

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO MARCELLO SOUZA DE MORAIS

ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS
PAVIMENTOS CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Jataí
2022

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico/Tecnológico - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: João Marcello Souza de Moraes

Matrícula: 20171020260282

Título do Trabalho: Análise da estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos considerando a interação solo-estrutura.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O referido autor declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jataí, 31/01/2023.



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

JOÃO MARCELLO SOUZA DE MORAIS

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS
PAVIMENTOS CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA**

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno

Jataí
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Morais, João Marcello Souza de.

Análise da estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos considerando a interação solo-estrutura [manuscrito] / João Marcello Souza de Moraes. -- Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2022.

71 f.; il.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno.

Bibliografias.

1. Estabilidade global. 2. Interação solo-estrutura. 3. Redistribuição de esforços. 4. SISEs. I. Bueno, Mônica Maria Emerenciano. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.

Bibliotecária – Rosy Cristina O. Barbosa – CRB 1/2380 – C. Jataí. Cód. F012/2023-1.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

JOÃO MARCELLO SOUZA DE MORAIS

ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 10 de dezembro de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Mônica Maria Emerenciano Bueno
Presidente da banca / Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof^ª. Ma. Tallyta da Silva Curado
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Eng Civil Esp. Fernando Severino da Silva
Membro Externo
Construtop

Documento assinado eletronicamente por:

- **João Marcello Souza de Moraes**, 20171020260282 - Discente, em 29/01/2023 17:26:40.
- **Fernando Severino da Silva**, Fernando Severino da Silva - 1223 - DIRETORES DE OPERAÇÕES DE OBRAS EM EMPRESA DE CONSTRUÇÃO - Construtop Construtora (08966379000109), em 21/12/2022 10:27:35.
- **Tallyta da Silva Curado**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/12/2022 10:59:34.
- **Monica Maria Emerenciano Bueno**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/12/2022 16:40:44.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/12/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 353110

Código de Autenticação: 863f785c4d



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3605-0837 (ramal: 837)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu avô,
Pedro Martins de Souza,
E ao meu amigo, Yuri Barboza de Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família. Amo muito vocês e sou muito grato por terem me dado todo o suporte necessário nesses anos de curso. Em todo esse tempo, nunca me deixaram desamparado.

Agradeço, de coração, aos meus amigos mais próximos. Com toda certeza, só pude me manter são durante todo esse tempo por conta deles. Durante esses seis anos de curso, tantas mudanças aconteceram. Muitos motivos de alegria, assim como de tristeza, e eles sempre estiveram ao meu lado, me dando suporte, me fazendo sorrir, me servindo como principal ponto de fuga dos estresses do dia-a-dia.

Agradeço também, a todos os profissionais com quem tive o privilégio de trabalhar junto durante todo este tempo. Vocês foram as peças mais importantes para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço imensamente ao meu patrão e amigo Fernando Severino, por ter me cedido as plantas do projeto estrutural utilizado nesta pesquisa, e por ter me auxiliado incansavelmente em todas as etapas do trabalho.

Agradeço a minha orientadora, Mônica Bueno, por ter tolerado todo o meu desespero e minhas entregas em cima da hora. Obrigado por todo o auxílio neste trabalho, na faculdade e também no ensino técnico.

Agradeço à TQS Informática, por ter contribuído com a licença do programa utilizado na pesquisa, bem como pelo suporte dado durante o desenvolvimento da mesma.

Por fim, agradeço a Deus por todas as oportunidades de crescimento, por toda a paciência que me deu, e pelo privilégio de estar vivo.

RESUMO

MORAIS, J. M. S. de (2022). **Análise da estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos considerando a interação solo-estrutura.** 71p. Trabalho de conclusão de curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Jataí, 2022

Com o crescimento populacional acelerado nas últimas décadas, e a consequente necessidade de melhor aproveitamento do solo urbano, a verticalização dos edifícios se tornou uma tendência mundial. Com estruturas cada vez mais altas, esbeltas e flexíveis, problemas de estabilidade tornaram-se, também, mais recorrentes, levando o calculista a se apossar de métodos mais refinados de análise. Apesar da evolução tecnológica, muitas simplificações ainda são utilizadas nos escritórios de engenharia, como por exemplo, a consideração de apoios indeslocáveis, que suprimem a interação do solo com a estrutura, distanciando-se assim, do real comportamento do modelo. Tendo isso em mente, o presente trabalho busca analisar os efeitos da interação solo-estrutura na estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos. Para isso, com o auxílio do *software* TQS e do módulo SISEs, foram realizados diferentes modelos de cálculo, de mesma superestrutura, mas com condições geotécnicas diferentes, variando composições de solo e índices de SPT. Com isso, foram comparados os resultados dos modelos entre si, tais como os parâmetros de estabilidade γ_z e α , os deslocamentos máximos da estrutura, a redistribuição de esforços na base dos pilares e o consumo de aço. Os resultados mostraram que a interação solo-estrutura afeta significativamente os parâmetros de estabilidade, visto que há considerável redistribuição de esforços da estrutura, com o alívio ou maior carregamento da base dos pilares, provando assim, a importância de sua consideração.

Palavras-chave: Estabilidade global. Interação solo-estrutura. Redistribuição de esforços. SISEs.

ABSTRACT

MORAIS, J. M. S. de (2022). **Analysis of the global stability of a multi-storey building considering the soil-structure interaction**. 71p. Course completion work for a Bachelor's Degree in Civil Engineering, Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás. Jataí, 2022

With the rapid population growth in recent decades, and the consequent need for better use of urban land, the verticalization of buildings has become a worldwide trend. With higher, slimmer and more flexible structures, stability problems have also become more recurrent, leading the engineer to take possession of more refined methods of analysis. Despite the technological evolution, many simplifications are still used in engineering offices, such as the consideration of non-displaceable supports, which suppress the interaction of the soil with the structure, thus distancing themselves from the real behavior of the model. With this in mind, the present work seeks to analyze the effects of soil-structure interaction on the global stability of a multiple floors building. So, with the help of the TQS software and the SISEs module, different calculation models were performed, with the same superstructure, but with different geotechnical conditions, varying soil compositions and SPT indices. Then, the results of the models were compared with each other, such as the stability parameters γ_z and α , the maximum displacements of the structure, the redistribution of efforts at the base of the columns and the steel consumption. The results showed that the soil-structure interaction significantly affects the stability parameters, since there is a considerable redistribution of the structure's efforts, with the relief or greater loading of the base of the pillars, thus proving the importance of its consideration.

Keywords: Global stability. Soil-structure interaction. Redistribution of efforts. SISEs

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Escala granulométrica empregada pela NBR 6502.....	19
Figura 2.2 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica do solo	20
Figura 2.3 – Esquema da perfuração por percussão e amostragem.....	23
Figura 2.4 – Perfil de uma sondagem de simples reconhecimento	24
Figura 2.5 – Exemplos de fundações superficiais	25
Figura 2.6 – Exemplos de fundações profundas.....	26
Figura 2.7 – Planos de referências nos projetos de superestrutura e infraestrutura.....	28
Figura 2.8 – Recalque x rigidez relativa estrutura-solo.....	29
Figura 2.9 – Analogia da viga-parede	30
Figura 2.10 – Hipótese de Winkler.....	32
Figura 2.11 – Artificio de Steinbrenner.....	33
Figura 2.12 – Discretização dos elementos de fundação conforme o módulo SISEs da TQS Informática.....	35
Figura 2.13 – Discretização de fundações tipo estaca conforme o módulo SISEs da TQS Informática.....	35
Figura 2.14 – Surgimento dos efeitos de segunda ordem.....	38
Figura 3.1 – Fachada do edifício	43
Figura 3.2 – Corte esquemático da estrutura	44
Figura 3.3 – Perspectiva frontal do edifício	45
Figura 3.4 – Perspectiva posterior do edifício.....	45
Figura 3.5 – Disposição dos blocos de fundação	45
Figura 3.6 – Método de cálculo de estacas.....	46
Figura 3.7 – Capacidade estrutural das estacas pré-moldadas	47
Figura 3.8 – Ordem de exportação de dados da estrutura	48
Figura 3.9 – Escolha do modelo estrutural do edifício.....	49
Figura 3.10 – Critérios para caracterização das cargas de vento.....	49
Figura 3.11 – Cargas de alvenarias.....	50
Figura 3.12 – Perfil de sondagem do modelo 02.....	51
Figura 3.13 – Perfil de sondagem do modelo 03.....	52
Figura 3.14 – Perfil de sondagem do modelo 04.....	53
Figura 3.15 – Perfil de sondagem do modelo 05.....	54

Figura 3.16 – Perfil de sondagem do modelo 06.....	55
Figura 3.17 – Perfil de sondagem do modelo 07.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades observadas em análises tátil-visuais de solos	22
Tabela 2.2 – Compacidade das areias e siltes arenosos em função do SPT	23
Tabela 2.3 – Consistência das argilas e siltes argilosos em função do SPT.....	24
Tabela 3.1 – Identificação dos modelos estruturais.....	42
Tabela 3.2 – Identificação dos pavimentos da estrutura.....	43
Tabela 3.3 – Quantitativos de estacas por blocos	46
Tabela 3.4 – Critérios de dimensionamento de elementos estruturais	49
Tabela 3.5 – Cargas superficiais por pavimento.....	50
Tabela 4.1 – Esforços nas bases dos pilares da estrutura, em toneladas	57
Tabela 4.2 – Redistribuição de cargas nas bases dos pilares.....	58
Tabela 4.3 – Índices de estabilidade global e deslocamentos máximos do modelo 01	60
Tabela 4.4 – Índices de estabilidade global e deslocamentos máximos do modelo 02	60
Tabela 4.5 – Índices de estabilidade global e deslocamentos máximos do modelo 03	60
Tabela 4.6 – Índices de estabilidade global e desloc. máximos dos modelos 04 a 07	60
Tabela 4.7 – Consumo de aço do modelo 01	61
Tabela 4.8 – Consumo de aço do modelo 02.....	61
Tabela 4.9 – Consumo de aço do modelo 03.....	62
Tabela 4.10 – Consumo de aço dos modelos 04 a 07	62
Tabela 4.11 – Comparação dos consumos de aço dos modelos	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer Aided Design
ISE	Interação Solo-Estrutura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SISEs	Sistema de Interação Solo Estrutura
SPT	Standard Penetration Test

LISTA DE SÍMBOLOS

H_{tot}	Altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo
$M_{1,tot,d}$	Momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura
$\Delta M_{tot,d}$	Soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem
γ_z	Coefficiente gamma-z de avaliação da instabilidade e majoração de esforços
l	Comprimento do vão entre pilares
Δ	Deflexão relativa
L	Distância
E_c	Módulo de elasticidade do material da estrutura
E	Módulo de elasticidade do solo
I_b	Momento de inércia da viga típica
n	Número de pavimentos
α	Parâmetro de instabilidade alfa
W	Recalque absoluto
δ_w	Recalque diferencial
N_{spt}	Resistência à penetração
F_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
K_{ss}	Rigidez relativa estrutura-solo
θ	Rotação
β	Rotação relativa
N_k	Somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura
$E_{cs}I_c$	Somatório dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 SOLOS	19
2.1.1 INTRODUÇÃO	19
2.1.2 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA	20
2.1.3 ANÁLISE TÁTIL-VISUAL	21
2.1.4 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS	22
2.2 FUNDAÇÕES	25
2.2.1 FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS	25
2.2.2 FUNDAÇÕES PROFUNDAS	25
2.2.3 RECALQUES	26
2.3 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA	27
2.3.1 INTRODUÇÃO	27
2.3.2 FATORES DE INFLUÊNCIA À INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA	28
2.3.2.1 Rigidez relativa estrutura-solo	28
2.3.2.2 Número de pavimentos	29
2.3.2.3 Processo construtivo	30
2.3.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DA ISE	31
2.3.3.1 Monitoramento de recalques	31
2.3.3.2 Modelagem tridimensional	31
2.3.3.3 Modelo de Winkler	32
2.3.3.4 Teoria de Mindlin	32
2.3.3.5 Artificio de Steinbrenner	33
2.3.3.6 Métodos iterativos	34
2.4 ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFÍCIOS	36
2.4.1 INTRODUÇÃO	36
2.4.2 NÃO LINEARIDADE FÍSICA E NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA	37
2.4.3 EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM	37
2.4.4 PARÂMETROS DE VERIFICAÇÃO DE ESTABILIDADE	38

2.4.4.1 Parâmetro de estabilidade α	39
2.4.4.2 Coeficiente γ_z	40
2.5 Estado da arte.....	41
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	42
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	42
3.2 SUPERESTRUTURA	43
3.3 INFRAESTRUTURA.....	45
3.4 FERRAMENTAS UTILIZADAS	47
3.5 CRITÉRIOS DE PROJETO	48
3.6 PERFIS DE SONDAGEM	50
CAPÍTULO 4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	57
4.1 REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS	57
4.2 ESTABILIDADE GLOBAL	60
4.3 CONSUMO DE AÇO	61
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	64
ANEXOS	67

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda a justificativa e os objetivos da realização desta pesquisa.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento populacional, e a consequente necessidade de maior aproveitamento do espaço geográfico e dos recursos naturais, viu-se em todo o mundo uma grande tendência de verticalização das edificações. Esta demanda, quando somada às técnicas arquitetônicas contemporâneas, as quais são compostas por edifícios cada vez mais esbeltos, com grandes vãos e geometrias orgânicas, pode trazer ao projeto de engenharia grandes complexidades (SILVA et. al., 2021).

De forma a atender tais exigências, garantir a segurança do usuário final e, ao mesmo tempo, suprir a demanda de projetos, a utilização de *softwares* de análise e cálculo estrutural se torna imprescindível na rotina do calculista. Hoje, com o auxílio de programas computacionais, o engenheiro estrutural é capaz de obter soluções mais precisas, visto que as ferramentas disponibilizadas permitem ao profissional, de forma eficaz e quase automática, a análise de diversas possibilidades para a estrutura (COVAS, 2016)

Apesar do avanço tecnológico, muitas simplificações ainda são feitas no processo projetual de uma obra, como por exemplo, a consideração da hipótese de apoios indeslocáveis. Neste pressuposto, o conjunto de fundações deve garantir a indeslocabilidade da base dos pilares, desprezando assim, a deformabilidade provocada pelo solo (ANTONIAZZI, 2011).

Levando em consideração a realidade dos escritórios de engenharia, que em sua grande maioria, calculam separadamente a estrutura de sua fundação, e que as reações de apoio estão intimamente ligadas à disposição do maciço de base onde se encontram, o desprezo pela deformabilidade do solo acarreta na negligência da redistribuição de esforços dos elementos estruturais, fugindo assim da realidade física do modelo e, consequentemente, dos valores de cálculo considerados (ANTONIAZZI, 2011).

Com a redistribuição de esforços, proveniente do recalque de apoios na interação solo-estrutura (ISE), patologias não previstas no modelo convencional de cálculo, como por exemplo, fissuras em vigas e lajes, ou, em casos mais severos, o esmagamento de pilares, podem surgir. Além disso, com a configuração deformada da estrutura, ou sua não-linearidade geométrica, esforços adicionais são acometidos através da combinação das cargas atuantes com as excentricidades

do novo estado de equilíbrio. Tais esforços adicionais denominam-se efeitos de segunda ordem (JORDÃO, 2003).

Logo, tendo em vista a grande influência da interação solo-estrutura na estabilidade global de edifícios, acrescida à simplificação considerada na hipótese de apoios indeslocáveis por grande parte dos projetistas, e a não integração das concepções de cálculo das frentes de estruturas e fundações, o presente trabalho busca avaliar o impacto da consideração da ISE na estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho se dão a seguir, por objetivos geral e específicos.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto da consideração da interação solo-estrutura na estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos, abordando situações hipotéticas onde são considerados diferentes tipos de solos, buscando compreender a influência do maciço no comportamento da superestrutura.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os diferentes tipos de solos a serem abordados na pesquisa;
- Modelar a infraestrutura e a superestrutura de um edifício de múltiplos pavimentos em concreto armado utilizando a ferramenta TQS;
- Analisar os parâmetros de estabilidade, os deslocamentos e a redistribuição de esforços da estrutura;
- Comparar os valores obtidos através dos modelos com interação solo-estrutura com os valores referentes ao modelo de método convencional de cálculo (considerando hipótese de apoios indeslocáveis).

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz o referencial teórico, e aborda as concepções necessárias para entendimento e desenvolvimento da pesquisa. Serão apresentados os conceitos relacionados aos solos, fundações, interação solo-estrutura, estabilidade global de edificações e o estado da arte.

2.1 SOLOS

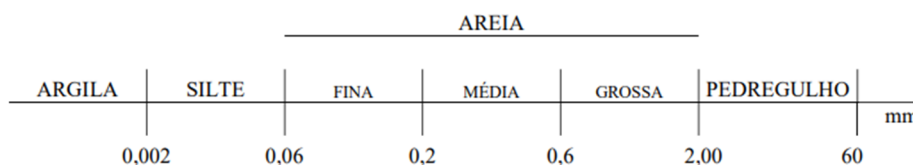
2.1.1 INTRODUÇÃO

Os solos são aglomerados de partículas originários da decomposição de rochas, decorrente de agentes químicos e físicos, que podem ser escavados sem a utilização de explosivos (SILVA FILHO, 2014). São utilizados na engenharia como material de construção ou suporte de estruturas.

Sendo formado por partículas de um ou mais minerais, o solo possui características que dependem de sua rocha de origem e dos processos de formação e transporte (PINTO, 2006). Dentre seus minerais mais comuns, podemos citar o quartzo, que constitui os siltes e areias, e os feldspatos, que dão origem aos argilominerais, partículas mais finas do solo (SILVA FILHO, 2014).

De acordo com as partículas presentes, as porções de solo podem receber diferentes denominações. A NBR 6502 (ABNT, 1995) define, conforme apresentado na Figura 2.1:

Figura 2.1 - Escala granulométrica empregada pela NBR 6502 (ABNT, 1995).



Fonte: Prado (2018).

Sendo:

- **Pedregulho** – Solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 mm e 60 mm. Quando arredondados ou semi-arredondados, são denominados cascalho ou seixo;

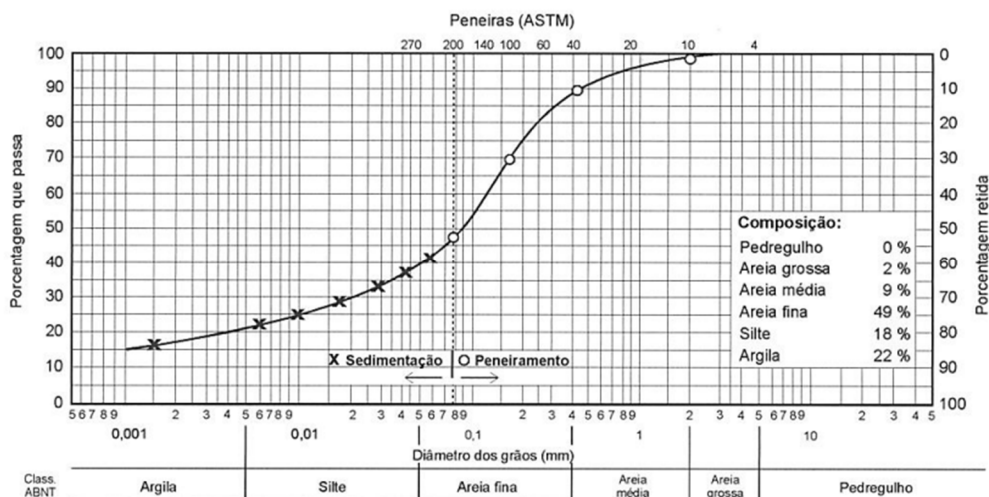
- **Areia** – Solo não coesivo e não plástico, formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm;
- **Silte** – Solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco ao ar. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm;
- **Argila** – Solo de granulação fina, constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade.

2.1.2 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Em uma pequena fração de solo, é possível encontrar partículas de diversos tamanhos, as quais, a priori, podem não ser facilmente reconhecidas. Isso porque os grãos de areia, por exemplo, podem estar envoltos por uma grande quantidade de partículas argilosas, que são mais finas e dificilmente diferenciáveis quando secas (PINTO, 2006).

A determinação do tamanho dos grãos de um solo é feita através da análise granulométrica, que pode se dar em duas partes: o peneiramento e a sedimentação (PINTO, 2006). Na primeira parte, o peneiramento, o peso do grão que atravessa cada peneira é denominado “porcentagem que passa”, sendo representado graficamente a partir da abertura da malha da peneira, em escala logarítmica, conforme a Figura 2.2 (PINTO, 2006; PRADO, 2018).

Figura 2.2 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica do solo.



Fonte: Pinto (2006).

Sendo o diâmetro de abertura das malhas das peneiras equivalente ao diâmetro das partículas, e levando em consideração que a menor malha utilizada nas análises granulométricas possui abertura de 0,075mm, Pinto (2006) diz que, caso haja interesse na distribuição da parte mais fina do solo, a técnica da sedimentação pode ser empregada: baseada na Lei de Stokes, a identificação dos grãos se dá pela velocidade de queda das partículas, devido ao peso específico das mesmas, em meio a um fluido determinado.

2.1.3 ANÁLISE TÁTIL-VISUAL

Além dos ensaios granulométricos, testes rápidos podem ser realizados a fim de identificar as amostras de solo. Na NBR 7250 (ABNT, 1982) é possível encontrar os seguintes procedimentos:

- **Sensação ao tato:** Ao esfregar uma amostra de solo úmido em mãos, distingue-se a aspereza das areias, que não se desmancham em contato com a água, em contrapartida às argilas, que formam uma camada pastosa nas mãos;
- **Plasticidade:** Ao modelar bolinhas de solo úmido, distingue-se as argilas por suas características mais moldáveis, em contrapartida às areias e siltes, que possuem nenhuma ou pouca plasticidade, respectivamente;
- **Resistência a seco:** Molda-se bolinhas de solo úmido, deixando-as secar em seguida. Ao pressionar as amostras a seco, as pelotas argilosas se dividirão em frações bem definidas, enquanto que as pelotas siltosas se pulverizarão.
- **Dispersão em água:** Ao depositar as amostras de solo em provetas com água, as areias se depositam rapidamente no fundo, enquanto que as partículas de argila turvam-se no líquido e demoram mais para assentar.

Na Tabela 2.1 são resumidas as propriedades dos solos para caracterizações em análises tátil-visuais.

Tabela 2.1 - Propriedades observadas em análises tátil-visuais de solos

TIPOS DE SOLOS			
PROPRIEDADES	ARENOSOS	SILTOSOS	ARGILOSOS
Granulação	Grossa (olho nu)	Fina (tato)	Muito Fina
Plasticidade	Nenhuma	Pouca	Grande
Compressibilidade	Pouca	Média	Grande
Coesão	Nenhuma	Média	Grande
Resistência do Solo Seco	Nenhuma	Média	Grande
Resumo para caracterização	Tato visual	Tato Quando seco, se esfarela Se imergir uma porção seca na água, desagrega	Tato Se molhar, torna-se bem plástico Se imergir na água, mesmo depois de seca não desagrega.

Fonte: Adaptado de Silva Filho (2014)

2.1.4 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

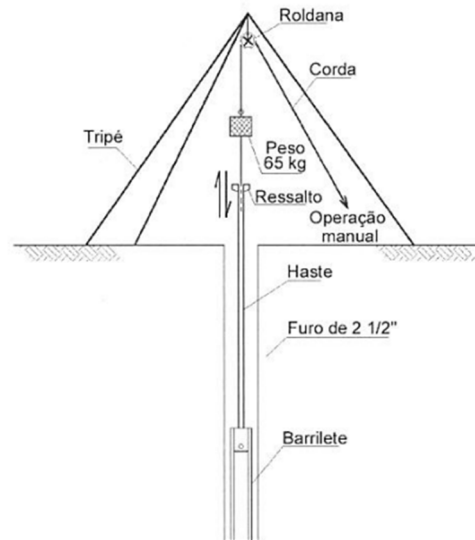
Sendo uma atividade preliminar essencial à execução de qualquer projeto de engenharia, a prospecção do subsolo visa a identificação, a avaliação do estado e, conseqüentemente, a amostragem do solo onde será implantada a obra (PRADO, 2018).

O método mais comum de reconhecimento do subsolo utilizado no Brasil é a Sondagem de Simples Reconhecimento, consistindo de dois tipos de operação: perfuração e amostragem (PINTO, 2006).

Sendo o procedimento normatizado pela NBR 6484 (ABNT, 2020), tem-se que:

- A sondagem se inicia com a utilização de um trado-concha até o primeiro metro de profundidade, sendo seguida, então, pela introdução de um trado helicoidal que escavará até o alcance do nível d'água;
- De metro em metro, ou sempre que for notada a alteração da composição do solo (seja pela coloração ou sensibilidade tátil), é inserido um amostrador padrão, com diâmetro externo de duas polegadas, o qual é golpeado e, conseqüentemente, cravado com o auxílio de um martelo de ferro fundido de 65 kg. O martelo em questão é elevado a uma altura de 75 cm, com o auxílio de cordas e roldana na parte superior de um tripé, conforme apresentado na Figura 2.3, e deixado cair livremente sobre a peça, sendo o movimento repetido até o alcance de 45 cm de penetração;

Figura 2.3 – Esquema da perfuração por percussão e amostragem



Fonte: Pinto (2006).

- Durante a amostragem, são anotados os números de golpes necessários para cravar cada trecho de 15 cm do amostrador. A resistência à penetração, também referida como N_{spt} ou, simplesmente, SPT (iniciais de Standard Penetration Test, ou, em português, teste padrão de penetração) do solo, se dá pelo número de golpes necessários para cravar os últimos 30 cm do amostrador, sendo o primeiro trecho descartado.

Através do índice do SPT, o solo é classificado de acordo com sua compacidade, no caso de areias ou siltes arenosos, ou pela sua consistência, quando argilas ou siltes argilosos (PINTO, 2006). Conforme as Tabelas 2.2 e 2.3, a NBR 6484 (ABNT, 2020) determina:

Tabela 2.2 – Compacidade das areias e siltes arenosos em função do SPT

Solo	Índice de resistência à penetração - N	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)

Fonte: ABNT (2020).

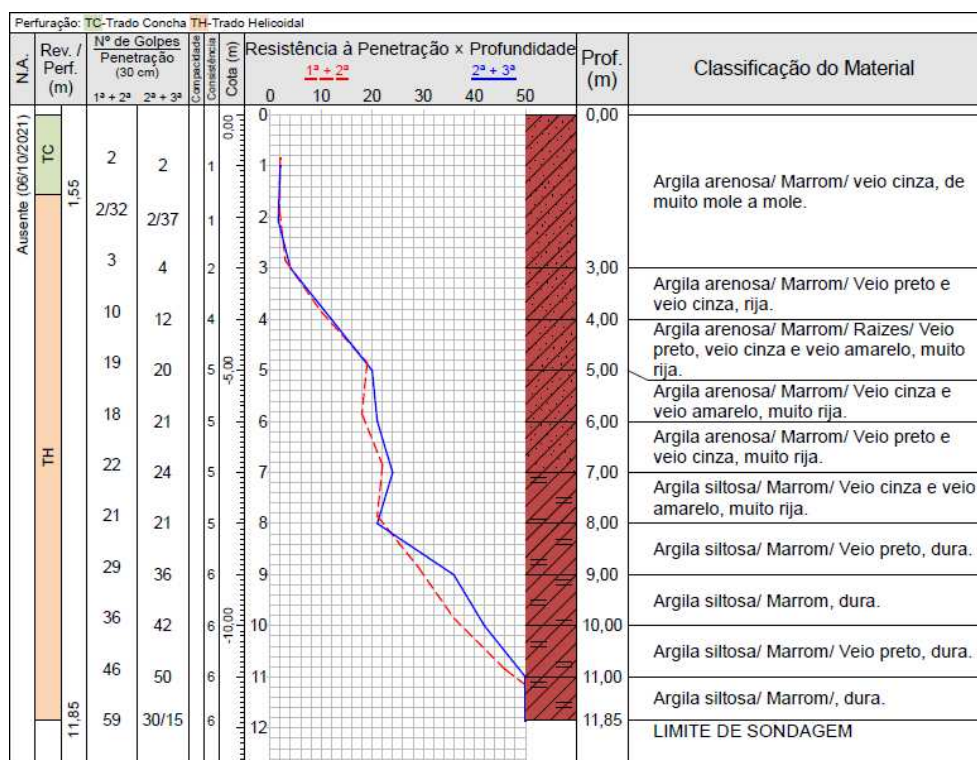
Tabela 2.3 – Consistências das argilas e siltes argilosos em função do SPT

Solo	Índice de resistência à penetração - N	Designação
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)

Fonte: ABNT (2020).

Após a coleta, as amostras de solo passam por um processo de identificação tátil-visual para identificação de suas características (PRADO, 2018). O resultado da investigação é apresentado através de perfis do subsolo, indicados em forma de gráfico e tabela, conforme a Figura 2.4, trazendo a descrição de cada amostra encontrada, o valor do respectivo N_{spt} , as cotas das camadas correspondentes e a posição do/dos nível/níveis de água (SILVA FILHO, 2014).

Figura 2.4 – Perfil de uma sondagem de simples reconhecimento



Fonte: Acervo do autor (2022).

2.2 FUNDAÇÕES

2.2.1 FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

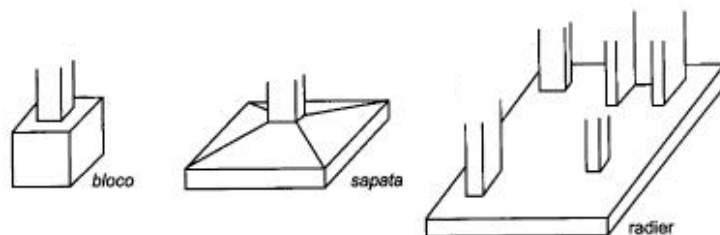
São elementos de transferências de carga da superestrutura para o maciço de solo, de modo que as pressões são, em sua maioria, distribuídas sob a base da fundação, e que sua profundidade de assentamento seja inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação (NBR 6122, 2019).

Dentre os tipos de fundações superficiais, é possível citar:

- **Bloco** – Elemento de fundação que é dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultante sejam resistidas pelo material (geralmente concreto), sem a necessidade de armadura. Pode ser aplicado a um pilar isolado ou ser comum a duas ou mais colunas;
- **Sapata** – Elemento de fundação que é dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultante sejam resistidas pelo emprego de armadura. Assim como os blocos, pode ser aplicada a um pilar isolado ou ser comum a duas ou mais colunas;
- **Radier** – Elemento de fundação que recebe todos ou quase todos os pilares da estrutura, recebendo e distribuindo, no mínimo, 70% das cargas da edificação.

A Figura 2.5 ilustra os exemplos de fundações superficiais apresentados.

Figura 2.5 – Exemplos de fundações superficiais.



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2016)

2.2.2 FUNDAÇÕES PROFUNDAS

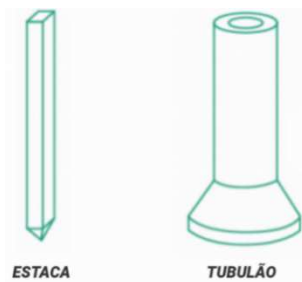
Assim como as superficiais, são elementos de transferência de carga da superestrutura para o maciço de solo, mas de forma que as pressões são distribuídas pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação dos dois métodos, de modo que sua base esteja assentada a uma profundidade de oito vezes a sua menor dimensão

em planta e, no mínimo, 3,0 metros (ABNT, 2019). Dentre os tipos de fundações profundas, pode-se citar:

- **Estaca** – Elemento de fundação que é executado inteiramente com o auxílio de equipamentos ou ferramentas, sem que haja trabalho manual em profundidade. Pode ser constituída de madeira, aço, concreto pré-moldado, concreto moldado in loco, argamassa, calda de cimento ou a combinação de qualquer um dos materiais anteriores. Sua execução pode se dar por cravação, escavação ou mista;
- **Tubulão** – Elemento de fundação de forma cilíndrica em que se faz necessário o trabalho manual em profundidade, seja para o alargamento da base ou para a limpeza do fundo, visto que suas cargas são resistidas, em sua grande maioria, pela ponta.

A Figura 2.6 ilustra os exemplos de fundações profundas apresentados.

Figura 2.6 – Exemplos de fundações profundas.



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2016)

2.2.3 RECALQUES

Com a deformabilidade do solo e a contínua aplicação de cargas provenientes da superestrutura, o elemento de fundação pode ser submetido a movimentações de diferentes gêneros. Tais movimentações devem ser previstas, pois podem resultar em danos à estrutura, e, dependendo da intensidade, até mesmo o colapso. Burland e Wroth (1974, apud GUSMÃO, 1990) definem:

- **Recalque absoluto (W)** – Deslocamento vertical descendente de um elemento isolado da fundação. Quando o deslocamento é para cima, ele é chamado de levantamento;
- **Recalque diferencial (δ_w)** – É a diferença entre os recalques absolutos de dois elementos de fundação;

- **Rotação (θ)** – É a variação da inclinação da reta que une dois pontos da fundação ou do terreno;
- **Rotação relativa (β)** – Também conhecida como distorção angular, é a rotação de uma reta que une dois pontos diferentes de uma edificação, sendo descontada a inclinação da mesma. Quando a inclinação é nula, o valor coincide com o da rotação (θ);
- **Deflexão relativa (Δ)** – Representa o deslocamento máximo em relação à reta que une dois pontos de referência afastados, geralmente os extremos da edificação. Se a concavidade for para cima, a deflexão relativa será positiva, caso contrário, negativa;
- **Razão de deflexão (Δ/L)** – É a razão entre a deflexão relativa (Δ) e a distância (L) entre dois pontos de referência, mantendo a mesma convenção de sinais do item anterior.

2.3 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

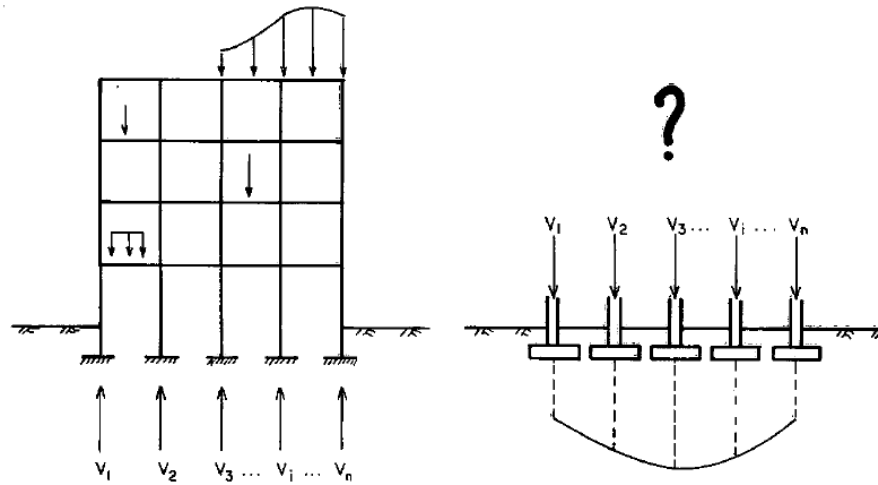
2.3.1 INTRODUÇÃO

Um sistema estrutural é comumente dividido em três partes: superestrutura, infraestrutura e maciço de solo. A primeira, corresponde às vigas, pilares e lajes do edifício, ou seja, o conjunto notável pelo usuário final. Já a infraestrutura, ou fundação, é composta por todos os elementos responsáveis pela transferência de cargas da superestrutura para o maciço de solo, maciço o qual dissipará as cargas propostas, garantindo a estabilidade, funcionalidade e os conceitos estéticos propostos (GUSMÃO, 1990).

Apesar do desempenho da edificação ser assegurado pela união dessas três partes, tal interação é pouco considerada no ato de elaboração dos projetos de engenharia, visto que a concepção demanda conceitos específicos das áreas estrutural (superestrutura) e geotécnica (infraestrutura e maciço de solo), resultando assim, na divisão destas disciplinas (ANTONIAZZI, 2011).

Com a análise isolada das partes, cada profissional toma para si um plano de referência distinto (Figura 2.7), ou seja, para o engenheiro de estruturas, sua origem de projeto se dá de baixo para cima, enquanto que para o geotécnico, sua percepção será contrária. Para Iwamoto (2000), ambas as concepções são equivocadas, visto que nenhum dos pontos de referência são, de fato, indeslocáveis, pois o maciço de solo é deformável.

Figura 2.7 – Planos de referência nos projetos de superestrutura e infraestrutura.



Fonte: Gusmão (1990).

Com a consideração da hipótese de apoios indeslocáveis, o real comportamento da edificação é menosprezado, visto que a deformabilidade do solo pode acarretar em recalques na estrutura, e na consequente reorganização de esforços da mesma. Com a alteração deste fluxo de cargas, patologias não previstas podem surgir, como por exemplo, fissuras em vigas e lajes, e até mesmo, em casos mais severos, o esmagamento de pilares (ANTONIAZZI, 2011).

Desta forma, a interação solo-estrutura (ISE) nada mais é do que a análise conjunta dos sistemas estrutural e geotécnico, buscando a aproximação ao real comportamento da estrutura, podendo trazer mais confiabilidade ao projeto e maior viabilidade orçamentária à obra.

2.3.2 FATORES DE INFLUÊNCIA À INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Dentre os diversos fatores que podem ter influência no mecanismo da interação solo-estrutura, podemos citar os principais: a rigidez relativa da estrutura, o número de pavimentos e o processo construtivo.

2.3.2.1 RIGIDEZ RELATIVA ESTRUTURA-SOLO

Com a amarração dos elementos estruturais e a restrição dos movimentos nos apoios, é conferida à estrutura considerável rigidez e uma consequente redistribuição de esforços, promovendo recalques diferenciais mais amenos e deformadas mais suaves.

Lopes e Gusmão (1991), ao analisarem o comportamento de um pórtico modelado como edifício em concreto armado sobre apoio em meio elástico, propuseram o cálculo do parâmetro

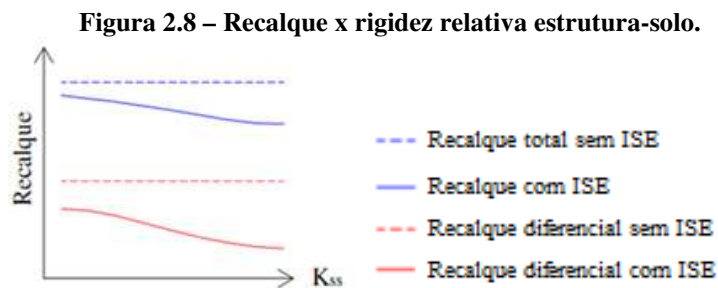
“rigidez relativa estrutura-solo” (K_{SS}), conforme Equação 2.1, de modo a analisar a variação da ordem de grandeza dos recalques.

$$K_{SS} = \frac{E_C * I_b}{E * l^4} \quad (2.1)$$

Onde:

- E_C representa o módulo de elasticidade do material da estrutura;
- E simboliza o módulo de elasticidade do solo;
- I_b equivale ao momento de inércia da viga típica;
- l constitui o comprimento do vão entre pilares.

Sendo esta rigidez relativa uma relação entre a rigidez do solo e a rigidez da superestrutura, Lopes e Gusmão (1991), confirmando os estudos de Meyerhof (1953), concluíram que o aumento da rigidez relativa estrutura-solo acarreta na diminuição dos valores de recalques, sendo observado redução maior nos recalques diferenciais. A Figura 2.8 ilustra este comportamento:



Fonte: Lopes e Gusmão (1991).

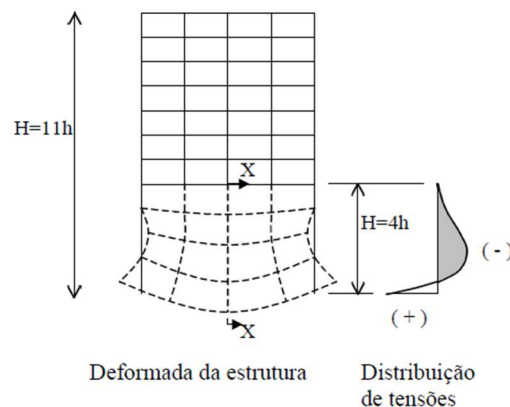
2.3.2.2 NÚMERO DE PAVIMENTOS

Ainda no trabalho de Lopes e Gusmão (1991), fixando o valor de K_{SS} (rigidez relativa estrutura-solo) e variando o número de pavimentos, observou-se a diminuição dos recalques diferenciais conforme o crescimento vertical do edifício.

Além da diminuição dos recalques diferenciais, com o aumento progressivo no número de pavimentos, observa-se em conjunto, um acréscimo na rigidez da estrutura do edifício (ANTONIAZZI, 2011). Porém, Goshy (1978, apud GONÇALVES, 2004), utilizando a

analogia de vigas-parede, pontuou que este comportamento não é linear, tendo maior influência nos primeiros pavimentos do modelo (Figura 2.9), e que uma vez atingido o limite de contribuição, devido ao mecanismo de interação solo-estrutura, os recalques, a partir deste ponto, tornam-se dependentes apenas do carregamento (GUSMÃO E GUSMÃO FILHO, 1994).

Figura 2.9 – Analogia da viga-parede.



Fonte: Goshy (1978, apud GONÇALVES, 2004).

2.3.2.3 PROCESSO CONSTRUTIVO

Quando se estuda o mecanismo de interação solo-estrutura, é comum adotar a simplificação de que todo o carregamento atuante se dá com o término da execução, desconsiderando o processo construtivo. Porém, como mencionado nos Tópicos 2.3.2.1 e 2.3.2.2, a rigidez da estrutura sofre influência do aumento gradativo de pavimentos. Logo, a aplicação de cargas na estrutura de forma gradativa, conforme sua execução prática, traz ao estudo maior aproximação à realidade.

Ao monitorarem a construção de prédios localizados na cidade de Recife, Pernambuco, Gusmão e Gusmão Filho (1994) notaram o aumento de recalques conforme o carregamento nos pilares era acrescido. Observaram também, conforme o progresso da obra, uma tendência de uniformização dos recalques, bem como de redistribuição de cargas.

Fonte et al. (1994) comparou, para um edifício de catorze andares sobre fundações de tipo sapatas, e com previsões de modelos numéricos, resultados de recalques com e sem consideração de interação solo-estrutura, bem como os efeitos do processo construtivo. Os resultados mostraram que, no modelo que não considera a ISE, superestima-se a previsão dos recalques diferenciais, visto que a rigidez da estrutura é desconsiderada. Já no modelo que considera a ISE, mas não o processo construtivo, aplicando o carregamento instantâneo na

estrutura completa, a previsão de recalques foi subestimada, visto que o modelo induziu maior rigidez à estrutura do que na realidade do processo gradativo. Logo, o modelo numérico que mais se aproximou dos dados medidos em campo, fora o que considerou a interação solo-estrutura e o carregamento gradativo do edifício.

2.3.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DA ISE

Apesar de complexas, as análises que consideram a interação solo-estrutura exercem bastante influência na determinação da redistribuição de esforços, sendo imprescindíveis para o cálculo estrutural (BAHIA, 2015). A seguir, serão apresentados alguns métodos para consideração da ISE na análise estrutural.

2.3.3.1 MONITORAMENTO DE RECALQUES

Gonçalves (2004) afirma que a medição de recalques ao longo do carregamento da obra traz uma das maiores contribuições às análises de interação solo-estrutura, visto que as medições representam a situação real do sistema.

Em sua pesquisa, Gusmão (1990) realizou o monitoramento de recalques durante a execução de sete edifícios distintos. Como resultado, foi constatado a redistribuição dos esforços na estrutura (principalmente nos pilares), a uniformização dos recalques e a redução de recalques diferenciais.

2.3.3.2 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

Através da modelagem integrada do solo e da estrutura, os modelos tridimensionais consideram o comportamento das edificações de maneira mais realista, permitindo definir, de forma mais eficiente, a deformabilidade do solo e seus efeitos na estrutura (SANTOS, 2021).

Em sua pesquisa, Medeiros (2006) desenvolveu um programa computacional para análise tridimensional da interação solo-estrutura. O autor constatou, porém, grandes limitações para o desenvolvimento deste tipo de análise, como por exemplo, o esforço computacional. Devido à alta demanda do sistema de processamento, e a limitada capacidade operacional dos sistemas computacionais da época (2006), algumas simulações levaram em torno de nove dias para finalização.

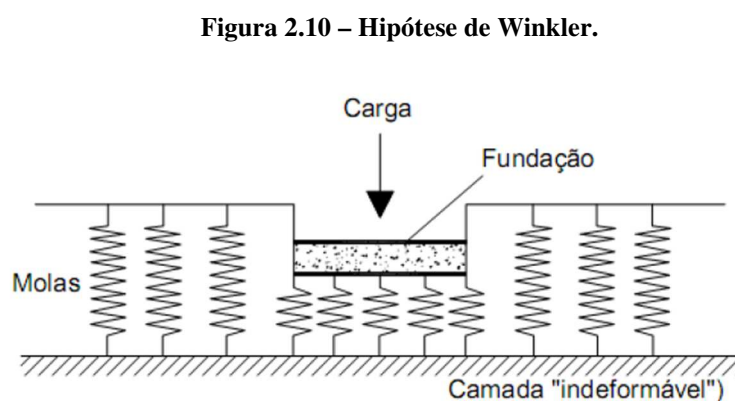
2.3.3.3 MODELO DE WINKLER

Para reproduzir o efeito de deslocabilidade do solo, Winkler (1867) representou o solo como um sistema de molas lineares e independentes entre si. Neste modelo, as pressões de contato são proporcionais aos deslocamentos, podendo ser utilizado tanto em carregamentos verticais, quanto forças horizontais, proporcionando assim, sua aplicabilidade por diversos elementos de fundação (ANTONIAZZI, 2011).

O ponto principal da utilização do Modelo de Winkler se dá na determinação das rigidezes das molas elásticas para substituir o solo, visto que o coeficiente de reação vertical não depende apenas do solo, mas também da área carregada e da direção de deslocamento considerada (ANTONIAZZI, 2011; CHRISTAN, 2012).

Apesar da simplicidade de utilização, nota-se algumas limitações ao emprego desta hipótese, como por exemplo, a desconSIDERAÇÃO da continuidade do meio, sendo observado o deslocamento apenas nos locais de aplicação de carga, tornando-se pouco representativa em situações de grupos de estacas ou em áreas com edificações vizinhas (BAHIA, 2015).

A Figura 2.10 ilustra o modelo, com o devido sistema de molas e a deformação no local de aplicação da carga.



Fonte: Antoniazzi (2011).

2.3.3.4 TEORIA DE MINDLIN

Baseada na teoria da elasticidade, a teoria de Mindlin (1936) considerou o solo como um meio semi-infinito e contínuo, o qual, a partir de certa distância do ponto de aplicação da carga, não sofre, de forma significativa, com os efeitos de deformação (SANTOS, 2021).

A solução fundamental desta teoria é apresentada em equações relativas a deslocamento e força, considerando uma carga unitária aplicada no interior de um meio semi-infinito, homogêneo, elástico, linear e isotrópico, tendo como resultado o deslocamento vertical em um ponto (ANTONIAZZI, 2011).

Antoniazzi (2011) ressaltou que a aplicabilidade desta teoria é limitada, visto que a estratificação do solo e a presença de uma superfície indeslocável, a determinada profundidade, não são consideradas, e que a consideração de espaço semi-infinito deformável conduz a valores exagerados para os recalques.

2.3.3.5 ARTIFÍCIO DE STEINBRENNER

Para solos com estratigrafias e espessuras finitas, uma das alternativas é a utilização do artifício de Steinbrenner (1934). De acordo com o autor, pode-se calcular o encurtamento de uma camada de solo a partir de (Equação 2.2):

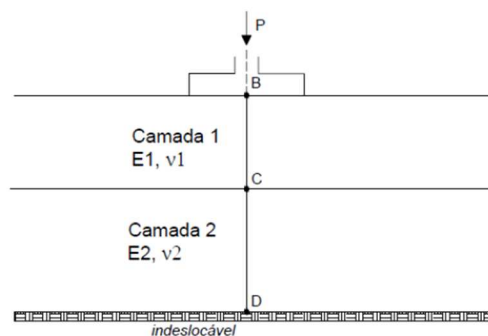
$$W = \delta_1 - \delta_2 \quad (2.2)$$

Onde:

- W caracteriza o encurtamento de uma camada de solo;
- δ_1 representa o recalque da cota inicial da camada, considerando-a como se fosse semi-infinita;
- δ_2 indica o recalque da cota final da camada, considerando-a como se fosse semi-infinita.

Em solos com mais de uma camada, o recalque total se dá pela soma dos encurtamentos de todas as camadas. Antoniazzi (2011) exemplifica o artifício de Steinbrenner para o cálculo com duas camadas, conforme ilustrado pela Figura 2.11 e apresentado pela Equação 2.3:

Figura 2.11 – Artifício de Steinbrenner.



Fonte: Antoniazzi (2011).

$$\delta = W_1 + W_2 = (\delta_{B1} - \delta_{C1}) + (\delta_{C2} - \delta_{D2}) \quad (2.3)$$

Onde:

- δ representa o recalque total do maciço;
- W_1 caracteriza o encurtamento da primeira camada de solo;
- W_2 indica o encurtamento da segunda camada de solo;
- δ_{B1} compõe o recalque em B, considerando todo o maciço como camada 1 semi-infinita;
- δ_{C1} caracteriza o recalque em C, considerando todo o maciço como camada 1 semi-infinita;
- δ_{C2} indica o recalque em C, considerando todo o maciço como camada 2 semi-infinita;
- δ_{D2} compõe o recalque em D, considerando todo o maciço como camada 2 semi-infinita.

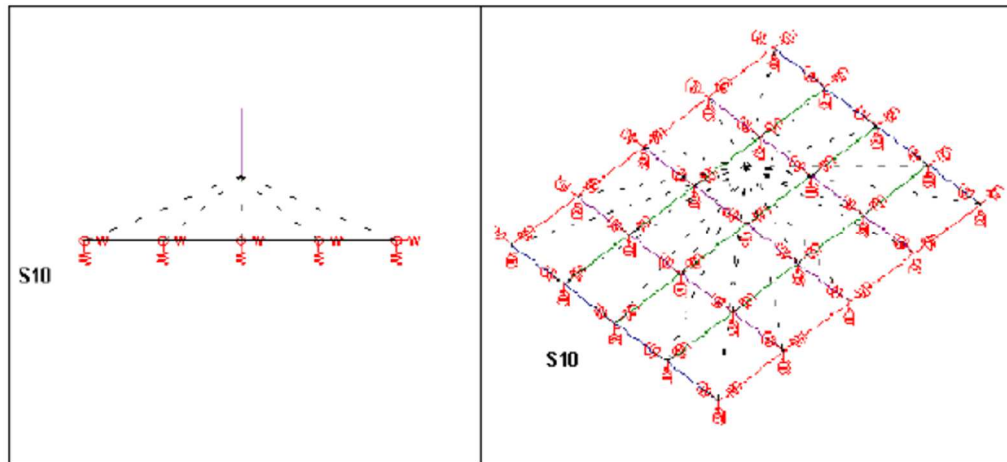
2.3.3.6 MÉTODOS ITERATIVOS

Os métodos mais utilizados em pesquisas acadêmicas e no dia-a-dia dos escritórios de projeto são baseados em processos iterativos (ANTONIAZZI, 2011). Chamecki (1954) foi um dos primeiros a apresentar este tipo de metodologia: através do cálculo inicial da estrutura, considerando apoios indeslocáveis, obtém-se as estimativas de recalques em que o modelo estaria sujeito. A partir destes recalques, aplica-se os mesmos à estrutura, como deslocamentos prescritos, e recalcula-se. Ao recalcular o edifício, novos valores de recalques são obtidos, reiniciando o ciclo iterativo, o qual se repete até uma convergência significativa dos dados.

Diversas adaptações foram feitas no modelo proposto por Chamecki (1954). Aoki e Cintra (2004) propuseram a aplicação de coeficientes de mola para cada elemento de fundação, através das relações entre cargas e recalques, provenientes do primeiro cálculo da estrutura, substituindo assim, os apoios fixos e recalculando o modelo para a nova condição.

De forma semelhante à adaptação do método de Aoki e Cintra (2004), o módulo SISEs (Sistema de Interação Solo Estrutura) da empresa que desenvolve o software comercial TQS, o qual foi utilizado nesta pesquisa, emprega um conjunto de molas translacionais em cada nó da estrutura de fundação discretizada, com a diferença da integração com o modelo estrutural da superestrutura. A Figura 2.12 exemplifica a consideração do módulo SISEs em fundações superficiais.

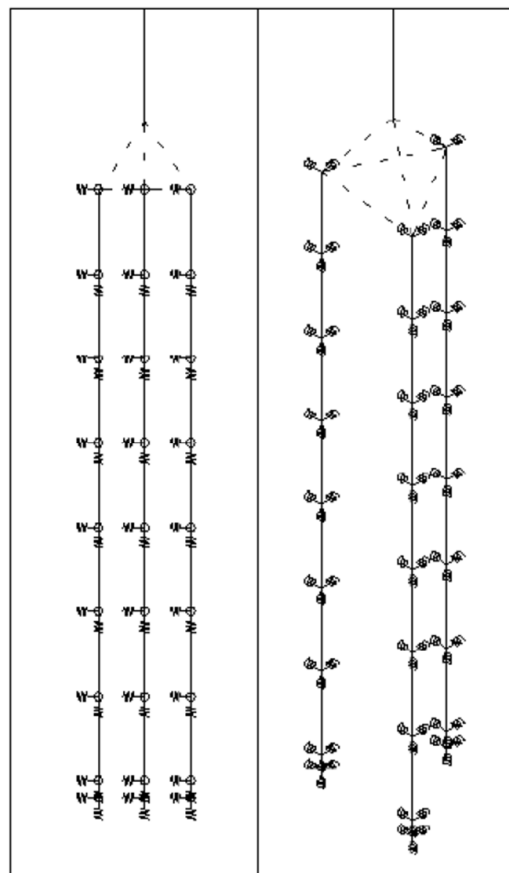
Figura 2.12 – Discretização dos elementos de fundação conforme o módulo SISEs da TQS Informática



Fonte: Antoniazzi (2011).

Já a Figura 2.13 ilustra a consideração utilizada pelo mesmo software para o caso de fundações com estacas e bloco de coroamento, com a aplicação de molas por todo o comprimento da estrutura em contato com o solo.

Figura 2.13 – Discretização de fundações tipo estaca conforme o módulo SISEs da TQS Informática



Fonte: Antoniazzi (2011).

2.4 ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFÍCIOS

2.4.1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e a construção de edifícios cada vez mais altos e esbeltos, foi impulsionada a necessidade de verificações estruturais mais refinadas, visto a maior influência de esforços, como por exemplo, a ação dos ventos, em obras de tamanha magnitude (DINIZ, 2017).

A análise de estabilidade global é um processo que, através do estudo do comportamento da estrutura (tensões, deslocamentos, deformações, redistribuição de esforços), visa a garantia da segurança da obra como um todo, ou de uma parte isolada dela (RODRIGUES, 2019).

Como os conceitos de estabilidade e instabilidade são indissociáveis, a compreensão da primeira se dará pelo estudo da segunda. Portanto, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), as estruturas de concreto podem ser suscetíveis a três tipos de instabilidade, a saber:

- Perda de estabilidade por bifurcação do equilíbrio (flambagem) nas estruturas sem imperfeições geométricas iniciais;
- Perda de estabilidade sem bifurcação do equilíbrio por passagem brusca de uma configuração para outra reversa da anterior (ponto limite com reversão), em estruturas abatidas;
- Perda de estabilidade por acréscimo na intensidade do carregamento, em estruturas de material de comportamento não-linear, e com imperfeições geométricas iniciais, de forma que o aumento na capacidade resistente da estrutura seja desproporcional à solicitação.

Para Diniz (2017), a análise da estabilidade pode se tornar complexa em virtude da consideração das não-linearidades existentes nas estruturas de concreto: a não-linearidade geométrica e a não-linearidade física. A primeira consiste em considerar nas análises o equilíbrio da estrutura em sua configuração deformada, enquanto que a segunda é definida pelo comportamento dos seus materiais componentes.

2.4.2 NÃO LINEARIDADE FÍSICA E NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA

Uma análise estrutural é considerada não-linear quando a resposta da estrutura perante seu comportamento (seja ele em relação aos deslocamentos, tensões ou esforços), possui crescimento não-proporcional à medida que o carregamento é aplicado (KIMURA, 2007).

Para uma análise estrutural mais próxima da realidade, deve-se, sempre que possível, considerar as não-linearidades da estrutura, visto que são características inerentes a todas as peças de concreto armado (BUENO, 2009).

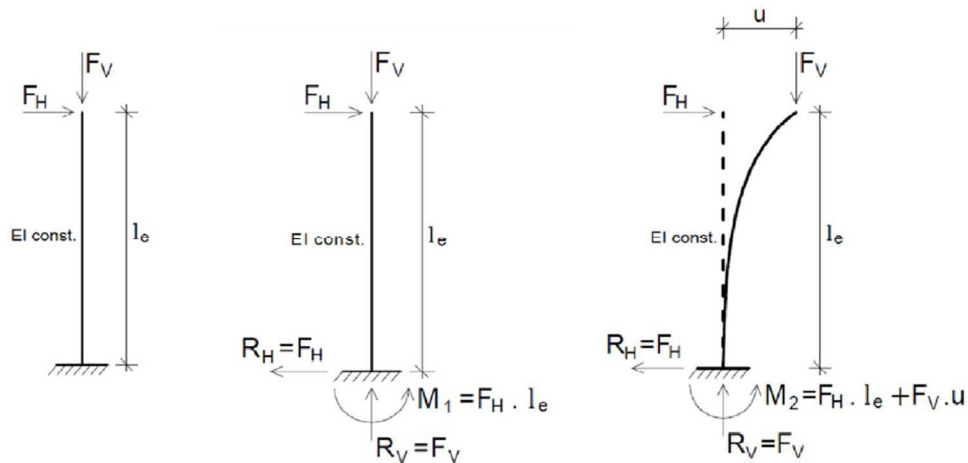
Sendo resultado de dois aspectos observados, a não-linearidade física e a não-linearidade geométrica, pode-se definir como:

- Não-linearidade física: É relacionada às propriedades mecânicas do material, como por exemplo, a perda da proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação resultante (LIMA, 2001). Sendo constituído de materiais de diferentes comportamentos, e estando sujeito à fissuração devido ao acréscimo de solicitações, o concreto apresenta uma curva de tensão-deformação não-linear (DINIZ, 2017). Logo, o módulo de rigidez e a inércia das seções não se mantêm constante para toda a estrutura;
- Não-linearidade geométrica: Está relacionada com a tendência das estruturas a assumirem um novo arranjo geométrico de estabilidade, denominado de condição deformada, após receberem carregamentos (RIBEIRO, 2010). A não-linearidade geométrica pode se tornar necessária em análises estruturais devido ao impacto do estado de deformação no quadro de esforços e ações da estrutura, levando a uma não-proporcionalidade entre causa e efeito (BUENO, 2009).

2.4.3 EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM

Ao receber cargas horizontais e verticais, os nós de uma estrutura podem se deslocar lateralmente, assumindo uma característica geométrica deformada (Figura 2.14). Esta nova condição traz excentricidades nas cargas verticais recebidas pelos pilares, sendo geradas, em consequência, solicitações (momentos) que não atuavam na condição geométrica inicial (RIBEIRO, 2010). A estas novas solicitações, dão-se o nome de efeitos de segunda ordem.

Figura 2.14 – Surgimento dos efeitos de segunda ordem.



Fonte: Diniz (2017).

Desta forma, a NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica as estruturas de edifícios, para efeitos de cálculo, de acordo com os deslocamentos de seus nós:

- Estruturas de nós fixos – Quando os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos, tornando desprezíveis, em decorrência, os esforços de segunda ordem (inferiores a 10% dos valores em relação aos esforços de primeira ordem). Nesta categoria, a adição dos esforços de segunda ordem é dispensável;
- Estrutura de nós móveis – Nessas estruturas, os deslocamentos horizontais não são mínimos, causando assim, esforços de segunda ordem de grande significância (superiores a 10% dos valores em relação aos esforços de primeira ordem). Nesta categoria, a adição dos esforços de segunda ordem deve ser considerada no dimensionamento.

A classificação das estruturas entre nós fixos ou móveis se dará, em suma, para a consideração ou não dos efeitos de segunda ordem globais na análise estrutural, visando maior estabilidade das edificações (RODRIGUES, 2019).

2.4.4 PARÂMETROS DE VERIFICAÇÃO DE ESTABILIDADE

É possível encontrar, na NBR 6118 (ABNT, 2014), dois processos aproximados para verificação da necessidade de consideração dos efeitos de segunda ordem globais em estruturas, indicando, sem a necessidade de um cálculo rigoroso, se a estrutura deve ser classificada como sendo de nós fixos ou nós móveis: o parâmetro de instabilidade α e o coeficiente γ_z .

2.4.4.1 PARÂMETRO DE ESTABILIDADE α

Um dos parâmetros apresentados pela NBR 6118 (ABNT, 2014), o parâmetro de instabilidade α se dá pela Equação 2.4:

$$\alpha = H_{tot} \sqrt{N_k / (E_{cs} I_c)} \quad (2.4)$$

Onde:

- H_{tot} representa a altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;
- N_k indica a somatória de todas as cargas verticais atuantes na estrutura (a partir do nível considerado para o cálculo de H_{tot}), com seu valor característico;
- $E_{cs} I_c$ compõe o somatório dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada. No caso de estruturas de pórticos, de treliças ou mistas, ou com pilares de rigidez variável ao longo da altura, pode ser considerado o valor da expressão $E_{cs} I_c$ de um pilar equivalente de seção constante.

Dessa forma, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), e conforme as Equações 2.5 e 2.6, uma estrutura usual pode ser classificada como de nós fixos se o seu parâmetro de instabilidade α for inferior que:

$$\alpha = 0,2 + 0,1n \text{ se } n \leq 3 \quad (2.5)$$

$$\alpha = 0,6 \text{ se } n \geq 4 \quad (2.6)$$

Onde n é o número de pavimentos.

A Norma ainda prevê, para estruturas de outras configurações, os seguintes limites:

- $\alpha = 0,7$ no caso de contraventamento exclusivo de pilares-parede
- $\alpha = 0,5$ no caso de contraventamento exclusivo por pórticos

Desta forma, a Norma prevê apenas três valores genéricos como limites do parâmetro α (0,5, 0,6 ou 0,7), não contemplando combinações de contribuições de diferentes tipos de contraventamento para com a rigidez total do edifício (RIBEIRO, 2010). Além disso, o parâmetro α apenas indica a sensibilidade da estrutura perante os efeitos de segunda ordem, não estimando os valores destes esforços.

2.4.4.2 COEFICIENTE γ_z

Um dos coeficientes mais utilizados no Brasil para análises de estabilidade e segunda ordem, o coeficiente γ_z , além de classificar a estrutura de acordo com a necessidade de consideração dos efeitos de segunda ordem, também os quantifica (DINIZ, 2017). Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), o coeficiente é calculado pela Equação 2.7:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (2.7)$$

Onde:

- $M_{1,tot,d}$ representa o momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura;
- $\Delta M_{tot,d}$ indica a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem.

Desta forma, a NBR 6118 (ABNT, 2014) conclui que a estrutura é considerada de nós fixos se for obedecida a condição: $\gamma_z \leq 1,1$. A Norma também acrescenta:

Uma solução aproximada para a determinação dos esforços globais de 2ª ordem consiste na avaliação dos esforços finais (1ª ordem + 2ª ordem) a partir da majoração adicional dos esforços horizontais da combinação de carregamento considerada por $0,95\gamma_z$. Esse processo só é válido para $\gamma_z \leq 1,3$ (ABNT, 2014, p.106).

Bueno (2009) ressalta que a utilização do γ_z se dá dentro do regime elástico, só podendo ser utilizado em edifícios regulares com, no mínimo, quatro pavimentos.

2.5 ESTADO DA ARTE

Jordão (2003), em sua pesquisa, calculou a superestrutura e os índices de estabilidade global de dois edifícios em concreto armado, apoiados sobre estacas, considerando, inicialmente, apoios indeslocáveis. Após a primeira análise, inseriu os valores de reações de apoio obtidos, bem como o deslocamento dos blocos dos pilares, recalculando a estrutura, dando início a um processo iterativo. Ao alcançar a convergência dos valores de reações, a autora verificou a tendência de uniformização dos esforços e deslocamentos horizontais, frutos da redistribuição de esforços provenientes da interação solo-estrutura.

Marques, Feitosa e Alves (2017) realizaram, para um mesmo projeto, quatro modelos de análise estrutural, avaliando e comparando os impactos da interação solo-estrutura e dos efeitos construtivos no dimensionamento de um edifício de múltiplos pavimentos, com o auxílio do sistema CAD/TQS. Verificaram então que a consideração da ISE gerou impactos na ordem de 4,04% a mais em relação aos valores do parâmetro γ_z da edificação. Concluíram então que a aplicação da interação solo-estrutura busca a otimização da modelagem, aproveitando ao máximo as características da estrutura.

Marques (2018), em sua nova pesquisa, realizou quatro modelos de análise para dois edifícios de múltiplos pavimentos, um simétrico e outro assimétrico, também avaliando e comparando os impactos da interação solo-estrutura e dos efeitos construtivos na estabilidade global dos prédios. Como resultados, ao considerar os dois parâmetros, obteve grande variação na estabilidade e deslocamento (valores de γ_z acima do permitido por norma em todos os modelos de cálculo que levava em consideração a interação solo-estrutura), maior quantidade de aço (com variações de até 22,13% nas fundações) e uma redistribuição intermediária de cargas.

Alves e Feitosa (2020) analisaram, para duas arquiteturas diferentes (porém semelhantes, sendo a diferença a razão entre a altura total da edificação e a dimensão do edifício em planta), os impactos da não linearidade física dos elementos, da rigidez transversal das lajes e da discretização das regiões de encontro entre laje e pilar, obtendo valores reduzidos para γ_z e α . Em relação à consideração da interação solo-estrutura, verificaram maior flexibilidade na estrutura, acarretando em valores maiores para o parâmetro γ_z , de tal forma que se faz necessário um superdimensionamento da superestrutura ou até mesmo uma mudança geral no lançamento inicialmente proposto.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados os modelos estruturais utilizados para a análise, bem como as metodologias utilizadas durante o processo.

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente trabalho consiste na análise do impacto da consideração da interação solo-estrutura na estabilidade global de um edifício de concreto armado de múltiplos pavimentos. Para isso, foram considerados 07 modelos diferentes, hipotéticos, de mesma superestrutura, variando apenas as concepções da fundação e do maciço de solo.

A primeira linha de análise se refere ao modelo que apresenta a consideração de apoios indeslocáveis, o modelo 01. Portanto, não foram vinculados elementos de fundação e laudos de sondagem.

A segunda linha de análise tem como base dois perfis geotécnicos de composição arenosa, tendo como variáveis os índices de SPT. Para os elementos de fundação, foram analisados blocos sobre estacas pré-moldadas. Tais estacas possuem seção quadrada, com lado de 30cm e comprimento de 15 metros.

Por fim, a terceira linha de análise tem como base quatro perfis de solo de diferentes composições: argilo-siltoso, argilo-arenoso, areia-siltosa e areia-argilosa. Os elementos de fundação foram os mesmos da segunda linha: blocos sobre estacas pré-moldadas.

A Tabela 3.1 sintetiza as variações abordadas.

Tabela 3.1 – Identificação dos modelos estruturais.

Indeslocável	Varição de SPT	Varição de solo	
Modelo 01	Areia 01	Argilo-arenoso	Argilo-siltoso
	Modelo 02	Modelo 04	Modelo 05
	Areia 02	Areia-argilosa	Areia-siltosa
	Modelo 03	Modelo 06	Modelo 07

Fonte: Acervo do autor (2022).

3.2 APRESENTAÇÃO DA SUPERESTRUTURA

A pesquisa teve como base, um edifício de concreto armado de múltiplos pavimentos. Trata-se de uma superestrutura real, de um condomínio vertical localizado em um bairro residencial na cidade de Jataí – GO. A Figura 3.1 apresenta a fachada do prédio já executado.

Figura 3.1 – Fachada do edifício.



Fonte: Acervo do autor (2022).

O prédio é composto pelo pavimento térreo, um mezanino, treze pavimentos tipo, cobertura e volume da caixa d'água. Não foram considerados na pesquisa, os ambientes de entorno da torre, tais como garagens, quiosques e escaninhos. A Tabela 3.2 descreve os pavimentos abordados.

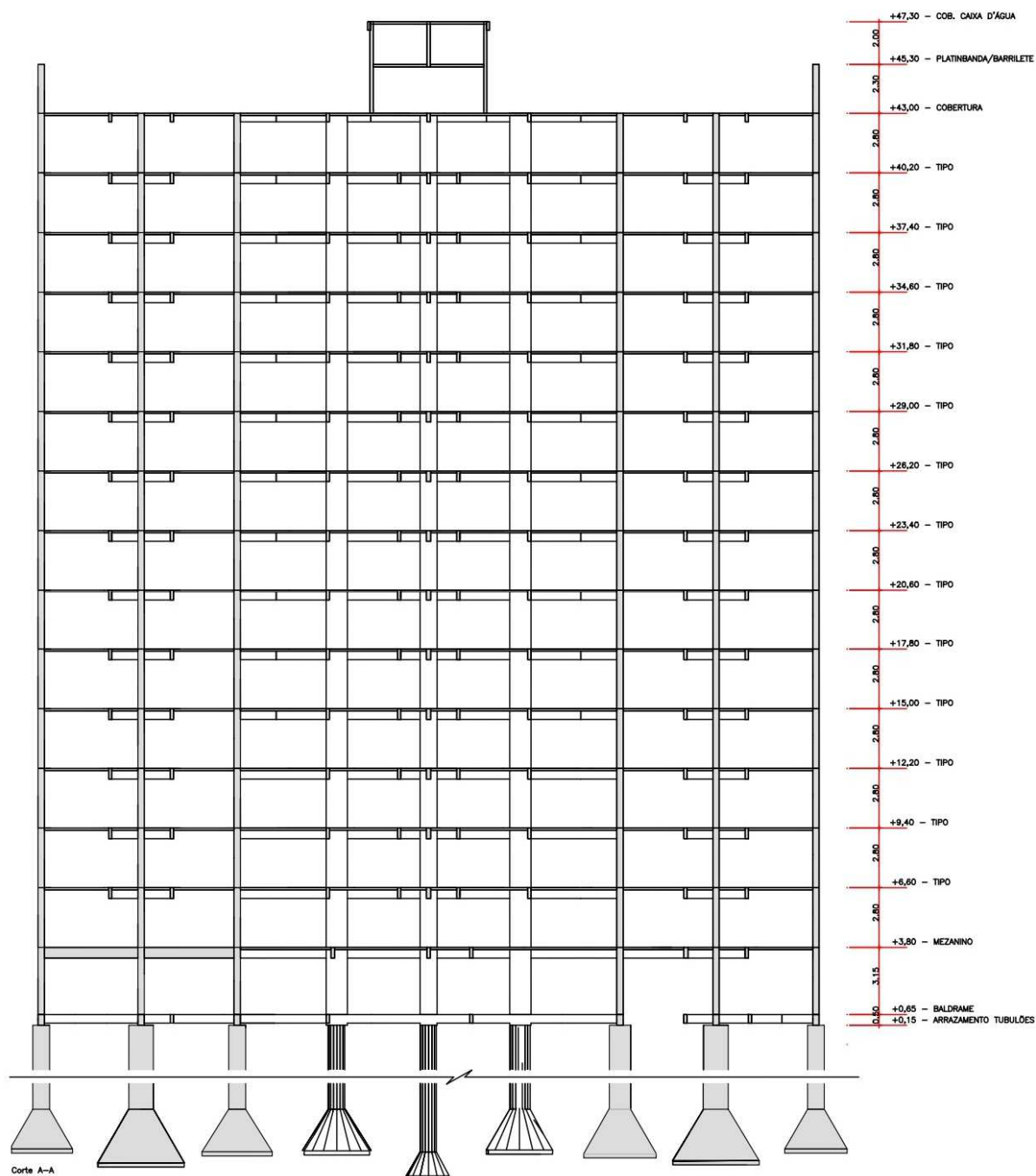
Tabela 3.2 – Identificação dos pavimentos da estrutura.

Pavimento	Piso	Cota (m)	Altura piso a piso (m)	Área construída (m ²)
Cobertura caixa d'água	17	45,30	2,00	53,28
Cobertura	16	43,00	2,30	-
Tipo 13	15	40,20	2,80	360,81
Tipo 12	14	37,40	2,80	360,81
Tipo 11	13	34,60	2,80	360,81
Tipo 10	12	31,80	2,80	360,81
Tipo 09	11	29,00	2,80	360,81
Tipo 08	10	26,20	2,80	360,81
Tipo 07	9	23,40	2,80	360,81
Tipo 06	8	20,60	2,80	360,81
Tipo 05	7	17,80	2,80	360,81
Tipo 04	6	15,00	2,80	360,81
Tipo 03	5	12,20	2,80	360,81
Tipo 02	4	9,40	2,80	360,81
Tipo 01	3	6,60	2,80	360,81
Mezanino	2	3,80	2,80	336,32
Pavimento térreo	1	0,65	3,15	438,41
Fundação	0	0,00	0,65	-
Total				5518,54m²

Fonte: Acervo do autor (2022).

A Figura 3.2 apresenta um corte esquemático do modelo, ilustrando os pavimentos informados.

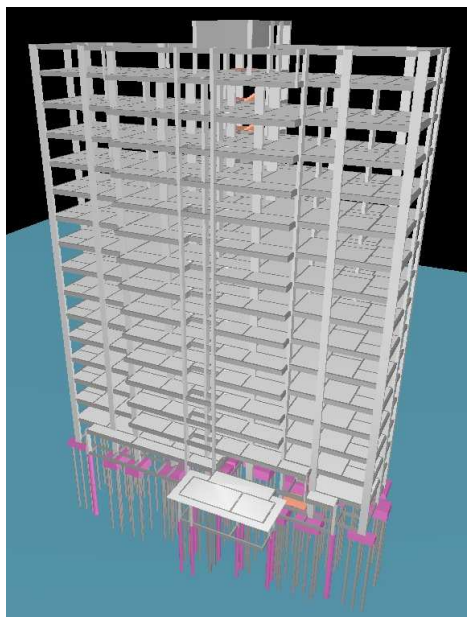
Figura 3.2 – Corte esquemático da estrutura.



Fonte: Acervo do autor (2022).

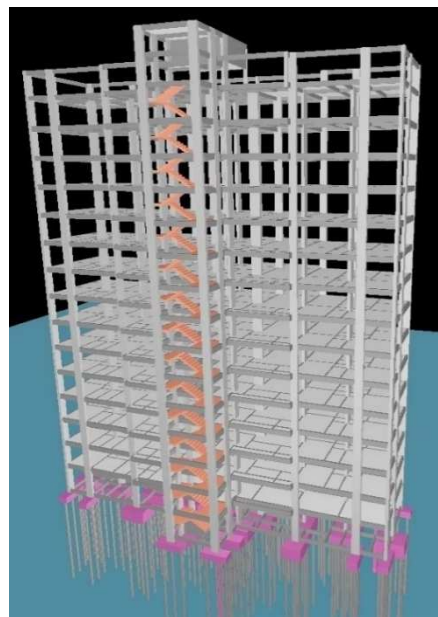
As plantas de formas dos pavimentos do edifício, bem como a numeração dos elementos estruturais, se encontram nos Anexos 01, 02, 03, 04 e 05. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam, respectivamente, as perspectivas frontal e posterior do edifício.

Figura 3.3 – Perspectiva frontal do edifício.



Fonte: Acervo do autor (2022).

Figura 3.4 – Perspectiva posterior do edifício.

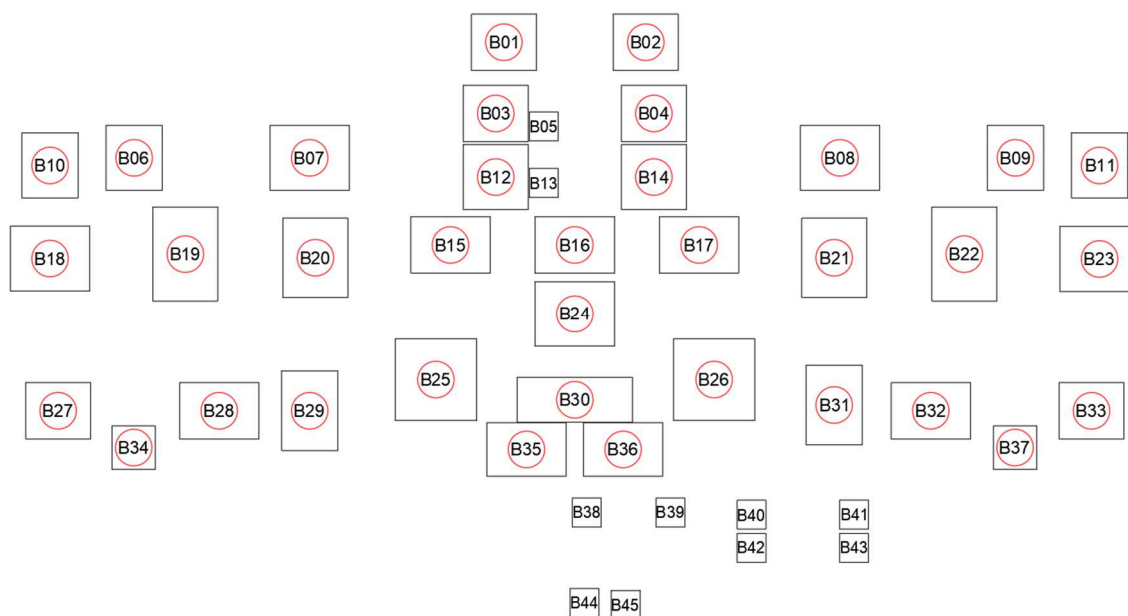


Fonte: Acervo do autor (2022).

3.3 INFRAESTRUTURA

A infraestrutura, conforme apresentado na Figura 3.5, foi composta por 45 blocos de concreto armado, calculados com F_{ck} (resistência característica do concreto à compressão) de 30 MPa, apoiados em estacas pré-moldadas quadradas de 30cm de lado, com 15 metros de profundidade. A quantidade de estacas por bloco variou conforme dimensionamento, visto as diferentes solicitações dos pilares vinculados. A Tabela 3.3 indica tais quantidades.

Figura 3.5 – Disposição dos blocos de fundação.



Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 3.3 – Quantitativos de estacas por blocos.

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
05	05	06	06	01	05	07	07	05
B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18
04	04	07	01	07	06	06	06	07
B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27
10	07	07	10	07	07	07	07	05
B28	B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36
06	06	08	06	06	05	01	07	07
B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45
01	01	01	01	01	01	01	01	01

Fonte: Acervo do autor (2022).

Os métodos de cálculo de capacidade de carga e de estimativa de recalques de estacas utilizados na pesquisa foram o de Aoki-Velloso, devido a uma limitação da licença do software utilizado. Os dados referentes aos critérios de cálculo e à capacidade estrutural das estacas são apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7, respectivamente.

Figura 3.6 – Método de cálculo de estacas.

Método de Cálculo

Capacidade resistente estimada ?

☒ Método Aoki & Velloso (1975)
☐ Método Decourt & Quaresma (1978)
☐ Método Antunes & Cabral - SEFE III (1996)
☐ Método Philipponnat (1986)
☐ Método Pedro Paulo Velloso (1981)
☐ Método Alonso (1996)
☐ Método David Cabral (1986)

Recalque vertical estimado

Método Aoki & Lopes (1975)

☒ Considera efeito de grupo ?

Transferência axial de carregamento:

☐ Modelo A ☒ Modelo B ?

Considera deformação elástica da estaca:

☐ Não ☒ Sim

OK Cancelar

Fonte: Acervo do autor (2022).

Figura 3.7 – Capacidade estrutural das estacas pré-moldadas.

Tensões / Cargas / Gama f / Gama s / Gama c

TIPO DE ESTACA		Tens. Nom.	Cap. Carg.	Tens. Lim.	Compress.	ELU fcd	ELU Gamaf	ELU Gamas	ELU Gamac
ESCAVADA	Broca (Circular - Pequeno ø)	10	0	20	10	150	1.4	1.15	1.8
	Circular em geral	40	0	20	10	140	1.4	1.15	1.8
	Circular/Retangular com Lama Betônica	40	0	20	10	200	1.4	1.15	1.9
PRÉ-MOLDADA	Cravada (Circular ou Quadrada)	182	158	50	10	500	1.4	1.15	1.4
	Prensada (Circular ou Quadrada)	60	0	20	10	350	1.4	1.15	1.4
FRANKI	Fuste Apilado	60	0	20	10	200	1.4	1.15	1.5
	Fuste Vibrado	60	0	20	10	200	1.4	1.15	1.5
OUTRAS	STRAUSS	40	0	20	10	150	1.4	1.15	1.8
	HELICE	35	0	20	10	200	1.4	1.15	1.8
	RAÍZ	100	0	20	10	200	1.4	1.15	1.6
	METÁLICA	700	0	0	10	0	1	1	1
	INJETADA	0	0	20	10	0	1.4	1.15	1.6
	NÃO PADRÃO	20	0	20	10	150	1.4	1.15	1.4

ELU Gama c.

OK Cancelar

Fonte: Acervo do autor (2022).

3.4 FERRAMENTAS UTILIZADAS

O estudo foi desenvolvido a partir do auxílio do software TQS®, o qual é destinado à elaboração de projetos estruturais de concreto armado. Com um sistema integrado e completo, a ferramenta TQS® desenvolve todas as etapas de projeto em um único modelo, sendo equiparado pelas normas técnicas brasileiras de estruturas de concreto e fundações.

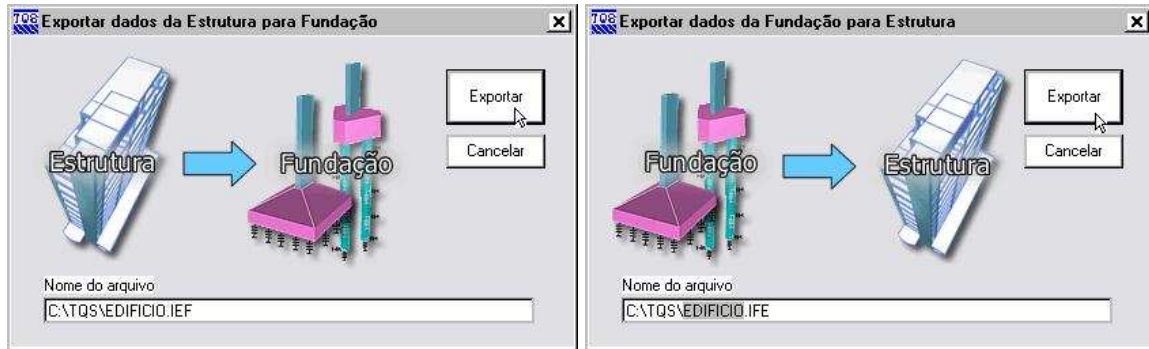
A versão utilizada na análise foi o TQS Pleno, versão 23.2.89, disponibilizada pela própria desenvolvedora do software para a realização desta pesquisa.

A escolha pelo software se deu, sobretudo, pela inclusão do módulo SISEs, ou Sistema de Interação Solo-Estrutura, que, como o próprio nome sugere, visa a análise da interação solo-estrutura. Com a modelagem inicial da superestrutura e a consequente obtenção dos carregamentos nas bases dos pilares, integra-se o modelo com o módulo de fundações.

Com a interoperabilidade das informações, o efeito do solo, que pode ser caracterizado pela inserção de laudos de sondagem SPT, é simulado através da aplicação de vínculos elásticos (coeficientes de reação vertical e horizontal) aos nós da estrutura. Baseados na teoria de Winkler, que trata o comportamento do solo de forma aproximada, elástica e linear, os vínculos podem ter seus valores obtidos.

Após a obtenção dos coeficientes de reação vertical e horizontal, retorna-se as informações para o modelo da superestrutura, o qual é recalculado conforme a flexibilização imposta na fundação. A figura 3.8 ilustra o processo.

Figura 3.8 – Ordem de exportação de dados da estrutura.



Fonte: Acervo do autor (2022).

Além das funcionalidades promovidas pelo módulo SISEs, a escolha pelo software TQS® foi motivada pela eficiência em obter resultados a respeito da estabilidade global, possibilitando também uma eficiente alteração na disposição dos elementos estruturais, no número de pavimentos, no F_{ck} do concreto utilizado, e outras variáveis que contribuem para uma análise mais refinada de projeto, resultando em estruturas mais seguras e semelhantes ao modelo real.

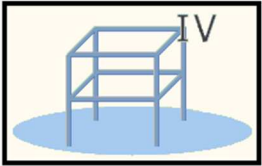
3.5 CRITÉRIOS DE PROJETO

Para o lançamento da estrutura, foi utilizado o modelo de edifício VI que o *software* TQS® disponibiliza, conforme apresentado na Figura 3.9. O edifício foi modelado por um pórtico espacial, composto por elementos que simularão as vigas, pilares e lajes da estrutura. Todos estes elementos foram responsáveis por resistir às ações horizontais e verticais do edifício, e seus critérios para dimensionamento podem ser encontrados na Tabela 3.4.

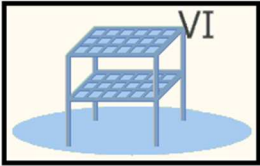
Figura 3.9 – Escolha do modelo estrutural do edifício.

Gerais | Modelo | Pavimentos | Materiais | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento

Modelo estrutural do edifício:



IV



VI

Outros

IV ☐ Modelo de vigas e pilares, flexibilizado conforme critérios. ?
 VI ☒ Modelo de vigas, pilares e lajes, flexibilizado conforme critérios. ?

Modelos independentes

☒ A estrutura se comporta como um corpo único, sem juntas ou torres separadas
☐ Comportamento de corpos separados por espaços ou juntas, sob ação de vento

Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 3.4 – Critérios de dimensionamento de elementos estruturais

Critério	Vigas	Pilares	Lajes	Escadas
Cobrimento (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5 - 3,5
Fck (MPa)	25	25	25	25
Coefficiente de não-linearidade física	0,4	0,8	0,3	-

Fonte: Acervo do autor (2022).

Na Figura 3.10 encontram-se os valores utilizados para a caracterização das cargas de vento, enquanto que na Tabela 3.5, encontram-se as cargas superficiais utilizadas por pavimento do edifício.

Figura 3.10 – Critérios para caracterização das cargas de vento.

V0 - Velocidade básica	35	m/s
S1 - Fator do terreno	1.00	
S2 - Categoria de rugosidade	III	
S2 - Classe da edificação	B	
S3 - Fator estatístico	1.00	

Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 3.5 – Cargas superficiais por pavimento

Pavimento	Carga permanente	Carga adicional
	kN/m ²	kN/m ²
Barrilete	0,50	17,00
Cobertura	1,50	1,00
Tipo	1,00	1,50
Mezanino	1,00	1,50
Térreo	0,00	0,00

Fonte: Acervo do autor (2022).

A alvenaria considerada no cálculo é composta por tijolos furados, com paredes de 2,30 metros de altura, e sobrecarga de 1,8 kN/m², conforme Figura 3.11.

Figura 3.11 – Cargas de alvenarias.

Definição de carregamentos

Caso/Carga

TJVAZ15 H2.3 m

Numéricas Alfanuméricas

Carga distribuída linear

TJVAZ15 0.180/0.000 tf/m2: ALVENARIA DE TIJOLO FURADO C/15cm

Carga distribuída linear:

☐ P/unidade de comprimento

☒ P/unidade de área mais altura de parede

Altura de parede 2.3 m

Zerar C:\TQS\Argila arenosa\TABCAR.DAT

Inserir Apagar Caso 0001- TODAS - Todas permanentes e acidentais dos pavimentos

Esta é a lista de tipos de cargas, que pode ser editada no gerenciador TQS Formas, através do comando "Editar, Tipos de cargas".

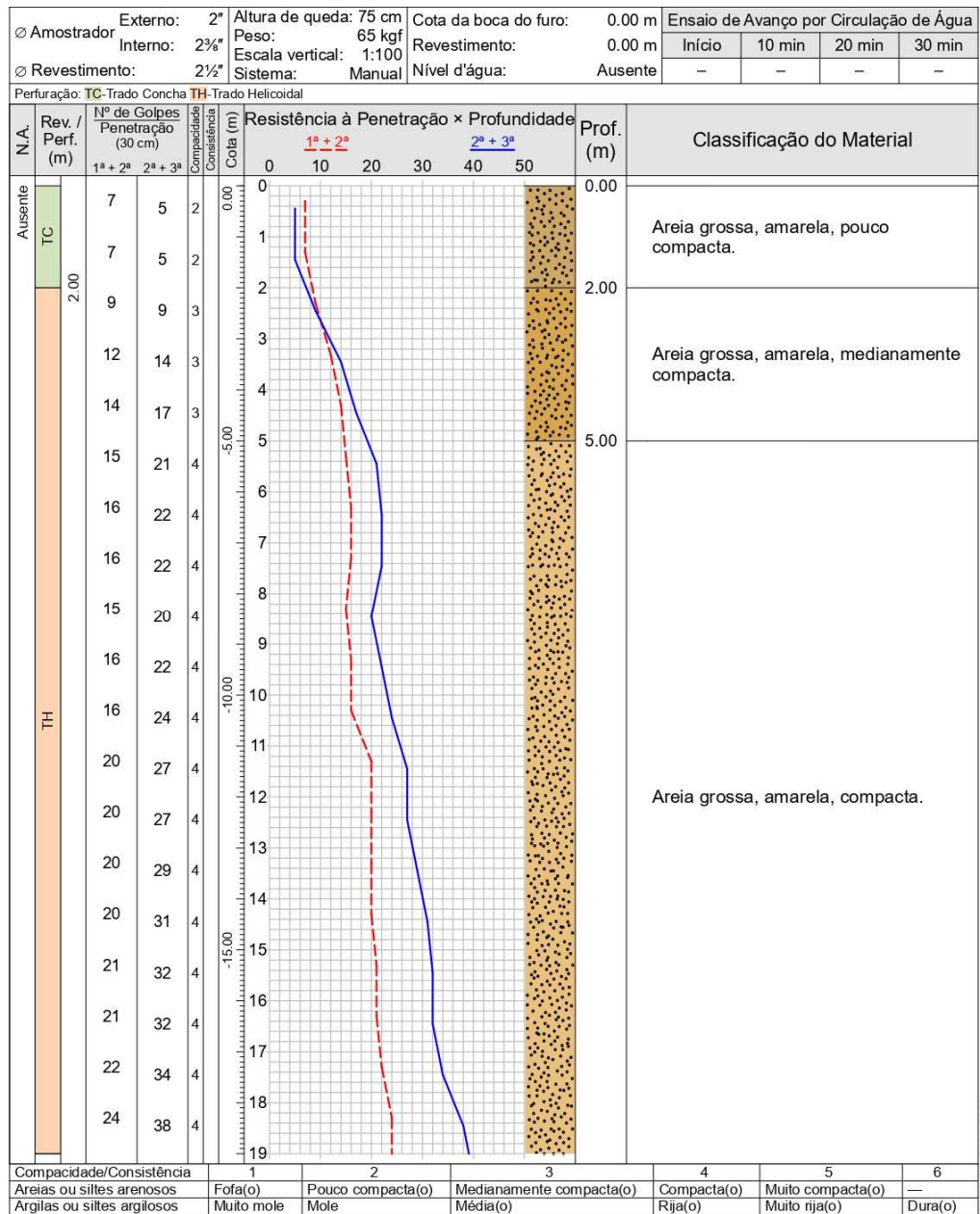
OK Cancelar

Fonte: Acervo do autor (2022).

3.6 PERFIS DE SONDAGEM

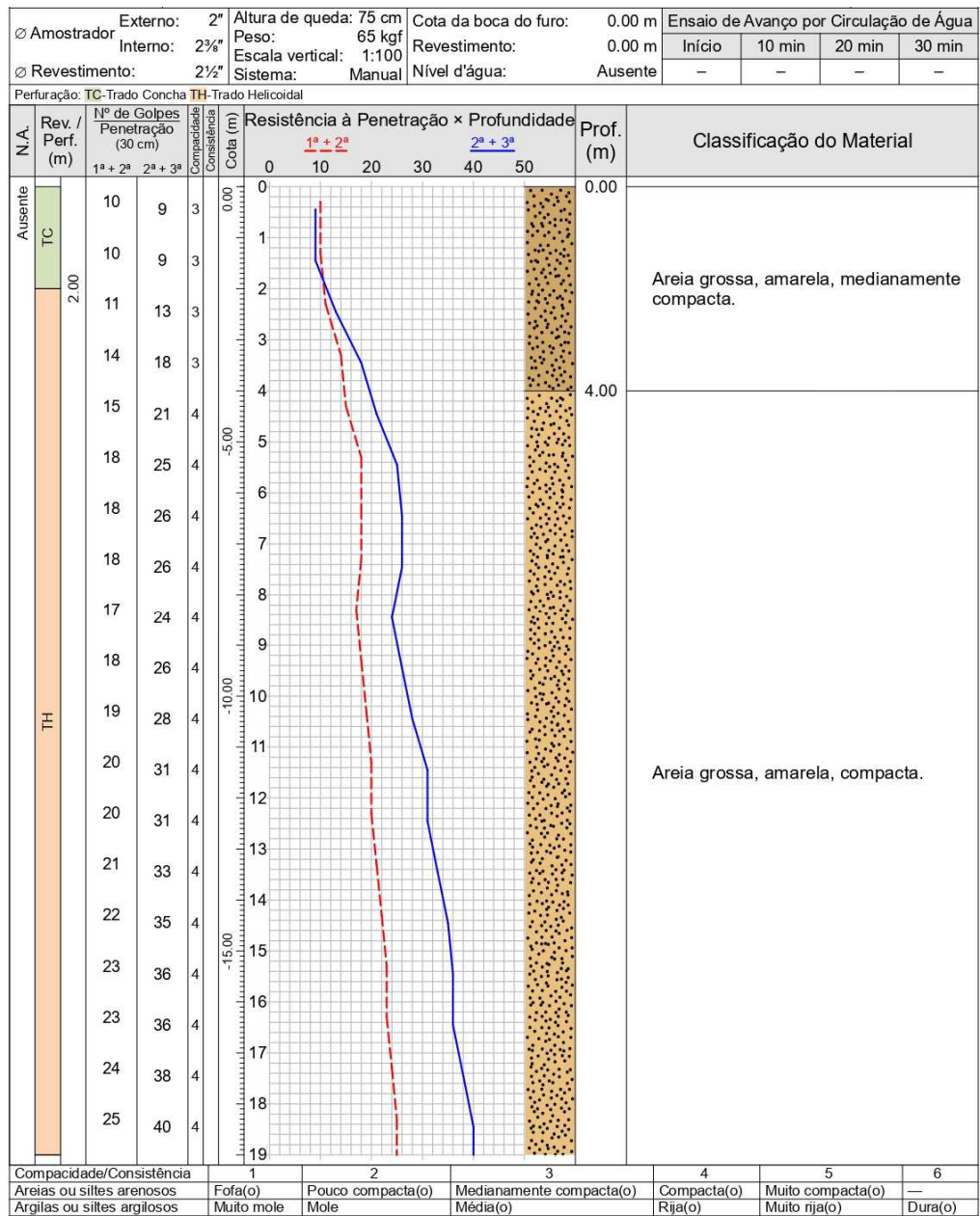
Para a realização do estudo, foram utilizados seis perfis de sondagem. As sondagens dos modelos 02 e 03 possuem a mesma composição de solo, variando apenas os índices de SPT. Já as sondagens dos modelos 04, 05, 06 e 07 possuem os mesmos índices de SPT, variando apenas as composições do solo. O intuito é avaliar o impacto do perfil geotécnico na interação solo-estrutura. As Figuras de 3.12 a 3.17 apresentam os laudos de sondagens mencionados.

Figura 3.12 – Perfil de sondagem do modelo 02.



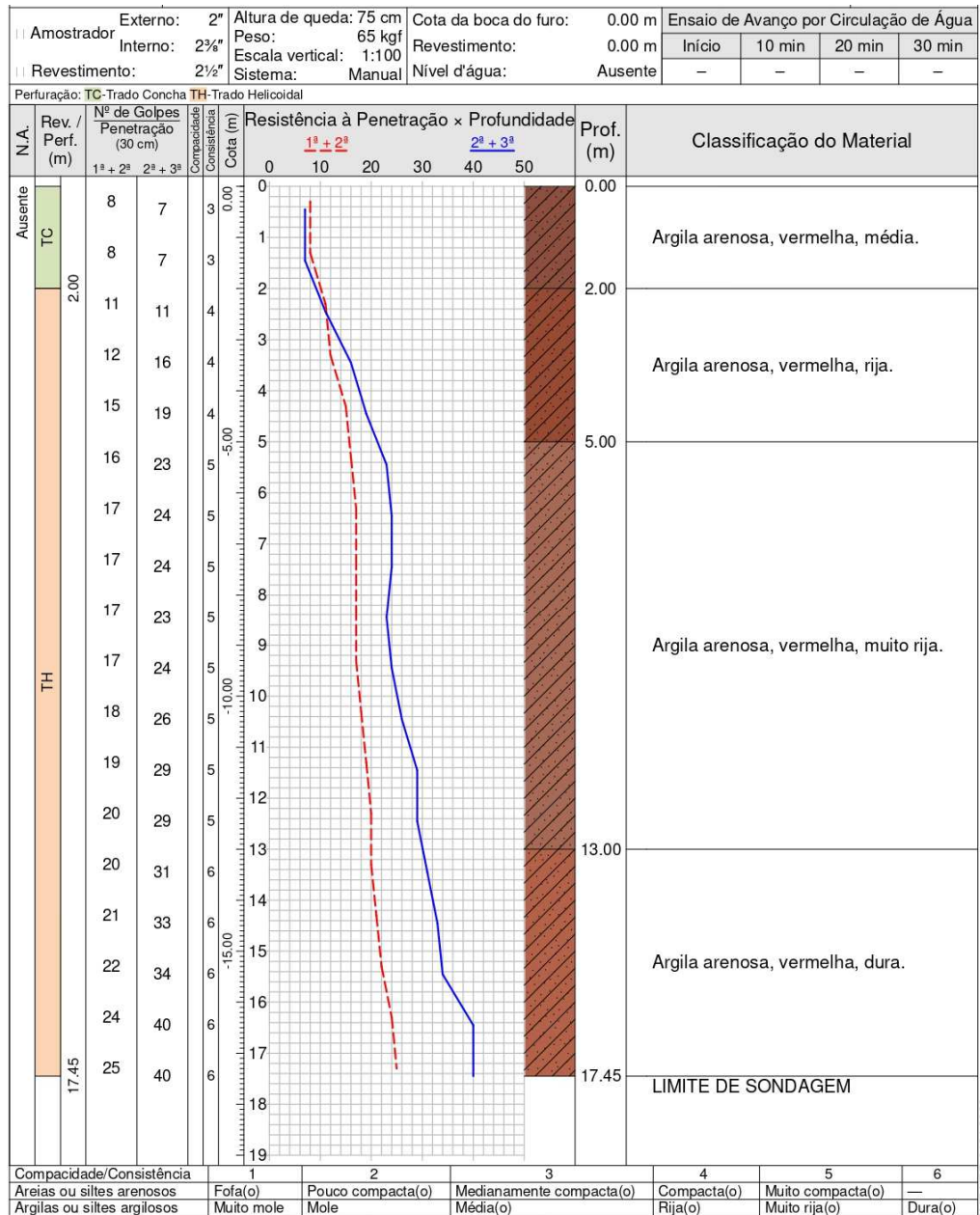
Fonte: Acervo do autor (2022).

Figura 3.13 – Perfil de sondagem do modelo 03.



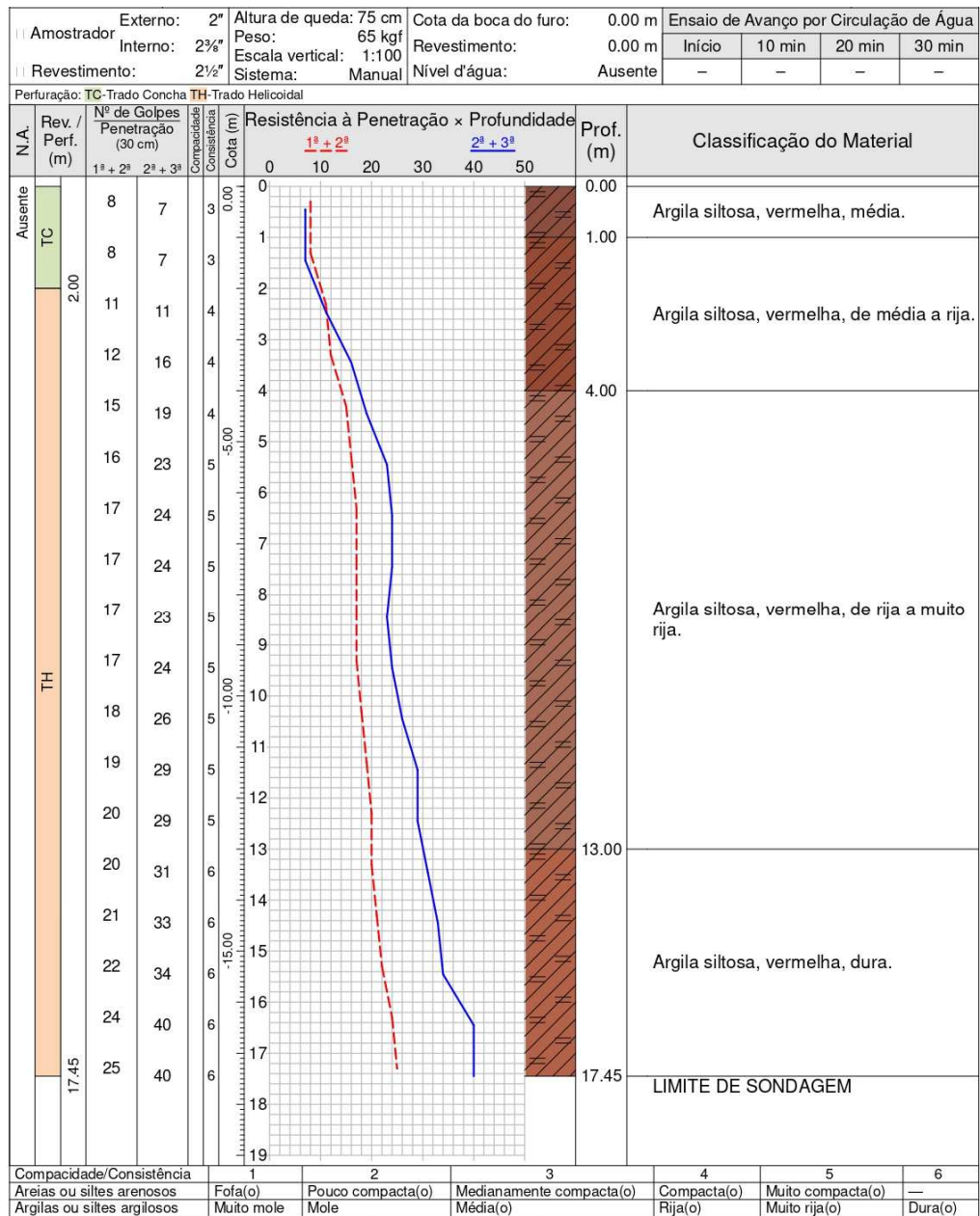
Fonte: Acervo do autor (2022).

Figura 3.14 – Perfil de sondagem do modelo 04.



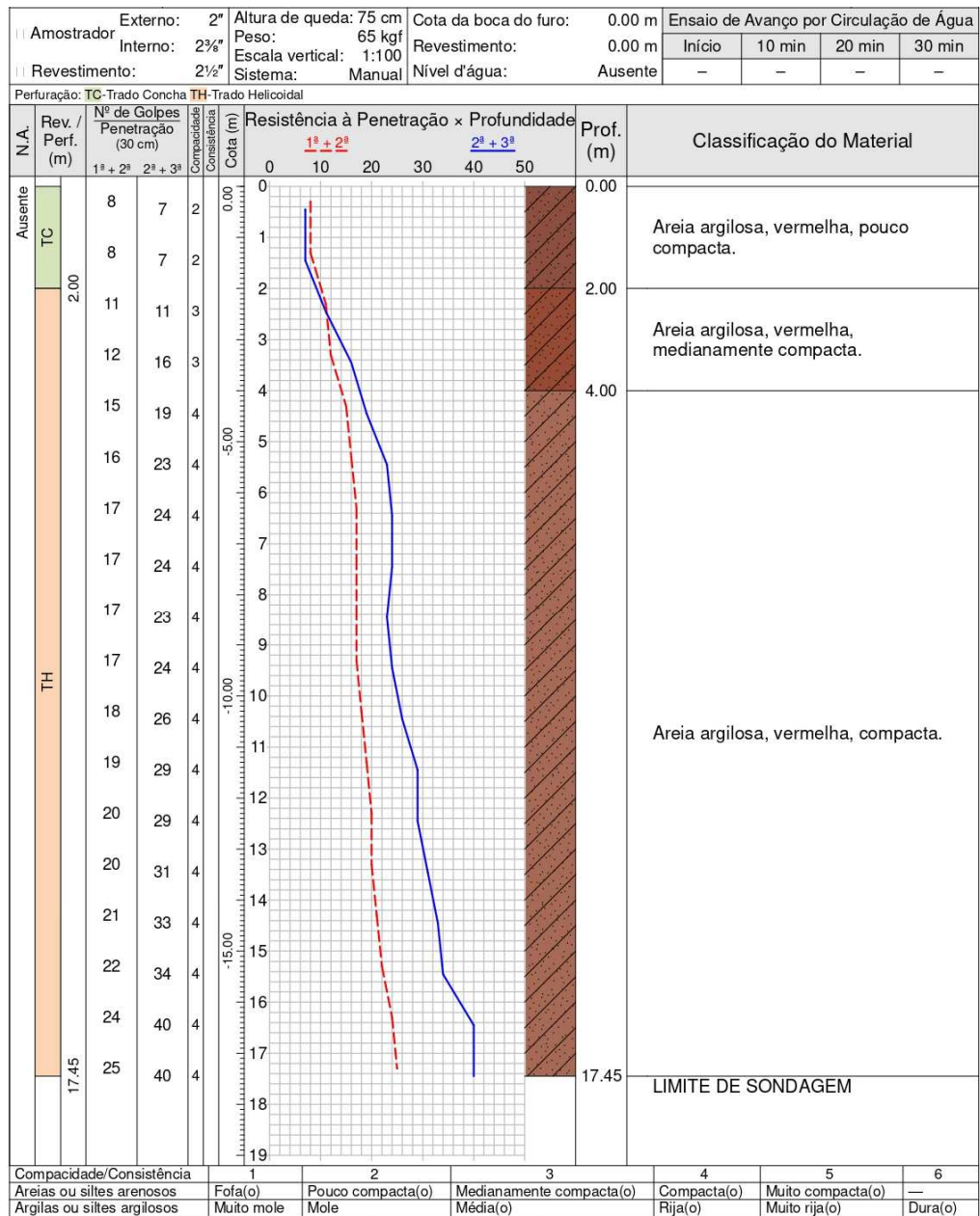
Fonte: Acervo do autor (2022).

Figura 3.15 – Perfil de sondagem do modelo 05.



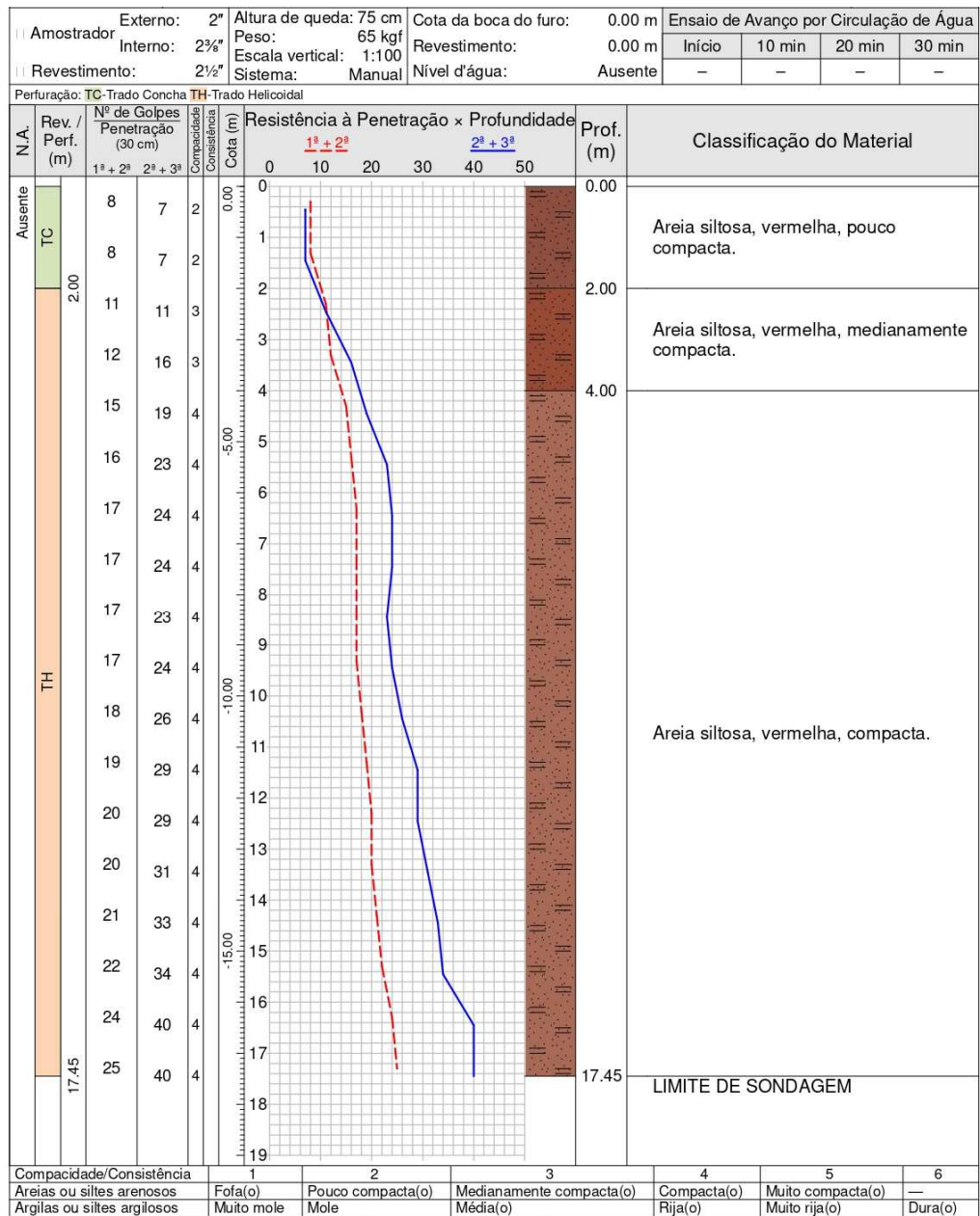
Fonte: Acervo do autor (2022).

Figura 3.16 – Perfil de sondagem do modelo 06.



Fonte: Acervo do autor (2022).

Figura 3.17 – Perfil de sondagem do modelo 07.



Fonte: Acervo do autor (2022).

CAPÍTULO 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados serão apresentados a seguir, nesta ordem: redistribuição de esforços, parâmetros de estabilidade global e consumo de aço.

4.1 REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS

A Tabela 4.1 apresenta o levantamento de esforços na base dos pilares da estrutura, para todos os modelos estudados.

Tabela 4.1 – Esforços nas bases dos pilares da estrutura, em toneladas

Bloco	Indesloc. Modelo 01	Areia 01 Modelo 02	Areia 02 Modelo 03	Argila arenosa Modelo 04	Argila siltosa Modelo 05	Areia argilosa Modelo 06	Areia siltosa Modelo 07
01	179,38	189,48	192,16	189,38	189,38	189,38	189,38
02	165,56	170,65	170,74	170,51	170,51	170,51	170,50
03	181,78	171,6	166,2	171,68	171,68	171,68	171,68
04	167,71	157,59	154,68	157,68	157,68	157,68	157,69
05	25,19	23,78	23,12	23,75	23,75	23,75	23,75
06	176,07	180,9	183,34	180,85	180,85	180,85	180,85
07	257,38	262,62	264,34	262,57	262,57	262,57	262,56
08	253,25	259,16	261,04	259,10	259,10	259,10	259,09
09	174,89	179,46	181,88	179,40	179,40	179,40	179,40
10	127,39	127,93	126,57	127,85	127,85	127,85	127,84
11	126,66	128,3	127,11	128,20	128,20	128,20	128,20
12	260,88	234,25	217,2	234,52	234,52	234,52	234,53
13	28,78	21,54	18,32	21,49	21,49	21,49	21,49
14	258,68	229,13	213,3	229,32	229,32	229,32	229,34
15	236,41	229,89	227,02	229,93	229,93	229,93	229,93
16	200,46	189,13	178,83	189,07	189,07	189,07	189,07
17	234,47	228,76	226,39	228,79	228,79	228,79	228,79
18	189,92	185,99	183,66	186,00	186,00	186,00	186,00
19	388,21	372,47	364,06	372,72	372,72	372,72	372,74
20	243,69	238,87	234,26	238,87	238,87	238,87	238,87
21	244,56	239,44	235,13	239,44	239,44	239,44	239,44
22	384,68	369,7	361,27	369,94	369,94	369,94	369,96
23	196,3	192,73	190,75	192,76	192,76	192,76	192,77
24	235,01	221,52	217,27	221,64	221,64	221,64	221,64
25	265,53	261,09	263,04	261,14	261,14	261,14	261,15
26	248,98	246,15	248,14	246,18	246,18	246,18	246,18
27	165,62	171,87	177,12	171,82	171,82	171,82	171,82
28	190,02	195,53	198,78	195,50	195,50	195,50	195,50
29	205,45	208,31	209,16	208,27	208,27	208,27	208,27

Tabela 4.1 – Esforços nas bases dos pilares da estrutura, em toneladas (continua)

30	209,13	208,29	205,36	208,21	208,21	208,21	208,21
31	193,17	197,89	199,24	197,80	197,80	197,80	197,80
32	202,73	205,87	209,1	205,85	205,85	205,85	205,85
33	167,52	173,61	178,97	173,58	173,58	173,58	173,58
34	12,25	13,68	14,66	13,66	13,66	13,66	13,66
35	150,9	162,28	163,73	162,14	162,14	162,14	162,13
36	157,32	167,58	169,32	167,49	167,49	167,49	167,49
37	11,01	14,23	15,03	14,18	14,18	14,18	14,18
38	4,84	4,21	4,27	4,19	4,19	4,19	4,19
39	5,15	4,61	4,72	4,59	4,59	4,59	4,59
40	4	1,55	1,41	1,53	1,53	1,53	1,53
41	1,22	-0,17	-0,3	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
42	18,89	18,85	18,98	18,84	18,84	18,84	18,84
43	15,7	16,56	16,7	16,55	16,55	16,55	16,55
44	1,76	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77
45	10,66	11,33	11,59	11,32	11,32	11,32	11,32

Fonte: Acervo do autor (2022).

De acordo com os dados apresentados, houve uma considerável redistribuição de esforços entre o modelo que considera apoios indeslocáveis e os modelos que consideram a interação solo-estrutura. Nota-se, através dos resultados dos blocos de número 12 a 26, uma tendência de redistribuição das cargas dos pilares de centro para os pilares periféricos. Apesar das diferentes composições de solo, os resultados dentre os modelos 04, 05, 06 e 07 foram os mesmos. A Tabela 4.2 compara, em porcentagem, os valores anteriormente apresentados em relação ao modelo de apoios indeslocáveis. Os valores positivos retratam os pilares que receberam mais carregamentos, enquanto que os valores negativos indicam os pilares que sofreram alívio de cargas.

Tabela 4.2 – Redistribuição de cargas nas bases dos pilares

Bloco	Modelo 02	Modelo 03	Modelos 04, 05, 06 e 07
01	5,63%	7,12%	5,57%
02	3,07%	3,13%	2,98%
03	-5,60%	-8,57%	-5,56%
04	-6,03%	-7,77%	-5,97%
05	-5,60%	-8,22%	-5,72%
06	2,74%	4,13%	2,71%
07	2,04%	2,70%	2,01%
08	2,33%	3,08%	2,31%

Tabela 4.2 – Redistribuição de cargas nas bases dos pilares (continua)

09	2,61%	4,00%	2,58%
10	0,42%	-0,64%	0,35%
11	1,29%	0,36%	1,22%
12	-10,21%	-16,74%	-10,10%
13	-25,16%	-36,34%	-25,33%
14	-11,42%	-17,54%	-11,34%
15	-2,76%	-3,97%	-2,74%
16	-5,65%	-10,79%	-5,68%
17	-2,44%	-3,45%	-2,42%
18	-2,07%	-3,30%	-2,06%
19	-4,05%	-6,22%	-3,98%
20	-1,98%	-3,87%	-1,98%
21	-2,09%	-3,86%	-2,09%
22	-3,89%	-6,09%	-3,83%
23	-1,82%	-2,83%	-1,80%
24	-5,74%	-7,55%	-5,69%
25	-1,67%	-0,94%	-1,65%
26	-1,14%	-0,34%	-1,12%
27	3,77%	6,94%	3,74%
28	2,90%	4,61%	2,88%
29	1,39%	1,81%	1,37%
30	-0,40%	-1,80%	-0,44%
31	2,44%	3,14%	2,40%
32	1,55%	3,14%	1,54%
33	3,64%	6,84%	3,62%
34	11,67%	19,67%	11,51%
35	7,54%	8,50%	7,44%
36	6,52%	7,63%	6,46%
37	29,25%	36,51%	28,79%
38	-13,02%	-11,78%	-13,43%
39	-10,49%	-8,35%	-10,87%
40	-61,25%	-64,75%	-61,75%
41	-113,93%	-124,59%	-115,57%
42	-0,21%	0,48%	-0,26%
43	5,48%	6,37%	5,41%
44	0,57%	0,57%	0,57%
45	6,29%	8,72%	6,19%

Fonte: Acervo do autor (2022).

De acordo com a tabela, os pilares com fundação composta por apenas uma estaca foram os mais afetados pela redistribuição. O pilar 41, por exemplo, com a consideração da interação solo-estrutura, passou a apresentar esforços de tração em sua base, ao invés das solicitações de compressão apresentadas no modelo de apoios indeslocáveis.

4.2 ESTABILIDADE GLOBAL

As Tabelas 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os dados coletados em relação aos parâmetros de estabilidade global e aos deslocamentos da estrutura.

Tabela 4.3 – Índices de estabilidade global e deslocamentos máximos do modelo 01

Modelo 01 - Indeslocável				
Caso de vento	γz	α	Desloc. Horiz.	Desloc. Entre pisos
0º	1,08	0,641	0,39	0,03
90º	1,07	0,618	1,22	0,10
180º	1,08	0,641	0,39	0,03
270º	1,07	0,618	1,22	0,10

Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 4.4 – Índices de estabilidade global e deslocamentos máximos do modelo 02

Modelo 02 - Areia 01				
Caso de vento	γz	α	Desloc. Horiz.	Desloc. Entre pisos
0º	1,11	0,751	0,52	0,07
90º	1,12	0,775	1,82	0,05
180º	1,11	0,751	0,52	0,07
270º	1,12	0,775	1,82	0,05

Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 4.5 – Índices de estabilidade global e deslocamentos máximos do modelo 03

Modelo 03 - Areia 02				
Caso de vento	γz	α	Desloc. Horiz.	Desloc. Entre pisos
0º	1,11	0,749	0,51	0,06
90º	1,11	0,773	1,81	0,05
180º	1,11	0,749	0,51	0,06
270º	1,11	0,773	1,81	0,05

Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 4.6 – Índices de estabilidade global e deslocamentos máximos dos modelos 04 a 07

Modelos 04, 05, 06 e 07				
Caso de vento	γz	α	Desloc. Horiz.	Desloc. Entre pisos
0º	1,10	0,729	0,48	0,06
90º	1,10	0,733	1,62	0,04
180º	1,10	0,729	0,48	0,06
270º	1,10	0,733	1,62	0,04

Fonte: Acervo do autor (2022).

Como apresentado nas tabelas, em todos os casos de consideração da interação solo-estrutura, os índices de estabilidade global foram superiores aos apresentados no modelo de apoios indeslocáveis. Pode-se observar, com os resultados dos modelos 02 e 03, que os índices de SPT afetam consideravelmente os parâmetros de estabilidade global do prédio, visto que ambos os modelos passaram a ser considerados como estruturas de nós móveis, já que tiveram valores de γ_z superiores a 1,10. Em contrapartida, os modelos 04, 05, 06 e 07 apresentaram as mesmas variações de comportamento entre si, indicando que a composição do solo pouco influencia nos parâmetros analisados.

4.3 CONSUMO DE AÇO

As Tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam os dados coletados em relação ao consumo de aço da estrutura. Note que esses quantitativos referem aos dados automáticos de dimensionamento do *software* TQS, sem quaisquer modificações.

Tabela 4.7 – Consumo de aço do modelo 01

Pavimento	Aço (kg)		
	Pilares	Vigas	Lajes
Caixa d'água	198	529	378
Platibanda	784	573	226
Cobertura	1314	2747	1982
Tipo 01	17752	38816	28503
Mezanino	2657	2297	2412
Térreo	2079	1372	0
Total	24784	46334	33501

Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 4.8 – Consumo de aço do modelo 02

Pavimento	Aço (kg)		
	Pilares	Vigas	Lajes
Caixa d'água	224	547	381
Platibanda	832	602	225
Cobertura	1372	2931	1981
Tipo 01	18449	41744	28639
Mezanino	2515	2782	2575
Térreo	2086	2646	0
Total	25478	51252	33801

Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 4.9 – Consumo de aço do modelo 03

Pavimento	Aço (kg)		
	Pilares	Vigas	Lajes
Caixa d'água	224	547	381
Platibanda	832	602	225
Cobertura	1372	2931	1981
Tipo 01	18449	41744	28364
Mezanino	2515	2799	2576
Térreo	2086	2646	0
Total	25478	51269	33527

Fonte: Acervo do autor (2022).

Tabela 4.10 – Consumo de aço dos modelos 04 a 07

Pavimento	Aço (kg)		
	Pilares	Vigas	Lajes
Caixa d'água	213	540	379
Platibanda	810	590	224
Cobertura	1347	2889	1979
Tipo 01	18147	40504	28601
Mezanino	2435	2629	2540
Térreo	2017	1680	0
Total	24969	48832	33723

Fonte: Acervo do autor (2022).

Conforme apresentado, em todos os modelos onde houve a consideração da interação solo-estrutura, houve maior consumo de aço por parte da superestrutura. A Tabela 4.11 compara, em porcentagem, os valores anteriormente apresentados em relação ao modelo de apoios indeslocáveis.

Tabela 4.11 – Comparação dos consumos de aço dos modelos

Elemento estrutural	Modelo 02	Modelo 03	Modelos 04, 05, 06 e 07
Pilares	2,80%	2,80%	0,75%
Vigas	10,61%	10,65%	5,39%
Lajes	0,90%	0,08%	0,66%

Fonte: Acervo do autor (2022).

Os esforços solicitantes internos e, conseqüentemente, as deformações, aumentaram nos modelos que consideram a interação solo-estrutura, os quais ficaram mais flexíveis, resultando em maior consumo de aço, como demonstrado.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar o impacto da interação solo-estrutura na estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos. Para isso, foram calculados 07 modelos estruturais com condições geotécnicas diferentes, com o intuito de compreender as influências da interação, bem como analisar a reação da superestrutura perante tais modificações. Após as diversas análises, as conclusões desse estudo são:

- Com os efeitos da interação solo-estrutura, há redistribuição de cargas nas bases dos pilares, aliviando ou carregando ainda mais os elementos de fundação, comprovando a importância da consideração desta metodologia na rotina dos escritórios de engenharia;
- Com a redistribuição de cargas, notou-se uma tendência ao alívio de solicitações nos pilares mais centralizados da superestrutura, enquanto que um maior carregamento nos pilares periféricos;
- A interação solo-estrutura impacta significativamente na estabilidade global de um edifício. Neste estudo, algumas análises apontaram mudanças na classificação da estabilidade global, passando de estruturas de nós fixos para estruturas de nós móveis. Com a representação estrutural mais próxima da realidade, pode-se observar também, maiores valores de deslocamentos horizontais do edifício;
- Com o impacto da interação solo-estrutura, a consequente redistribuição de esforços e o novo dimensionamento, houve acréscimos no consumo total de aço da obra.
- Neste estudo, notou-se que apesar das análises de diferentes tipos de solos, os resultados das redistribuições de esforços, quando comparados entre si, não foram afetados, tampouco os parâmetros de estabilidade, sendo o índice de SPT o único fator responsável por tais variações.

Sugere-se, para futuros trabalhos, e dando continuidade a esta pesquisa:

- Análise de edificações mais altas, para melhor avaliação da relevância das ferramentas;
- Análise com outros tipos de elementos de fundação, tais como tubulões ou sapatas;
- Análise com outras metodologias de cálculo de capacidade de carga de estacas, como por exemplo, método de Decourt-Quaresma.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6122: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro.2020.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR-6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR-7250: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro, 1982.
- ALVES, E., FEITOSA, L. (2020). Análise da estabilidade global de edifícios altos em lajes lisas considerando a interação solo-estrutura. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 13, 183-199.
- ANTONIAZZI, J. P. (2011). Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais. Dissertação (mestrado em engenharia civil), Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Santa Maria, 139p.
- BAHIA, G. D. A. D. (2015). Avaliação do desempenho de fundações em edificação no DF com a utilização de técnicas de interação solo-estrutura.
- BUENO, M. M. E. Avaliação dos parâmetros de instabilidade global em estruturas de concreto armado, 2009. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- BURLAND, J. B.; WROTH, C. P. Allowable and differential settlement of structures, including damage and soil-structure interaction. In: Settlement of Structures, Proceedings of the Conference of the British Geotechnical Society, Cambridge. Pentech Press, London, UK. 1974. p. 611-764.
- CHAMECKI, S. Consideração da rigidez da estrutura no cálculo dos recalques da fundação. In: I Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v. 1, pp. 35-80, Porto Alegre. 1954.
- CHRISTAN, P. D. (2012). Estudo da interação solo-estaca sujeito a carregamento horizontal em ambientes submersos (Tese de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- COVAS, N. Tecnologia da informação no projeto e modelagem de estruturas de concreto. São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, v. 84, 2016.
- DINIZ, C. W. S.. Estabilidade global de estrutura de edifícios considerando a influência da excentricidade na ligação viga-pilar parede. 2017.

FONTE, A.O. C.; PONTES FILHO, I.; JUCÁ, J. F. T. (1994). Interação solo-estrutura em edifícios altos, Anais, X COBRAMSEG, v. 1, pp. 239-246.

GONÇALVES, J. C. Avaliação da influência dos recalques das fundações na variação de cargas dos pilares de um edifício. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil COPPE/UFRJ, RJ, 126p. 2004.

GOSHY, B. Soil-Foundation-Structure Interaction·, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.104, No.ST5, pp. 749-761. 1978.

GUSMÃO, A. D. Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 1990.

GUSMÃO, A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A., (1994). Avaliação da influência da interação solo-estrutura em edificações. In: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v. 2, pp. 447-454, Salvador, Bahia, Brasil.

IWAMOTO, R. K. Alguns aspectos dos efeitos da interação solo estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda. Dissertação de Mestrado, EESC, São Carlos, SP, 140 p. 2000.

JORDÃO, D. R. (2003). Estabilidade global de edifícios sobre fundações profundas, considerando a interação estrutura-solo (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

KIMURA, A. Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2007.

LIMA, J. S. (2001). Verificação da punção e da estabilidade global em edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas, Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

LOPES, F. R.; GUSMÃO, A. D. (1991). On the influence of soil-structure interaction in the distribution of foundation loads and settlements. Proc. 10th ECSMFE, Florence, Italy, vol. 1, pp. 475-478.

MARQUES, O. C. Avaliação dos efeitos construtivos e interação solo-estrutura na estabilidade global de edifícios. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFES, Vitória, ES, 157p. 2018.

MARQUES, O. C., DE ALMEIDA FEITOSA, L., ALVES, E. C. (2017). Avaliação dos efeitos construtivos e interação solo-estrutra na estabilidade global da estrutura. Cep, 29075, 910.

MEDEIROS, D. S. Análise tridimensional da interação solo-estrutura em fundações de concreto armado pelo método dos elementos finitos. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, UFRS, Porto Alegre, RS, 173p. 2006.

MEYERHOF, G. G. Some recente foundation research and its application to design. Structural Engineering, v. 31, pp. 151-167, Londres. 1953.

MINDLIN, R. D. Forces at a point in the interior of a semi-infinite-solid. Physics, v. 7. 1936.

PINTO, C.S., Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3 ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRADO, D. H. C. Comparação entre caracterização dos solos do Sudoeste Goiano por meio de ensaios laboratoriais e identificação tátil visual. Jataí-GO, 2018. 66f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). IFG: Jataí-GO, 2018.

RIBEIRO, J. F. Estabilidade global em edifícios: Análise dos efeitos de segunda ordem nas estruturas de concreto. 81 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RODRIGUES, D. F. Avaliação dos parâmetros de instabilidade global de estruturas de concreto armado. 2019. 151 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Jataí, 2019.

SANTOS, M. F. D. S. Interação solo-estrutura: análise de um caso de obra em Recife, Pernambuco. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2021.

SILVA, A. V., SOUZA, F. A., CÂNDIDO, E. S., OLIVEIRA, M. C. D., BARROS, M. C., LEÃO, L. D. M. (2021). Desenvolvimento de um Programa para Análises da Interação Solo-Estrutura em Sapatas. RCT-Revista de Ciência e Tecnologia, 7.

SILVA FILHO, F. C. D. "Identificação dos solos e tensões". Apostila de sala de aula. Engenharia geotécnica: fundações e obras de terra. (Professor Francisco Chagas da Silva Filho). INBEC – Instituto Brasileiro de Educação Continuada, Goiânia, 2014.

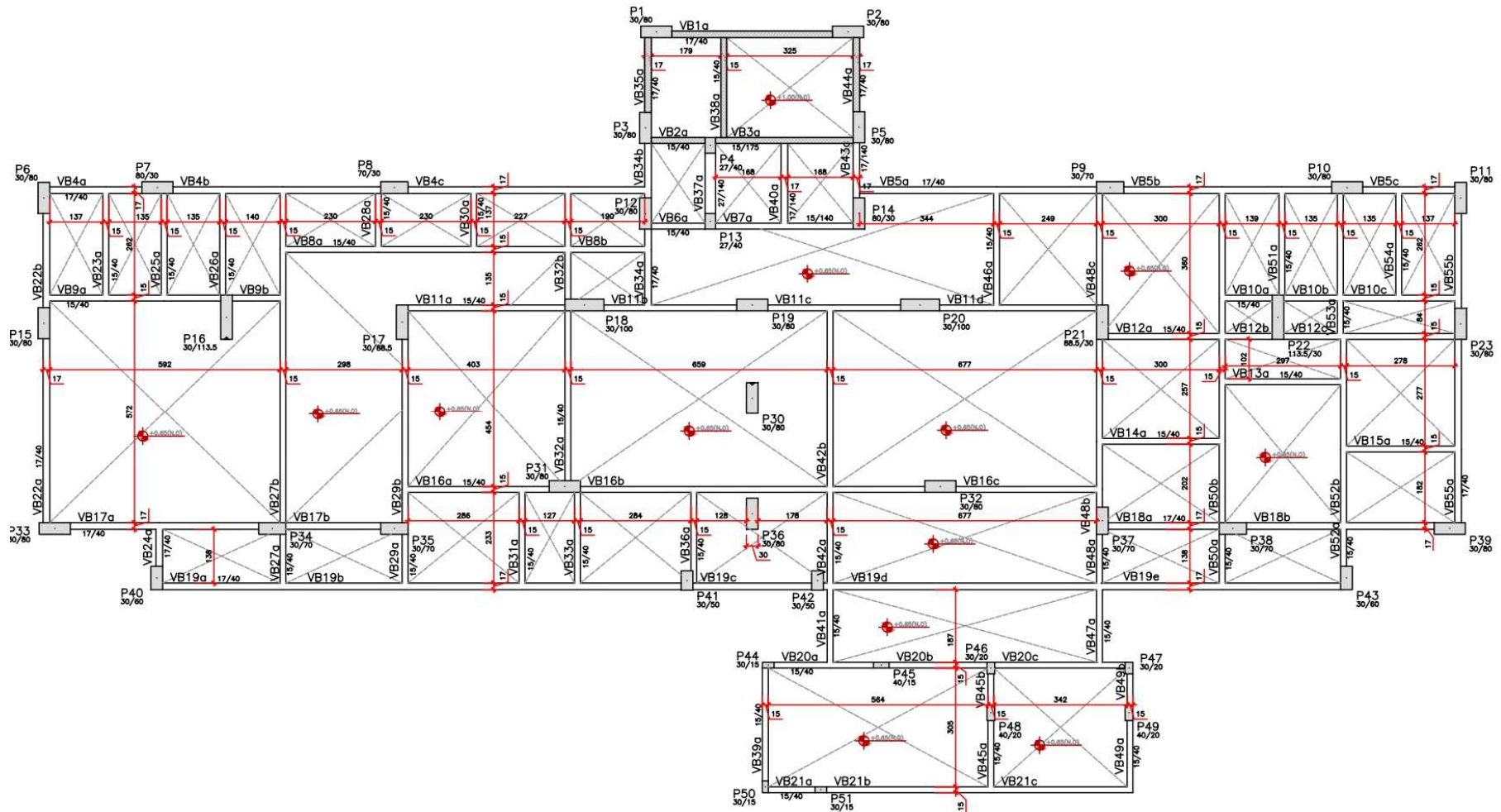
STEINBRENNER, W. Tafeln zur Setzungberechnung. Strasse, v. 1, p. 221. 1934.

LOPES, F. R.; VELLOSO, D. A. Fundações-Volume único. Oficina de Textos, 2016.

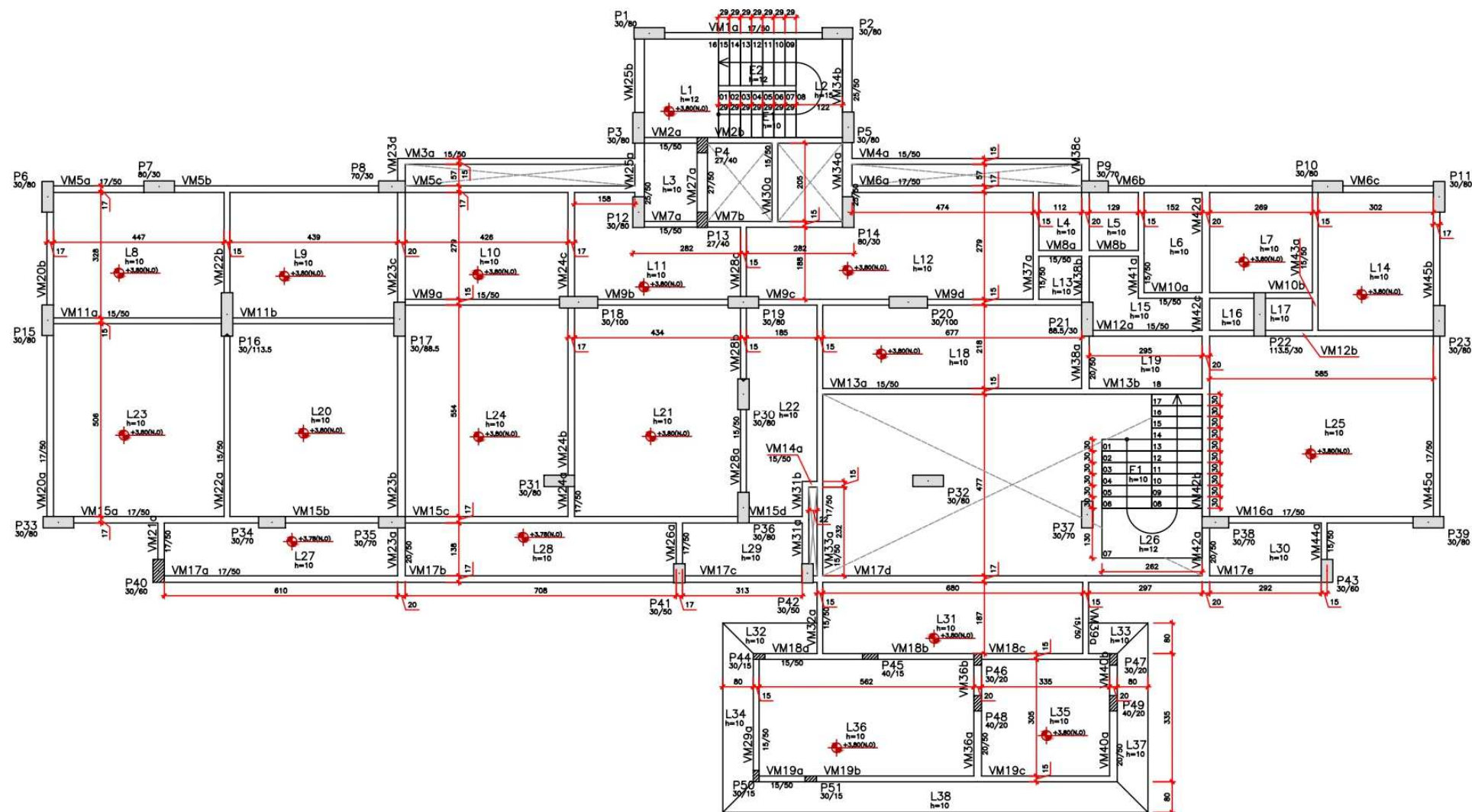
WINKLER, E. Die lehre von der Elastizitat und Festigkeit. Domicius. Prage. (1867).

ANEXOS

Anexo 01 – Planta de formas do pavimento térreo.

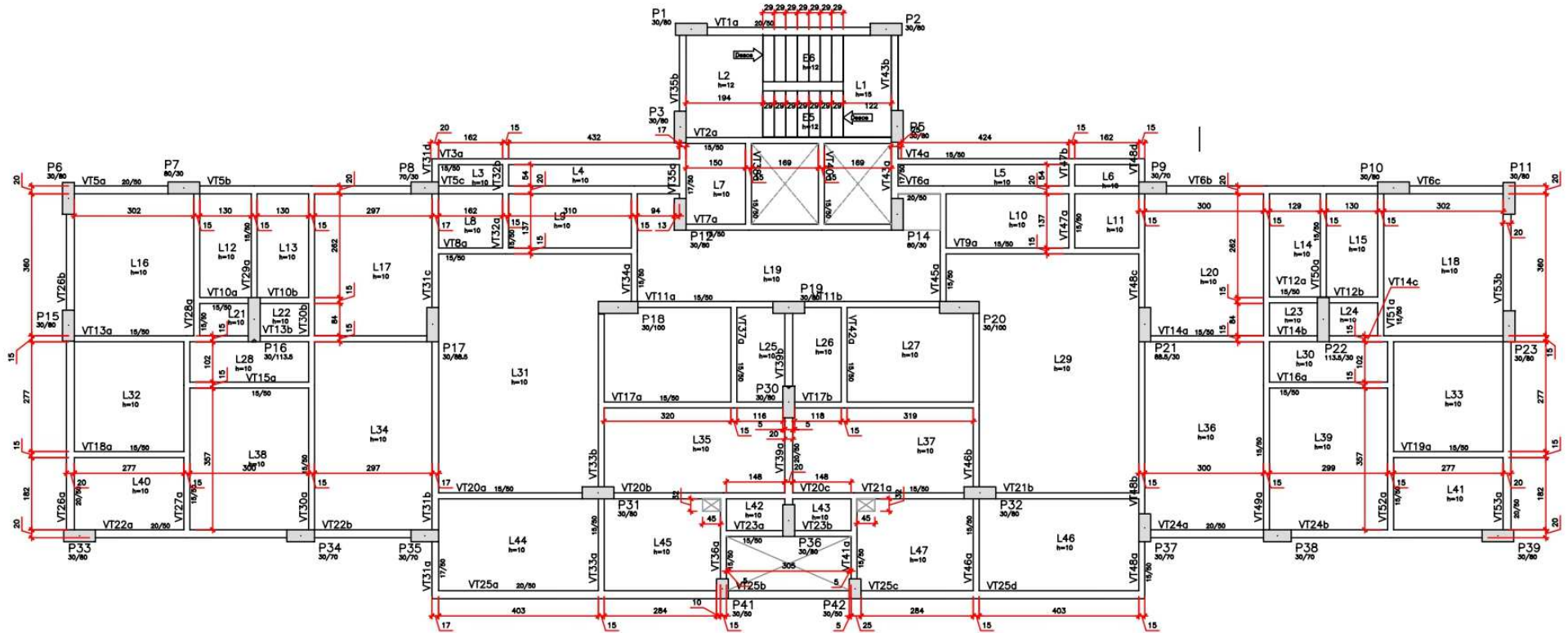


Fonte: Acervo do autor (2022).

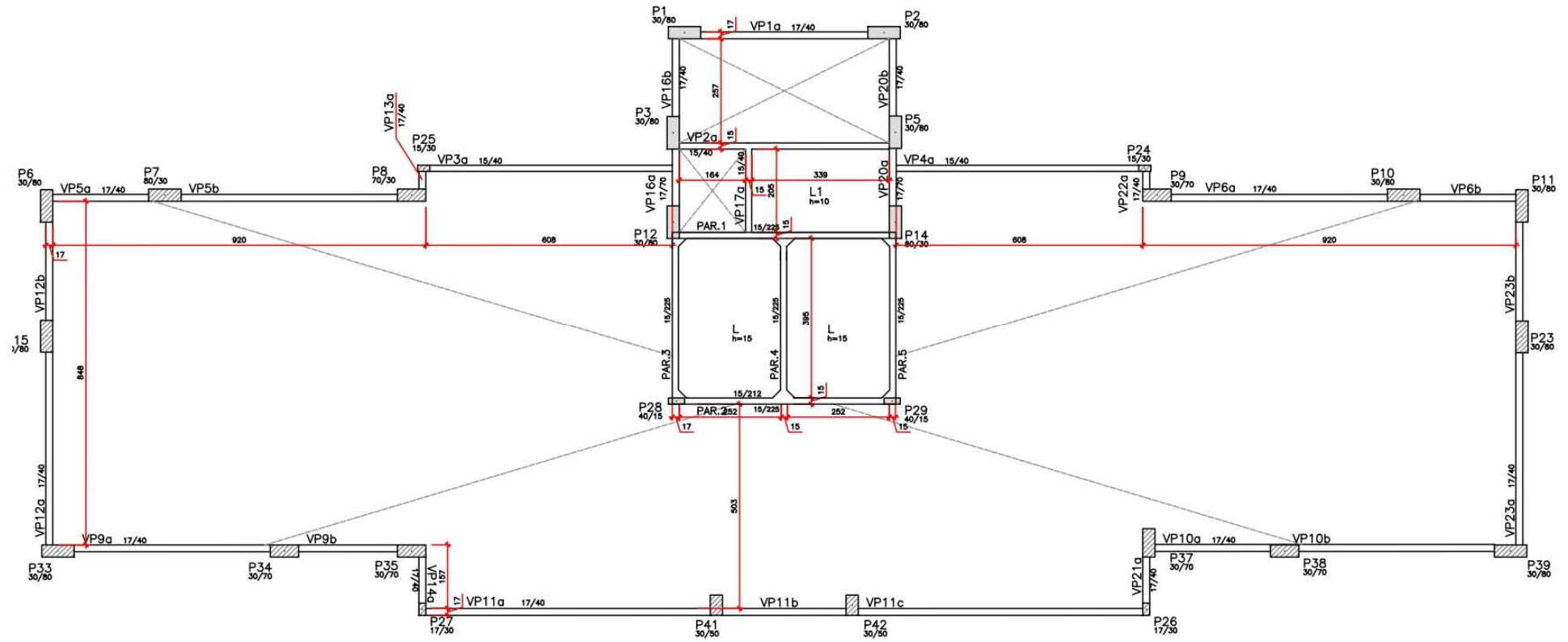


Fonte: Acervo do autor (2022).

Anexo 03 – Planta de formas do pavimento tipo.

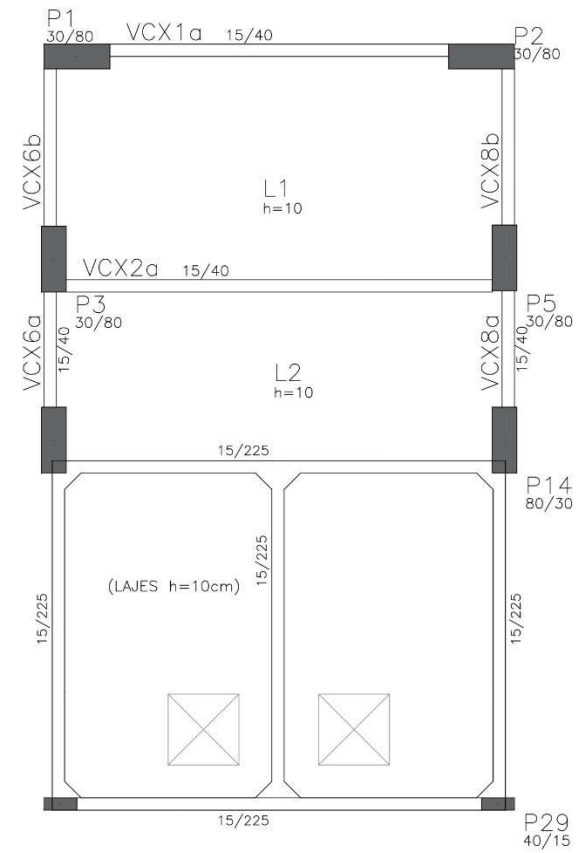


Fonte: Acervo do autor (2022).



Fonte: Acervo do autor (2022).

Anexo 05 – Planta de formas do volume da caixa d'água.



Fonte: Acervo do autor (2022).