigas e alvenarias, comprometimento estético, e em casos extremos a instabilidade de nós da estrutura.

Assim como observados nas variações altimétricas, a respectiva análise estrutural se refere ao módulo 5, em específico o refeitório, no qual pelos métodos matemáticos abordou o ponto de máximo recalque nessa região, evidenciando 40mm de recalque, no qual corrobora com a análise in loco observada 41mm no mesmo ponto. Conseqüentemente, principalmente nos pilares associados a maiores cargas e dimensões de fundação, seus resultados refletem o comportamento esperado segundo formulação elástica, na qual o recalque está diretamente associado ao nível de tensão aplicado e à rigidez do sistema solo-fundação, uma vez que maiores solicitações verticais tendem a produzir deformações mais significativas no maciço do solo.

Por outro lado, quando os pilares estão associados a maiores cargas e fundações mais flexíveis ou solos mais moles, a literatura mostra que os recalques podem atingir dezenas de milímetros. Segundo Hakro et al. (2022), em estudos referentes a fundações de radier e sapatas sobre os solos argilosos, a simulação

numérica revela recalques de cerca de 40mm em solos muito rígidos e até cerca de 75mm em solos moles sob cargas comparáveis, apontando para a influência pronunciada dos módulos de rigidez do solo nas deformações verticais. O autor observou ainda o comportamento de fundações conforme o grau de saturação do solo, o que eleva a pressão da água em poros e diminui a resistência ao cisalhamento do solo. Os recalques observados variam como 0,69mm de recalque para 0% de saturação e 2,84mm para 90% de saturação do solo, concluindo assim o aumento do grau de saturação em um maior recalque do solo.

Nos pilares com cargas mais baixas, predominantemente entre 2 e 4tf, os recalques estimados se mantiveram em patamares reduzidos, indicando que o solo apresenta capacidade adequada de deformação elástica para esse nível de carregamento e que a distribuição de tensões ocorre de forma relativamente uniforme. Ademais, observa-se ainda que os resultados obtidos demonstram conformidade as condições da teoria da elasticidade, uma vez que os recalques aumentam de forma consistente com a carga aplicada e com a geometria da fundação, indicando resposta compatível com o regime elástico do maciço para maior parte dos pilares analisados. Dessa forma, os resultados obtidos pela teoria da elasticidade contribuem para o entendimento e compreensão do comportamento deformacional do solo, sendo utilizado como ferramenta de apoio à análise de segurança e serviço no projeto de fundações.

Em seguida, a previsão de recalque por Bousinesq, foi calculada e os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Método Boussinsq

Método Boussinesq				Método Boussinesq				Método Boussinesq				Método Boussinesq			
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
1	2,94	0,65	4,738	12	2,97	0,65	4,787	23	2,34	0,65	3,771	34	16,11	1,30	32,403
2	3,68	0,65	5,931	13	3,07	0,75	3,562	24	3,24	0,65	5,222	35	3,67	0,65	5,915
3	3,30	0,65	5,319	14	3,22	0,75	3,736	25	2,00	0,75	3,719	36	3,58	0,60	5,326
4	3,58	0,65	5,770	15	5,36	0,75	9,968	26	5,42	0,75	10,080	37	16,02	1,30	32,225
5	4,19	0,65	6,753	16	10,79	1,05	17,529	27	3,25	0,75	3,771	38	6,17	0,75	11,475
6	2,92	0,65	4,706	17	11,95	1,05	19,413	28	4,13	0,65	6,658	39	2,04	0,75	3,794
7	3,01	0,65	4,851	18	11,77	1,05	19,121	29	8,66	0,85	18,253	40	8,66	0,90	19,327
8	3,61	0,65	5,818	19	10,87	1,05	17,659	30	17,30	1,30	34,797	41	16,26	1,30	32,705
9	3,64	0,65	5,867	20	3,00	0,75	3,481	31	4,08	0,85	8,599	42	4,16	0,65	6,705
10	3,93	0,65	6,334	21	2,71	0,65	4,368	32	2,01	0,75	3,738	43	9,06	0,90	20,219
11	4,15	0,65	6,689	22	2,60	0,65	4,190	33	5,42	0,85	11,424	44	16,65	1,30	33,489

Continuação															
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
45	2,71	0,65	4,368	59	2,35	0,75	4,370	73	2,46	0,75	4,575	87	2,13	0,65	3,433
46	2,49	0,75	4,630	60	6,07	0,80	5,873	74	2,81	0,65	4,529	88	7,69	0,85	16,208
47	7,60	0,85	16,019	61	16,27	1,30	32,725	75	1,99	0,65	3,207	89	15,48	1,25	29,938
48	8,99	0,95	13,214	62	7,46	0,85	15,724	76	3,09	0,65	4,980	90	3,39	0,65	5,464
49	2,76	0,65	4,448	63	3,25	0,65	5,238	77	3,07	0,65	4,948	91	6,56	0,75	12,200
50	3,22	0,65	5,190	64	16,26	1,30	32,705	78	2,01	0,65	3,239	92	13,26	1,15	23,593
51	3,70	0,65	5,963	65	7,48	0,85	15,766	79	2,78	0,65	4,480	93	4,14	0,65	6,673
52	3,44	0,65	5,544	66	2,28	0,75	4,240	80	2,06	0,60	3,064	94	1,99	0,60	2,960
53	2,50	0,75	4,649	67	4,53	0,65	7,301	81	4,35	0,65	7,011	95	3,86	0,65	6,221
54	17,32	1,30	34,837	68	16,83	1,30	33,851	82	11,40	1,05	18,520	96	7,44	0,85	9,784
55	7,38	0,85	15,555	69	7,02	0,85	14,796	83	3,60	0,65	5,802	97	9,03	0,95	21,272
56	4,18	0,65	6,737	70	4,24	0,65	6,834	84	6,45	0,75	11,995	98	3,38	0,65	5,448
57	16,18	1,30	32,544	71	8,83	0,95	12,978	85	15,78	1,25	30,519	99	8,05	0,85	16,967
58	3,58	0,60	5,326	72	4,73	0,65	7,623	86	4,91	0,65	7,914	100	3,57	0,65	5,754

Continuação															
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
101	8,07	0,85	17,009	113	2,28	0,65	3,674	125	2,95	0,65	4,754	137	2,72	0,65	4,384
102	3,57	0,65	5,754	114	2,28	0,65	3,674	126	2,05	0,60	3,050	138	8,23	0,85	17,347
103	8,21	0,85	17,304	115	11,37	1,00	17,591	127	10,84	1,0	16,771	139	3,09	0,65	4,980
104	2,43	0,65	3,916	116	3,63	0,65	5,850	128	7,09	0,75	13,186	140	5,92	0,75	11,010
105	2,81	0,60	4,180	117	6,91	0,75	12,851	129	2,78	0,65	4,480	141	1,62	0,60	2,410
106	2,62	0,60	3,898	118	2,21	0,65	3,288	130	15,75	1,15	44,914	142	2,53	0,60	3,764
107	6,18	0,75	11,493	119	2,02	0,65	3,252	131	3,00	0,65	4,835				
108	2,57	0,60	3,823	120	10,83	1,0	16,756	132	1,84	0,60	2,737				
109	2,70	0,60	4,017	121	6,91	0,65	6,949	133	2,90	0,65	4,674				
110	1,96	0,60	2,916	122	2,89	0,65	4,658	134	7,26	0,85	15,302				
111	2,56	0,65	4,126	123	21,01	0,75	45,510	135	2,50	0,65	4,029				
112	2,00	0,60	2,975	124	6,37	0,65	11,847	136	8,11	0,85	17,09				

Fonte: Do Autor.

A análise dos recalques fundamenta-se na hipótese de que a utilização de modelos elásticos lineares, como o método de Boussinesq, constitui uma estimativa de limite superior, uma vez que estes modelos pressupõe um meio homogêneo. Segundo Terzaghi e Peck (1996), a resposta real do maciço do solo é influenciada principalmente pela sua variação de rigidez em profundidade, fatores que podem mitigar os deslocamentos observados em campo.

Os resultados demonstram que os valores de recalque máximo estão ligados a altas intensidades de carga e aplicados em bases específicas, visto que, são dimensionadas para suportar o esforço, geram bulbos de tensões profundas. Nesse sentido, o pilar 123 destaca-se como o ponto mais crítico, registrando 45,510mm para uma carga de 21,01tf e, uma base de 0,75m. Outro valor expressivo é observado no pilar 130, com 44,914mm (15,75tf; B=1,15m). Nota-se que, no pilar 130 a magnitude da deformação permanece elevada, assim como os estudos de Poulos (2016) sobre efeito de escala, em que as fundações com maiores dimensões alcançam camadas de solo mais profundas, onde a deformação acumulada pode ser superior à de camadas superficiais.

É observado ainda, valores máximos de 45,510mm (Pilar 123), 44,914mm (Pilar 130), 32,22mm (Pilar 27), 32,207 (Pilar 41). Estes elementos situam-se em regiões de corredores, áreas que recebem cargas acidentais elevadas devido ao sobrecarregamento de lajes e marquises. Ao analisar os dados obtidos in loco, observa-se semelhança nos módulos 5, 3 e 2 confirmando assim o carregamento excessivo nessas áreas, sendo assim regiões suscetíveis a recalque diferencial. Com isso, os resultados analisados, podem acarretar em distorção angular, diferença entre pilares próximos, como pilares como os pilares 141 (2,4mm) e pilar 130 (44,9mm), resultando em fissuras em alvenarias e esquadrias. Além disso, o recalque excessivo de um apoio altera o diagrama de momentos fletores das vigas de travamento, ocasionando sobrecarga entre pilares vizinhos e levar a um efeito excessivo de deformação.

Os estudos de Skempton e Macdonald (1956) estabelece a funcionalidade de uma estrutura não depende somente do recalque, mas da sua capacidade de absorver de formações sem dados estéticos. Em contrapartida, a NBR 6122 permite valores maiores para o Elstado Limite de Serviço (ELS), para estruturas que necessitem de maior rigidez, sendo o limite máximo de recalque admitido de 4,0mm em que, é adotado como “dano zero”.

Nesse método, observa-se a tendência dos métodos de Boussinesq de aumento de recalque com maiores tensões aplicadas permanece como um comportamento essencial. Em estudos numéricos, por exemplo de reassentamento de fundações rasas demonstram que o recalque aumenta conforme a carga aplicada e compressibilidade do solo, e que essa resposta pode ser significativamente influenciada pelo método de elasticidade efetivo do solo sob diferentes graus de saturação e carregamento (Hakro et al, 2022).

Em seguida, aborda-se a análise do método de previsões de recalques pelo método teórico de Barata na Tabela 3.

Tabela 3- Método Barata.

Método Barata				Método Barata				Método Barata				Método Barata			
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
1	2,94	0,65	3,554	12	2,97	0,65	3,590	23	2,34	0,65	2,828	34	16,11	1,30	24,302
2	3,68	0,65	4,448	13	3,07	0,75	2,671	24	3,24	0,65	3,916	35	3,67	0,65	4,436
3	3,30	0,65	3,989	14	3,22	0,75	2,802	25	2,00	0,75	2,789	36	3,58	0,60	3,994
4	3,58	0,65	4,327	15	5,36	0,75	7,476	26	5,42	0,75	7,560	37	16,02	1,30	24,166
5	4,19	0,65	5,065	16	10,79	1,05	13,146	27	3,25	0,75	2,828	38	6,17	0,75	8,606
6	2,92	0,65	3,529	17	11,95	1,05	14,560	28	4,13	0,65	4,992	39	2,04	0,75	2,845
7	3,01	0,65	3,638	18	11,77	1,05	14,341	29	8,66	0,85	13,690	40	8,66	0,90	14,495
8	3,61	0,65	4,364	19	10,87	1,05	13,244	30	17,30	1,30	26,097	41	16,26	1,30	24,528
9	3,64	0,65	4,400	20	3,00	0,75	2,610	31	4,08	0,85	6,449	42	4,16	0,65	5,028
10	3,93	0,65	4,750	21	2,71	0,65	3,276	32	2,01	0,75	2,803	43	9,06	0,90	15,164
11	4,15	0,65	5,016	22	2,60	0,65	3,14	33	5,42	0,85	8,568	44	16,65	1,30	25,117

Continuação															
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
45	2,71	0,65	3,276	59	2,35	0,75	3,277	73	2,46	0,75	3,431	87	2,13	0,65	2,574
46	2,49	0,75	3,473	60	6,07	0,80	4,405	74	2,81	0,65	3,396	88	7,69	0,85	12,156
47	7,60	0,85	12,014	61	16,27	1,30	24,544	75	1,99	0,65	2,405	89	15,48	1,25	22,454
48	8,99	0,95	9,910	62	7,46	0,85	11,793	76	3,09	0,65	3,735	90	3,39	0,65	4,098
49	2,76	0,65	3,336	63	3,25	0,65	3,928	77	3,07	0,65	3,711	91	6,56	0,75	9,150
50	3,22	0,65	3,892	64	16,26	1,30	24,528	78	2,01	0,65	2,429	92	13,26	1,15	17,695
51	3,70	0,65	4,472	65	7,48	0,85	11,824	79	2,78	0,65	3,360	93	4,14	0,65	5,004
52	3,44	0,65	4,158	66	2,28	0,75	3,180	80	2,06	0,60	2,298	94	1,99	0,60	2,220
53	2,50	0,75	3,487	67	4,53	0,65	5,476	81	4,35	0,65	5,258	95	3,86	0,65	4,666
54	17,32	1,30	26,127	68	16,83	1,30	25,388	82	11,40	1,05	13,890	96	7,44	0,85	7,338
55	7,38	0,85	11,666	69	7,02	0,85	11,0975	83	3,60	0,65	4,351	97	9,03	0,95	15,954
56	4,18	0,65	5,053	70	4,24	0,65	5,125	84	6,45	0,75	8,996	98	3,38	0,65	4,086
57	16,18	1,30	24,408	71	8,83	0,95	9,734	85	15,78	1,25	22,889	99	8,05	0,85	12,725
58	3,58	0,60	3,994	72	4,73	0,65	5,717	86	4,91	0,65	5,935	100	3,57	0,65	4,315

Continuação															
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
101	8,07	0,85	12,757	113	2,28	0,65	2,756	125	2,95	0,65	3,566	137	2,72	0,65	3,288
102	3,57	0,65	4,3157	114	2,28	0,65	2,756	126	2,05	0,60	2,287	138	8,23	0,85	13,01
103	8,21	0,85	12,979	115	11,37	1,00	13,194	127	10,84	1,0	12,579	139	3,09	0,65	3,735
104	2,43	0,65	2,937	116	3,63	0,65	4,388	128	7,09	0,75	9,888	140	5,92	0,75	8,257
105	2,81	0,60	3,135	117	6,91	0,75	9,638	129	2,78	0,65	3,360	141	1,62	0,60	1,807
106	2,62	0,60	2,923	118	2,21	0,65	2,466	130	15,75	1,15	33,686	142	2,53	0,60	2,823
107	6,18	0,75	8,620	119	2,02	0,65	2,439	131	3,00	0,65	3,626				
108	2,57	0,60	2,867	120	10,83	1,0	12,567	132	1,84	0,60	2,053				
109	2,70	0,60	3,012	121	6,91	0,65	5,212	133	2,90	0,65	3,505				
110	1,96	0,60	2,187	122	2,89	0,65	3,493	134	7,26	0,85	11,477				
111	2,56	0,65	3,094	123	21,01	0,75	34,133	135	2,50	0,65	3,022				
112	2,00	0,60	2,231	124	6,37	0,65	8,885	136	8,11	0,85	12,821				

Fonte: Do Autor.

A avaliação dos dados de recalques obtidos pelo método de Barata evidenciam que os recalques variam de aproximadamente 1,8mm a 34mm e que os maiores valores ocorrem em pilares com cargas elevadas (16tf e 21tf) e sapatas de maiores dimensões (1,30m), contudo, em pilares com cargas menores (2tf e 6tf) e sapatas de menores dimensões de (0,60m a 0,75m) apresentam recalques inferiores a 6mm. Essa tendência reflete a base da metodologia empregada, em que se baseia na suposição do solo como meio elástico homogêneo, permitindo a estimativa de deformações verticais diretamente relacionadas à intensidade de carga geométrica da fundação.

O método de Barata quando comparado ao método de Boussinesq, que também considera o solo como um meio elástico semi-infinito, observa-se que os recalques tende, a ser maiores em cargas elevadas, com valores que, em casos comparáveis, alcançam 30mm a 45mm. Em estudos de previsão de recalque de fundações rasas por formulações elásticas, foi verificado o acréscimo da carga sobre sapatas conduz a aumentos significativos de recalque conforme esperado pelas soluções clássicas da teoria da elasticidade, com o destaque de recalque que aumentam poucos milímetros para dezenas de milímetros à medida que a tensão aplicada cresce (FIORAVANTE, V. et al, 2024).

Segundo os estudos de Fioravante et al (2024), para fundações rasas em solos granulares e consideravelmente compressíveis, a magnitude do recalque tende a crescer com a intensidade da carga e com a área de contato da sapata, pois maiores esforços ocasionam deformações maiores no solo sob condições elásticas. Estudos de previsão de recalque em fundações rasas em solos arenosos confirmam que métodos baseados em princípios de elasticidade, embora simplificados, confirmam essa tendência, destacando que previsão de recalque são essenciais para evitar patologias estruturais. O autor relata ainda que a rigidez do solo, a profundidade de influência da carga e as características granulométricas controlam diretamente a resposta deformacional do sistema fundação-solo.

Em seguida, são abordadas as previsões de recalque no edifício utilizando a metodologia de Burland e Burbidge apresentados na Tabela 4.

Tabela 4-Burland e Burbidge (1985).

Burland e Burbidge				Burland e Burbidge				Burland e Burbidge				Burland e Burbidge			
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalqu e (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalqu e (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
1	2,94	0,65	24,660	12	2,97	0,65	24,912	23	2,34	0,65	19,627	34	16,11	1,30	133,314
2	3,68	0,65	31,214	13	3,07	0,75	17,286	24	3,24	0,65	27,176	35	3,67	0,65	30,783
3	3,30	0,65	27,680	14	3,22	0,75	18,130	25	2,00	0,75	18,048	36	3,58	0,60	28,448
4	3,58	0,65	30,028	15	5,36	0,75	49,536	26	5,42	0,75	50,091	37	16,02	1,30	132,569
5	4,19	0,65	35,540	16	10,79	1,05	76,891	27	3,25	0,75	18,299	38	6,17	0,75	57,022
6	2,92	0,65	24,492	17	11,95	1,05	85,157	28	4,13	0,65	34,642	39	2,04	0,75	18,409
7	3,01	0,65	25,247	18	11,77	1,05	83,874	29	8,66	0,85	87,142	40	8,66	0,90	90,602
8	3,61	0,65	30,621	19	10,87	1,05	77,461	30	17,30	1,30	143,162	41	16,26	1,30	134,556
9	3,64	0,65	30,875	20	3,00	0,75	16,892	31	4,08	0,85	41,055	42	4,16	0,65	34,893
10	3,93	0,65	33,335	21	2,71	0,65	22,731	32	2,01	0,75	18,139	43	9,06	0,90	94,786
11	4,15	0,65	35,201	22	2,60	0,65	21,808	33	5,42	0,85	54,539	44	16,65	1,30	137,783

Continuação															
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
45	2,71	0,65	22,731	59	2,35	0,75	21,207	73	2,46	0,75	22,200	87	2,13	0,65	17,866
46	2,49	0,75	22,470	60	6,07	0,80	28,591	74	2,81	0,65	23,570	88	7,69	0,85	77,381
47	7,60	0,85	76,475	61	16,27	1,30	134,638	75	1,99	0,65	16,691	89	15,48	1,25	124,632
48	8,99	0,95	59,729	62	7,46	0,85	75,067	76	3,09	0,65	25,918	90	3,39	0,65	28,435
49	2,76	0,65	23,150	63	3,25	0,65	27,260	77	3,07	0,65	25,750	91	6,56	0,75	60,626
50	3,22	0,65	27,009	64	16,26	1,30	134,556	78	2,01	0,65	16,859	92	13,26	1,15	100,705
51	3,70	0,65	31,035	65	7,48	0,85	75,268	79	2,78	0,65	23,318	93	4,14	0,65	34,726
52	3,44	0,65	28,854	66	2,28	0,75	20,575	80	2,06	0,60	16,369	94	1,99	0,60	15,813
53	2,50	0,75	22,561	67	4,53	0,65	37,997	81	4,35	0,65	36,487	95	3,86	0,65	32,377
54	17,32	1,30	143,327	68	16,83	1,30	139,272	82	11,40	1,05	81,238	96	7,44	0,85	45,728
55	7,38	0,85	74,262	69	7,02	0,85	70,639	83	3,60	0,65	30,196	97	9,03	0,95	97,126
56	4,18	0,65	35,061	70	4,24	0,65	35,564	84	6,45	0,75	59,610	98	3,38	0,65	28,351
57	16,18	1,30	133,894	71	8,83	0,95	58,666	85	15,78	1,25	127,047	99	8,05	0,85	81,004
58	3,58	0,60	28,448	72	4,73	0,65	39,674	86	4,91	0,65	41,184	100	3,57	0,65	29,944

Continuação															
Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)	Pilar	Carga (tf)	B (m)	Recalque (mm)
101	8,07	0,85	81,205	113	2,28	0,65	19,124	125	2,95	0,65	24,744	137	2,72	0,65	22,815
102	3,57	0,65	29,944	114	2,28	0,65	19,124	126	2,05	0,60	16,290	138	8,23	0,85	82,815
103	8,21	0,85	82,614	115	11,37	1,00	78,303	127	10,84	1,0	74,653	139	3,09	0,65	25,918
104	2,43	0,65	20,382	116	3,63	0,65	30,448	128	7,09	0,75	65,524	140	5,92	0,75	54,711
105	2,81	0,60	22,329	117	6,91	0,75	63,861	129	2,78	0,65	23,318	141	1,62	0,60	12,873
106	2,62	0,60	20,819	118	2,21	0,65	17,561	130	15,75	1,15	194,827	142	2,53	0,60	20,104
107	6,18	0,75	57,114	119	2,02	0,65	16,926	131	3,00	0,65	25,163				
108	2,57	0,60	20,422	120	10,83	1,0	74,584	132	1,84	0,60	14,621				
109	2,70	0,60	21,455	121	6,91	0,65	36,164	133	2,90	0,65	24,324				
110	1,96	0,60	15,574	122	2,89	0,65	24,241	134	7,26	0,85	73,054				
111	2,56	0,65	21,473	123	21,01	0,75	183,120	135	2,50	0,65	20,969				
112	2,00	0,60	15,892	124	6,37	0,65	58,870	136	8,11	0,85	81,607				

Fonte: Do Autor.

A aplicação do método de Burland e Burbidge para a estimativa de recalques nas fundações superficiais deste estudo revelou uma acentuada incompatibilidade como o comportamento observado em campo. As medições in loco indicaram recalques controlados, na ordem de até - 47mm, enquanto que as projeções teóricas pelo método de Burland e Burbidge resultaram em valores que variam de - 12 mm a - 195mm. Essa discrepância demonstra que, para as condições de carregamento e as características geotécnicas da área em questão, o método não satisfaz as condições de aplicações necessária para a previsão confiável de recalque.

É notório a variação de valores conforme os métodos da teoria da elasticidade, Boussinesq, Barata e Burland e Burbidge, com os dados apresentados, o método resultou em variações de recalques de até 194,827mm (pilar 130), valor quase cinco vezes superior ao limite máximo observado in loco. Mesmo em regiões onde outros métodos (como Boussinesq) identificaram picos de 23,32mm (pilae 129), são mais próximos da realidade analisada, o modelo de Burland e Burbidge apresentou distorções significativas como o caso do pilar 134, com estimativa de 133,31mm, contradizendo o máximo observado in loco de 47mm.

A apresentação dos dados demonstra que as premissas de Burland e Burbidge (1985), fundamentadas em correlações empíricas globais, são insuficientes para representar as particularidades do solo em estudo. O método diverge ao analisar os mecanismos de local, resultando em uma projeção de não linearidade dos dados. Desse modo, torna-se necessário que análises futuras analisem dados estatísticos de desvio padrão e erros validando a confiabilidade de previsões de recalque. Desse modo, torna-se possível a determinação do método, assegurando assim a validação do método e garantindo a segurança estrutural de projetos futuros.

7 CONCLUSÕES

O estudo realizado sobre o bloco pedagógico da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), campus Balsas, permitiu uma análise técnica aprofundada da interação solo-estrutura (ISE) e das características geotécnicas nas quais influenciam o sistema. O estudo confirmou que a desconsideração da deformabilidade do solo durante a fase de dimensionamento é o fator determinante para o surgimento de patologias. A análise demonstrou que a estrutura e o solo atuam como um sistema em conjunto, onde a redistribuição de esforços provocada por recalques diferenciais gera tensões previstas, no qual comprometem a vida útil do edifício.

Na identificação das manifestações patológicas, as análises altimétricas *in loco* evidenciaram um quadro crítico nos módulos 2, 3 e 5, em que a ocorrência de fissuras, deformações no piso foram confirmadas pelo levantamento altimétrico, em que registrou uma amplitude de deslocamentos verticais de 77mm totais (variando entre os pontos de máximos de +30mm e -47mm). Portanto, conforme a literatura apresentada, a magnitude dos recalques diferenciais observados superam os limites de serviço, resultando em gradientes de deformação, em que a estrutura devido às configurações em projetos não foi capaz de absorver.

A modelagem no software Eberick foi determinante para identificar a distribuição não uniforme de cargas, revelando concentrações críticas em pilares como P122 e P30 através de relatórios diagnosticados pelo software. O processamento dos relatórios de carga demonstrou que o modelo de apoios fixos subestima a redistribuição de esforços, evidenciando que a rigidez da superestrutura configurada no software superou a capacidade de limites das fundações.

A análise comparativa entre os métodos empíricos demonstrou disparidades significativas entre os métodos empíricos de previsão. O método de Boussinesq e as soluções da Teoria da Elasticidade apresentam menor divergência com os dados obtidos *in loco*, ou seja, o recalque calculado é próximo do recalque geral. Enquanto o monitoramento *in loco* indicou variações em torno de 31mm em pontos críticos, o método de Boussinesq estimou valores na ordem de 23,32mm (pilar 129) e 27,68mm (pilar 103). Estes dados demonstram que, os modelos conseguem mapear de forma satisfatória o comportamento do bulbo de tensão no solo.

Em contrapartida, o método de Burland e Burbidge evidenciaram inadequação para este cenário. As projeções deste modelo atingiram valores de até 194,83mm (pilar 130), sendo superior aproximadamente cinco vezes a mais em relação ao máximo observado em campo. Essa divergência confirma que as correlações empíricas do método não interpretam a rigidez efetiva do solo em análise. Contudo, o método de Barata abordou análises semelhantes ao observado in loco, reforçando como a variabilidade do N_{spt} e a compressibilidade das camadas superficiais influenciam os assentamentos, explicando os “bolsões” de recalque identificados.

Dessa forma, com bases em todas as análises numéricas, é notório que as áreas de maior risco coincidem com zonas de sobrecargas acidentais elevadas, como corredores e áreas sob influência de marquises (pilar 123 e pilar 130). A ausência de elementos estruturais contínuos impossibilitou a redistribuição de cargas, agravando assim casos de recalques diferenciais. Nesse contexto, o edifício apresenta um comportamento influenciado pela heterogeneidade do terreno e que a simples aplicação de teorias clássicas, deve haver um tratamento de dados de forma estatística com desvio de erros residuais confirmando assim a validação dos métodos.

Portanto, como diretrizes fundamentais para intervenções futuras, o presente trabalho propõe a implementação de monitoramentos contínuos das fissuras e recalques, utilizando instrumentos de precisão para determinar e analisar o processo de adensamento do solo. Para futuras edificações no campus torna-se necessário uma análise geotécnica para adoção de investigações aprofundadas (como ensaios de SPT e CPT) com maior densidade de pontos, além ainda da inclusão da análise interação solo estrutura na fase de projeto. Essa abordagem permite prever com maior precisão a redistribuição de esforços e reduzir riscos patológicos. Desse modo, o presente estudo cumpre um papel estratégico ao diagnosticar as causas das patologias observadas, servindo como base técnica essencial para a elaboração de planos de manutenção corretiva e para a prevenção de novos danos estruturais no bloco em análise.

8 SUGESTÕES FUTURAS

A partir das limitações identificadas e das variações identificadas entre as estimativas teóricas e o comportamento real da edificação, sugere-se investigações para trabalhos subsequentes:

- Aplicação de métodos estatísticos como regressão linear múltipla, visando validar a precisão dos métodos de previsão de recalque aplicados. A abordagem permitirá quantificar os dados monitorados, estabelecendo um índice de confiabilidade regional essencial para a prática local.
- Realizar ensaios de campo como Spt (Standard Penetration Test) ou sondagem a percussão, ou ainda Piezocone (CPTU) possibilitando a análise de parâmetros como rigidez e módulo de elasticidade com maior precisão, reduzindo assim incertezas nas previsões, assim como observados no método de Burland e Burbidge (1985).
- Aprimoramento dos dados de entrada para a transição dos modelos empíricos para simulações computacionais robustas utilizando método dos elementos finitos. A modelagem tridimensional possibilitaria a simulação da interação solo-estrutura considerando a rigidez real, permitindo mapear como a redistribuição de esforços ocorre em tempo real com base em recalques diferenciais.

9 REFERÊNCIAS

ABDEN, Awadh et al. Assessment of the performance of spread footings and mat foundations on expansive soils. *Results in Engineering*, v. 23, n. 1, p. 102782, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102782>.

ALBUQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R. *Engenharia de fundações*. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

ALMEIDA, M. S. S.; MASCARÓ, J. C. **Collapsible Soils in Brazil: Case Histories and Mitigation Measures**. *Soils and Rocks*, v. 44, n. 2, 2021.

Alnmr, A., Ray, R. & Alzawi, MO. Análise comparativa de sistemas de fundação em solo expansivo: uma abordagem de modelo tridimensional para difusão de umidade e mudanças de volume. *Geotech Geol Eng* **42** , 7935-7961 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02959-2>

ALONSO, Urbano Rodrigue. **Exercícios de fundações**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2019. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 06 ago. 2025.

ANTONIAZZI, Juliana Pippi et al. Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais. **Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado. Santa Maria**, 2011.

ALVES, Jader Rodrigues. Levantamento das manifestações patológicas em fundações e estruturas nas edificações, com até dez anos de idade, executadas no estado de Goiás. 2009.

ARAUJO, Edmar Henrique Marques de. Manifestações patológicas causadas por recalque em fundações. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Atenas, Paracatu, 2019.

ARIVABENE, Antonio Cesar. Patologias em estruturas de concreto armado: Estudo de caso. **Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia**, v. 3, n. 10, p. 1-22, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Rochas e solos*. NBR 6502. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto e execução de fundações*. NBR 6122, 2022. Rio de Janeiro, 2022.

ATKINSON, J. **The Mechanics of Soils and Foundations**. 3rd ed. CRC Press, 2020.

BAHIA, Gabriela de Athayde Duboc. Avaliação do desempenho de fundações em edificação no DF com a utilização de técnicas de interação solo-estrutura. 2016.

BARATA, F. E. **Proposta de Metodologia para Análise de Recalques em Solos Colapsíveis**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 7., 1984. Anais... 1984.

BRANCO, Marcel; OLIVEIRA, Fabiana. **Analysis of Copan Building Foundation Settlements, São Paulo, Brazil**. *GSTF Journal of Engineering Technology*, v. 2, 2013. DOI: 10.5176/2251-3701_2.1.40.

BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. **Patologia de estruturas**. Oficina de Textos, 2019.

BORTOLI, Matheus Fajardo et al. Análise das manifestações patológicas de um edifício que sofreu recalque diferencial. **Revista Técnico-Científica**, n. 21, 2019.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Princípios da mecânica dos solos e fundações para a construção civil**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2015. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 11 ago. 2025.

BOWLES, J. E. **Foundation Analysis and Design**. 5th ed. McGraw-Hill, 2021.
BURLAND, J. B.; BURBIDGE, M. C. **Settlement of foundations on sand and gravel**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v. 78, n. 1, p. 1325-1381, 1985.

BURLAND, J.; WROTH, C. Settlement of buildings and associated damage. Garston: Building Research Establishment, 1975. (BRE Digest, 65).

CALISTO, Aline; KOSWOSKI, Regiane. **Efeito do recalque diferencial de fundações em estruturas de concreto armado e alvenaria de vedação: estudo de caso.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas: projeto geotécnico.** Oficina de Textos, 2011.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. *Fundações diretas: projeto geotécnico.* São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza. *Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação.* 2. ed. Brasília: FINATEC – Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos, 2008.

COLARES, George Moura. Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios. **São Carlos**, 2006.

CONSOLI, N. C.; FONINI, A.; RUA, J. C. F. **The use of empirical methods for predicting settlement of shallow foundations in granular soils.** *Geotechnical Engineering Journal*, v. 51, n. 4, p. 215-225, 2020.

COSTA, Y. D. J.; CÂMARA, R. C. R.; LIMA, F. S. **Correlations for Collapse Potential of Unsaturated Soils.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 145, n. 9, 2019.

CUNHA, R. P.; SOUZA, H. S.; COSTA, Y. D. J. **A comparative analysis of settlement prediction methods for footings on sand.** *Soils and Rocks*, v. 42, n. 2, p. 135-148, 2019.

CRESPO, VA de S. Estudo da sensibilidade de edificações em relação ao solo. **Campo dos Goytacazes, RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro**, 2004.

DA SILVA, Irani Maura Antunes et al. Avaliação solo estrutura no comportamento de um edifício de alvenaria estrutural-Estudo de caso. 2021.

DAS, B. M.; LUO, Z. **Principles of Foundation Engineering.** 9th ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

DAS, B. M.; SOBRAL, M. **Advanced Soil Mechanics.** 5th ed. CRC Press, 2023.

DE ALMEIDA, Gil Carvalho Paulo. Caracterização física e classificação dos solos. **Universidade Federal de Juiz de Fora**, p. 145, 2005.

DE ALMEIDA MAIA, Paulo César et al. Efeito da interpolação de recalques na previsão do comportamento estrutural de uma edificação-Um estudo de caso. **Geotecnia**, n. 154, p. 7-23, 2022.

DE OLIVEIRA, Alexandre Magno et al. Fissuras, trincas e rachaduras causadas por recalque de diferencial de fundações. 2012.

DINIS, Henrique. Recalque das fundações. In: **Interação solo-estrutura: Uma abordagem metodológica ao projeto de fundações**. Blucher Open Access, 2024. p. 84-127.

DOHERTY, J. P.; GOURVENEC, S.; GAONE, F. M. Insights from a shallow foundation load-settlement prediction exercise. **Computers and Geotechnics**, v. 93, p. 269-279, 2018.

FALCONI, Frederico et al. Fundações: teoria e prática. **São Paulo: Editora Pini**, 2019.

FARIA, M. M.; BELLO, M. I. A. **Comparative Analysis of Settlement Prediction Methods for Shallow Foundations on Sand**. *Soils and Rocks*, v. 44, n. 3, 2021.

FERNANDES, Manuel de Matos. **Mecânica dos solos**: introdução à engenharia geotécnica. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 27 out 2025.

FIORAVANTE, V. et al. Previsão de recalque de fundações rasas para controle de qualidade de aterros hidráulicos arenosos. **Soils and Foundations** , v. 64, n. 1, p. 101408, 2024.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S.; LOPES, F. R. **The Geotechnical Behavior of Tropical Soils**. In: Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 18., 2020. Proceedings... 2020.

GAVIOLI, F.; DE ALBUQUERQUE, P. J. Análise da Interação Solo-Estrutura das Fundações de Unidades Aerogeradoras. In: **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica-COBRAMSEG 2016**. 2016.

GOMES, Saturnino. **Recalques provenientes dos elementos das fundações rasas Patologia das Estruturas Provenientes dos Recalques das Fundações dos edifícios**. 2014. Tese de Doutorado.

GONÇALVES, Juliane Cristina. **Avaliação da Influência dos Recalques das Fundações na Variação de Cargas dos Pilares de um Edifício**. 2004. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

GONZÁLEZ-ARTEAGA, Jesús; ALONSO, Juan; MOYA, Marina; MERLO, Oscar; NAVARRO, Vicente; YUSTRES, Ángel. **Long-term monitoring of the distribution of a building's settlements: Sectorization and study of the underlying factors**. *Engineering Structures*, v. 205, 2020.

GUIMARÃES, R. N. **Fundações em Solos Colapsíveis: Teoria e Prática**. Oficina de Textos, 2022.

GUSMÃO, Alexandre Duarte. Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações. 1990.

HAKRO, Muhammad Rehan et al. Numerical analysis of shallow foundations with varying loading and soil conditions. **Buildings**, v. 12, n. 5, p. 693, 2022.

HOLANDA JÚNIOR, Osvaldo Gomes de. Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas. 1998. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

HOLANDA JÚNIOR, Osvaldo Gomes de. **Influência de recalques em edifícios de alvenaria estrutural**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. KRIPKA, Moacir. **Análise estrutural para engenharia civil e arquitetura: estruturas isostáticas**. Oficina de Textos, 2021.

JUNIOR, Eurico de Lira Araujo; DE MELO FERREIRA, Silvio Romero; GUSMÃO, Alexandre Duarte. Estudo comparativo de previsões de recalque em fundações profundas e seus efeitos na interação solo-estrutura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e42810918199-e42810918199, 2021.

JUNIOR, José Valdeildo Moreira Jordão et al. Consideração da interação solo-estrutura: influência nos recalques diferenciais e nas distorções angulares de uma fundação. **Conjecturas**, v. 22, n. 2, p. 1471-1485, 2022.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Craig's Soil Mechanics**. 9th ed. CRC Press, 2020.

KAYNÍ, A. B. **Soil Mechanics: New Concepts and Applications**. Wiley, 2018.

LIKITLERSUANG, S. (Ed.). **Geotechnical Design and Practice: Selected Topics**. Springer, 2019.

LIVNEH, M. (1989). *Validation of Correlations between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests*. Transportation Research Record, v. 1219, p. 56-67, Washington, D.C.

LOPES, LFA; OLIVEIRA, JTR. Análise de recalques em fundações superficiais do tipo radier plano sobre solo silto-argiloso na região metropolitana de Recife-Brasil. **Revista de Engenharia Civil**, n. 58, p. 48-56, 2020.

LU, J.; TANG, X.; LI, T.; WEI, L.; GUO, L.; ZHANG, X.; ZHANG, X. *Um estudo sobre a identificação de riscos geológicos na província de Henan com base nos produtos básicos de deformação de LuTan-1*. **Remote Sensing**, v. 17, n. 3517, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17213517>

MAYNE, P. W. **Stress-Strain-Strength Modeling of Soils for Geotechnical Engineering Practice**. In: Geotechnical Engineering State of the Art and Practice. Keynote Lecture, 2022.

MENDONÇA, Flávio dos Ramos de Souza. Avaliação do efeito da interação solo estrutura sobre o comportamento estrutural de edificações em aço e mistas (aço concreto). 2012.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 05 ago. 2025.

MOHAMED, Walaa-Eldin Elsherif. Avaliando os efeitos de diferentes formatos de base de fundação no recalque e levantamento em argila expansiva: análise numérica. **Revista da Universidade de Engenharia e Arquitetura de Umm Al-Qura**, p. 1-12, 2024.

MOROSINI, Gustavo Marques; NAVIA, João Paulo Bianco; CUNHA, José Mário Batista. **Aplicação da interação solo-estrutura na análise de um edifício com fundações profundas: estudo de caso**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NAJAR, Imtiyaz Akbar et al. Avanço da interação solo-estrutura (ISE): Uma revisão abrangente das práticas atuais, desafios e direções futuras. **Journal of Infrastructure Preservation and Resilience** , v. 6, n. 1, p. 5, 2025.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uso de Solos Tropicais na Engenharia Geotécnica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2021.

OU, Weibing et al. Simulação FDEM sobre o comportamento de falha de patrimônios históricos de alvenaria sujeitos a recalque diferencial. **Buildings** , v. 12, n. 10, p. 1592, 2022.

PEREIRA, Vitor Bruno Santos et al. Análise comparativa entre o recalque de fundações rasas e profundas em edifício assentado sobre solo mole. 2018.

PHOON, K. K.; KULHAWY, F. H. **Evaluation of Model Uncertainties for Reliability-Based Foundation Design**. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2023.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 07 dez 2025.

PROSPERI, Alfonso et al. Fragilidade empírica e curvas ROC para edifícios de alvenaria sujeitos a recalques. **Journal of Building Engineering** , v. 68, p. 106094, 2023.

PRELLWITZ, Marta Fleischman. Monitoramento de recalque para estimativa de parâmetro de interação solo-estrutura. 2022. f. (Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civil) - Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2022.

PUTRI, Elsa Eka; RAO, N. S. V. K.; MANNAN, M. A. Evaluation of modulus of elasticity and modulus of subgrade reaction of soils using CBR test. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 2, n. 1, p. 34-40, 2012.

RAHEEM, Hind Nadhum. Análise de Elementos Finitos do Assentamento de Fundações Rasas em Solos Não Coesivos. **American Journal of Civil Engineering**, v. 10, n. 5, p. 201-212, 2022.

RAUECKER, J. C. N. *Previsão do recalque de um edifício alto com fundação em sapata na cidade de Goiânia*. Goiânia: Universidade Federal de Goiás — UFG, [s.d.].

RIBEIRO, Julia Cândido; DE OLIVEIRA, Ana Carolina Pereira; DE OLIVEIRA, Claudio Bonfante. ANÁLISE E PROJETO DE FUNDAÇÕES E SUA IMPORTÂNCIA PARA SEGURANÇA E ECONOMIA NAS OBRAS: ESTRATÉGIAS AVANÇADAS DE ANÁLISE E PROJETO DE FUNDAÇÕES. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 11, p. 2612-2650, 2023.

REIS, J. H. C. *Interação solo-estrutura de grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole*. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

REZENDE, Vitor Lúcio Mendes. *Avaliação patológica em recalques solo-fundação: uma análise de ocorrências na cidade de Uberlândia*. 2019.

SALGADO, R. **The Engineering of Foundations**. 2nd ed. McGraw-Hill Education, 2022.

SANTOS, Camila Luiza de Assis. *Análise Comparativa da Capacidade de Carga e do Recalque de Fundações Superficiais em Solos de Baixa e Média Resistência*. 2018. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SAMPAIO, GLAYSON BARBOSA. ANÁLISE DAS PATOLOGIAS NAS FUNDAÇÕES ORIUNDAS DE RECALQUE DIFERENCIAL ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO. **CONSTRUINDO**, p. 16-26, 2017.

SILVA, Israel Brizola da. **Análise comparativa de métodos de estimativa da tensão admissível do solo em fundações rasas: um estudo de caso**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILVA, Juliano Nunes Barbosa da et al. Interação solo-estrutura em edifícios sobre fundações superficiais. 2019.

SILVA NETO, Aristides Pereira da; ARAÚJO Júnior, Aury Paulino de; SOUZA, Beatriz Barboza de; ROCHA, Fabiola Luana Maia. Análise do dimensionamento do pórtico simples de sinalização vertical localizado no distrito de Placas, Uiraúna-PB. In: II Semana das Engenharias Ambiental e Civil – SEAC, 2019, Pau dos Ferros. *Engenharia na prática : o engenheiro civil e ambiental no mercado de trabalho* (anais). Pau dos Ferros: UFERSA, 2019.

SILVA, Vanessa Gomes da. Técnicas de monitoramento e previsão de recalculo em fundações-estudo de caso. 2024.

SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edigar. **Ensaio de Campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SHAHRIAR, Mohammad Abu Naser; DAS, Braja M.; SIVAKUGAN, Nagaratnam. Desenvolvimentos na quantificação do efeito da elevação do lençol freático sobre os recalques adicionais de fundações rasas apoiadas em solos granulares. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 9, n. 1, p. 67-78, 2015.

SKEMPTON, Alec Westley; MACDONALD, Donald Hugh. The allowable settlements of buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 5, n. 6, p. 727-768, 1956.

SILVEIRA, Camila Ramos; DE SOUZA, Samuel Aguiar; QUADRELI, Carlos Renato. Estudo sobre patologias da construção civil originárias de fundações. Revista GeTeC, v. 11, n. 35, 2022.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil mechanics in engineering practice**. John wiley & sons, 1996.

TONDO, Rafael Felipe. **Consideração da interação solo-estrutura na análise estrutural de edifícios em concreto armado com fundações em estaca: estudo de caso**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VANÍČEK, I.; VANÍČEK, M. **The evolution of settlement prediction methods: from elasticity to advanced soil models**. Geotechnical and Geological Engineering, v. 36, n. 3, p. 1451-1466, 2018.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Resende. Fundações: Critérios de projeto, investigação de subsolo e fundações superficiais. Vol. 1. São Paulo: Oficina de textos, 2004.

VIANA, P. M.; CARVALHO, J. C. **Advances in the Interpretation of In-Situ Tests for Settlement Prediction: A Review**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 147, n. 8, 2021.

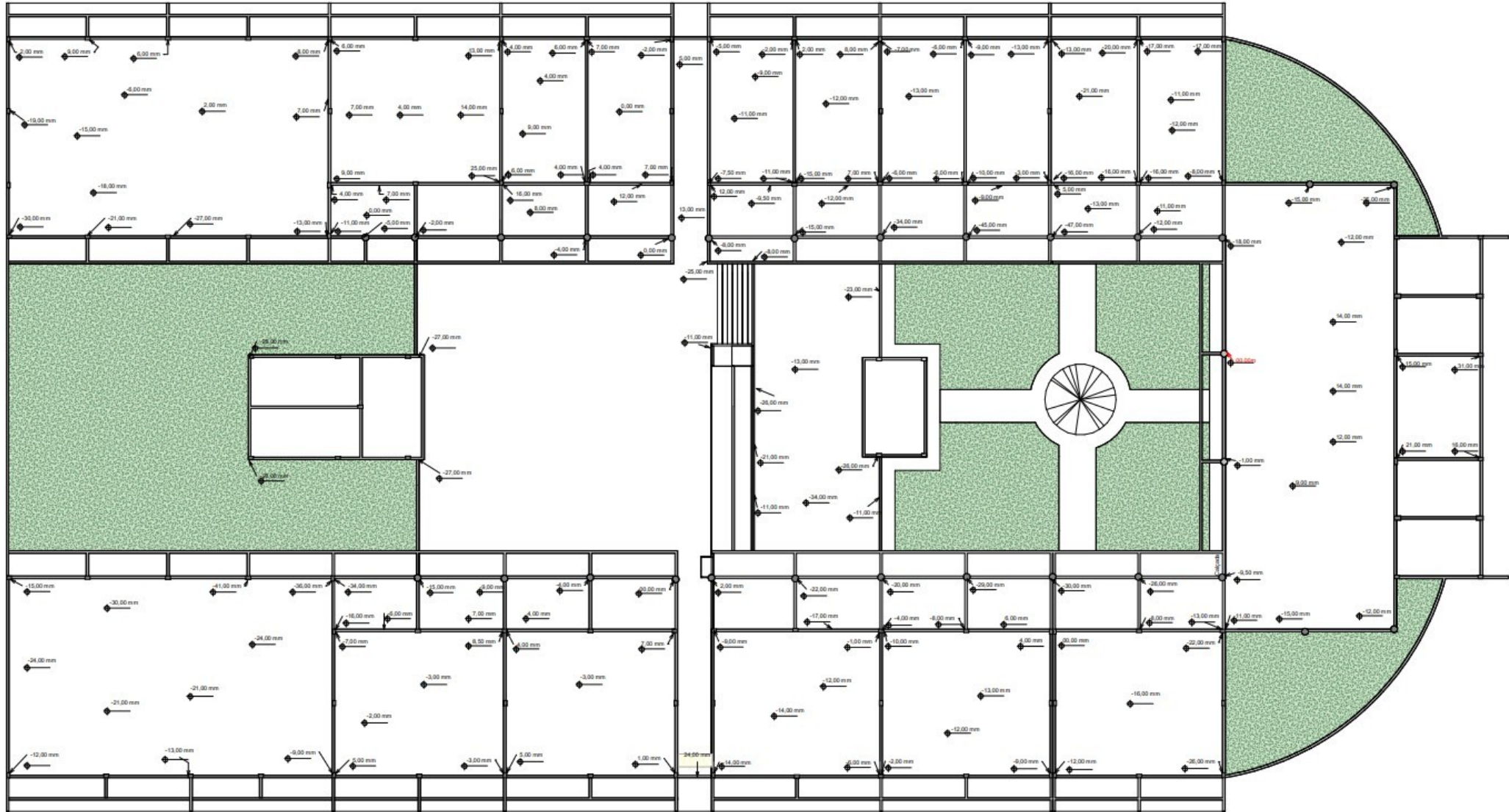
WELTER, Matheus Luis. Estudo comparativo entre modelos de obtenção de tensão admissível do solo e previsão de recalques de fundações superficiais baseados no Nspt e em parâmetros de resistência e deformabilidade. 2014.

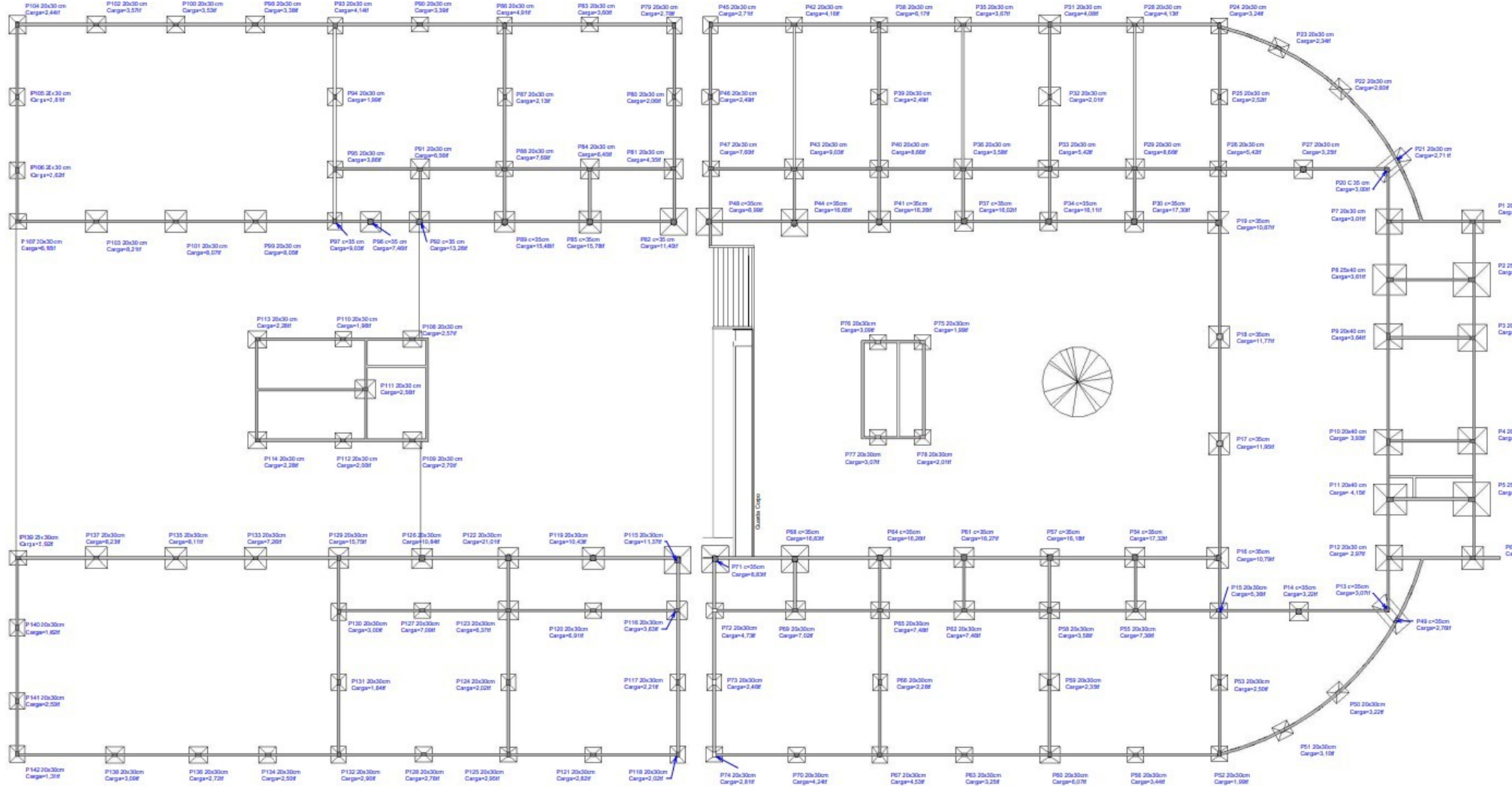
ZANETTE, Camila Dalva. **Análise do recalque de fundações superficiais utilizando o Método Analítico de Newmark**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ZHANG, G.; YIN, Z.-Y. **Computational Soil Mechanics: An Updated Framework**. Elsevier, 2020.

ZUCCHI, Enzo Cosenza et al. Interação solo x estrutura. Análise de um caso de obra com acompanhamento dos recalques. 2021.

ANEXO A- PLANTA ARQUITETÔNICA- ALTIMETRIAS





 ANEXO C - RELATÓRIOS DE CARGAS DE FUNDAÇÕES REALIZADA PELO SOFTWARE EBERICK.

OBRA		
Tipo		
Título		
Endereço		
Cliente		

Relatório de Cargas nas Fundações						
Nome	Sapata	Seção Pilar(cm)	Soma das cargas (tf)	Solo	B (m)	H(m)
P1	Retangular	20x30	2,94	0,00	0,65	0,75
P2	Retangular	25x40	3,68	0,00	0,65	0,80
P3	Retangular	20x30	3,30	0,00	0,65	0,75
P4	Retangular	20x30	3,58	0,00	0,65	0,75
P5	Retangular	25x40	4,19	0,00	0,65	0,80
P6	Retangular	20x30	2,92	0,00	0,65	0,75
P7	Retangular	20x30	3,01	0,00	0,65	0,75
P8	Retangular	25x40	3,61	0,00	0,65	0,80
P9	Retangular	20x40	3,64	0,00	0,65	0,80

P10	Retangular	20x40	3,93	0,00	0,65	0,80
P11	Retangular	25x40	4,15	0,00	0,65	0,80
P12	Retangular	20x30	2,97	0,00	0,65	0,75
P13	Quadrada	Raio=35cm	3,07	0,00	0,75	0,75
P14	Quadrada	Raio=35cm	3,22	0,00	0,75	0,75
P15	Retangular	20x30	5,36	0,00	0,75	0,85
p16	Quadrada	Raio=35cm	10,79	0,00	1,05	1,05
p17	Quadrada	Raio=35cm	11,95	0,00	1,05	1,05
P18	Quadrada	Raio=35cm	11,77	0,00	1,05	1,05
P19	Quadrada	Raio=35cm	10,87	0,00	1,05	1,05
P20	Quadrada	Raio=35cm	3,00	0,00	0,75	0,75
P21	Retangular	20x30	2,71	0,00	0,65	0,75
P22	Retangular	20x30	2,60	0,00	0,65	0,75
P23	Retangular	20x30	2,34	0,00	0,65	0,75
P24	Retangular	20x30	3,24	0,00	0,65	0,75
P25	Quadrada	20x30	2,00	0,00	0,75	0,75
P26	Retangular	20x30	5,42	0,00	0,75	0,85
P27	Quadrada	Raio=35cm	3,25	0,00	0,75	0,75
P28	Retangular	20x30	4,13	0,00	0,65	0,75
P29	Retangular	20x30	8,66	0,00	0,85	0,95
P30	Quadrada	Raio=35cm	17,30	0,00	1,30	1,30
P31	Retangular	20x30	4,08	0,00	0,85	0,95

P32	Quadrada	20x30	2,01	0,00	0,75	0,75
P33	Retangular	20x30	5,42	0,00	0,85	0,95
P34	Quadrada	Raio=35cm	16,11	0,00	1,30	1,30
P35	Retangular	20x30	3,67	0,00	0,65	0,75
P36	Retangular	20x30	3,58	0,00	0,60	0,70
P37	Quadrada	Raio=35cm	16,02	0,00	1,30	1,30
P38	Retangular	20x30	6,17	0,00	0,75	0,85
P39	Quadrada	20x30	2,04	0,00	0,75	0,75
P40	Retangular	20x30	8,66	0,00	0,90	1,00
P41	Quadrada	Raio=35cm	16,26	0,00	1,30	1,30
P42	Retangular	20x30	4,16	0,00	0,65	0,75
P43	Retangular	20x30	9,06	0,00	0,90	1,00
P44	Quadrada	Raio=35cm	16,65	0,00	1,30	1,30
P45	Retangular	20x30	2,71	0,00	0,65	0,75
P46	Quadrada	20x30	2,49	0,00	0,75	0,75
P47	Retangular	20x30	7,60	0,00	0,85	0,95
P48	Quadrada	Raio=35cm	8,99	0,00	0,95	0,95
P49	Retangular	20x30	2,76	0,00	0,65	0,75
P50	Retangular	20x30	3,22	0,00	0,65	0,75
P51	Retangular	20x30	3,70	0,00	0,65	0,75
P52	Retangular	20x30	3,44	0,00	0,65	0,75
P53	Quadrada	20x30	2,50	0,00	0,75	0,75

P54	Quadrada	Raio=35cm	17,32	0,00	1,30	1,30
P55	Retangular	20x30	7,38	0,00	0,85	0,95
P57	Retangular	20x30	4,18	0,00	0,65	0,75
P57	Quadrada	Raio=35cm	16,18	0,00	1,30	1,30
P58	Retangular	20x30	3,58	0,00	0,60	0,70
P59	Quadrada	20x30	2,35	0,00	0,75	0,75
P60	Retangular	30x41	6,07	0,00	0,80	0,90
P61	Quadrada	Raio=35cm	16,27	0,00	1,30	1,30
P62	Retangular	20x30	7,46	0,00	0,85	0,95
P63	Retangular	20x30	3,25	0,00	0,65	0,75
P64	Quadrada	Raio=35cm	16,26	0,00	1,30	1,30
P65	Retangular	20x30	7,48	0,00	0,85	0,95
P66	Retangular	20x30	2,28	0,00	0,75	0,75
P67	Retangular	20x30	4,53	0,00	0,65	0,75
P68	Quadrada	Raio=35cm	16,83	0,00	1,30	1,30
P69	Retangular	20x30	7,02	0,00	0,85	0,95
P70	Retangular	20x30	4,24	0,00	0,65	0,75
P71	Quadrada	Raio=35cm	8,83	0,00	0,95	0,95
P72	Retangular	20x30	4,73	0,00	0,65	0,75
P73	Quadrada	20x30	2,46	0,00	0,75	0,75
P74	Retangular	20x30	2,81	0,00	0,65	0,75
P75	Retangular	20x30	1,99	0,00	0,65	0,75

P76	Retangular	20x30	3,09	0,00	0,65	0,75
P77	Retangular	20x30	3,07	0,00	0,65	0,75
P78	Retangular	20x30	2,01	0,00	0,65	0,75
P79	Retangular	20x30	2,78	0,00	0,65	0,75
P80	Retangular	20x30	2,06	0,00	0,60	0,70
P81	Retangular	20x30	4,35	0,00	0,65	0,75
P82	Quadrada	Raio=35cm	11,40	0,00	1,05	1,05
P83	Retangular	20x30	3,60	0,00	0,65	0,75
P84	Retangular	20x30	6,45	0,00	0,75	0,85
P85	Quadrada	Raio=35cm	15,78	0,00	1,25	1,25
P86	Retangular	20x30	4,91	0,00	0,65	0,75
P87	Retangular	20x31	2,13	0,00	0,65	0,75
P88	Retangular	20x30	7,69	0,00	0,85	0,95
P89	Quadrada	Raio=35cm	15,48	0,00	1,25	1,25
P90	Retangular	20x30	3,39	0,00	0,65	0,75
P91	Retangular	20x30	6,56	0,00	0,75	0,85
P92	Quadrada	Raio=35cm	13,26	0,00	1,15	1,15
P93	Retangular	20x30	4,14	0,00	0,65	0,75
P94	Retangular	20x30	1,99	0,00	0,60	0,70
P95	Retangular	20x30	3,86	0,00	0,65	0,75
P96	Quadrada	Raio=35cm	7,44	0,00	0,85	0,85
P97	Retangular	20x30	9,03	0,00	0,95	1,00

P98	Retangular	20x30	3,38	0,00	0,65	0,75
P99	Retangular	20x30	8,05	0,00	0,85	0,95
P100	Retangular	20x30	3,57	0,00	0,65	0,75
P101	Retangular	20x30	8,07	0,00	0,85	0,95
P102	Retangular	20x30	3,57	0,00	0,65	0,75
P103	Retangular	20x30	8,21	0,00	0,85	0,95
P104	Retangular	20x30	2,43	0,00	0,65	0,75
P105	Retangular	20x30	2,81	0,00	0,60	0,70
P106	Retangular	20x30	2,62	0,00	0,60	0,70
P107	Retangular	20x30	6,18	0,00	0,75	0,85
P108	Retangular	20x30	2,57	0,00	0,60	0,70
P109	Retangular	20x30	2,70	0,00	0,60	0,70
P110	Retangular	20x30	1,96	0,00	0,60	0,70
P111	Retangular	20x30	2,56	0,00	0,65	0,75
P112	Retangular	20x30	2,00	0,00	0,60	0,70
P113	Retangular	20x30	2,28	0,00	0,65	0,75
P114	Retangular	20x30	2,28	0,00	0,65	0,75
P115	Quadrada	Raio=35cm	11,37	0,00	1,00	1,00
P116	Retangular	20x30	3,63	0,00	0,65	0,75
P117	Retangular	20x30	6,91	0,00	0,75	0,85
P117	Retangular	20x30	2,21	0,00	0,60	0,70
P118	Retangular	20x30	2,02	0,00	0,65	0,75

P119	Quadrada	Raio=35cm	10,83	0,00	1,00	1,00
P120	Retangular		6,91	0,00	0,65	0,75
P121	Retangular	20x30	2,89	0,00	0,65	0,75
P122	Quadrada	Raio=35cm	21,01	0,00	1,40	1,40
P123	Retangular	20x30	6,37	0,00	0,75	0,85
P124	Retangular	20x30	2,95	0,00	0,65	0,75
P125	Retangular	20x30	2,05	0,00	0,60	0,70
P126	Quadrada	Raio=35cm	10,84	0,00	1,00	1,00
P127	Retangular	20x30	7,09	0,00	0,75	0,85
P128	Retangular	20x30	2,78	0,00	0,65	0,75
P129	Retangular	20x30	15,75	0,00	1,15	1,25
P130	Retangular	20x30	3,00	0,00	0,65	0,75
P131	Retangular	20x30	1,84	0,00	0,60	0,70
P132	Retangular	20x30	2,90	0,00	0,65	0,75
P133	Retangular	20x30	7,26	0,00	0,85	0,95
P134	Retangular	20x30	2,50	0,00	0,65	0,75
P135	Retangular	20x30	8,11	0,00	0,85	0,95
P136	Retangular	20x30	2,72	0,00	0,65	0,75
P137	Retangular	20x30	8,23	0,00	0,85	0,95
P138	Retangular	20x30	3,09	0,00	0,65	0,75
P139	Retangular	20x30	5,92	0,00	0,75	0,85
P140	Retangular	20x30	1,62	0,00	0,60	0,70

P141	Retangular	20x30	2,53	0,00	0,60	0,70
P142	Retangular	20x30	1,31	0,00	0,95	1,00
P143	Retangular	20x30	5,86	0,00	0,85	0,95
TOTAL			840,61			

AltoQi | Tecnologia aplicada à engenharia.