



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SAMUEL JOSÉ DE FRANÇA CLEMENTINO

**ESTUDO DE CASO DE MELHORAMENTO DE SOLO PARA
CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM RECIFE**

RECIFE, 2025

SAMUEL JOSÉ DE FRANÇA CLEMENTINO

**ESTUDO DE CASO DE MELHORAMENTO DO SOLO PARA
CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM RECIFE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Civil/ Geotecnia

Orientador: Prof. PhD. Samuel França Amorim

RECIFE, 2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Clementino, Samuel José de França.

Estudo de caso de melhoramento de solo para construção de edifício
residencial em Recife / Samuel José de França Clementino. - Recife, 2025.
103 p. : il., tab.

Orientador(a): Samuel França Amorim

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Melhoramento de solo. 2. Colunas de argamassa. 3. Ensaio SPT. 4.
Recalque. I. Amorim, Samuel França. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

SAMUEL JOSÉ DE FRANÇA CLEMENTINO

**ESTUDO DE CASO DE MELHORAMENTO DO SOLO PARA
CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM RECIFE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 08/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Samuel França Amorim (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. PhD. Washington Moura de Amorim (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. PhD. Pedro Eugênio Silva de Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

*“Não nos trata conforme os nossos pecados, nem
nos retribui conforme as nossas iniquidades”*

Salmos 103:10

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por seu amor e misericórdia de me permitir realizar este TCC, me dando forças e incentivos, apesar de todas as dificuldades, me colocando no lugar certo e com as pessoas certas, que foram essenciais para obtenção de dados, conhecimento e apoio.

Aos meus pais, Josanias Clementino da Silva e Miriam Pereira de França, pelo amor, incentivos, amparo e dedicação ao longo de todos os anos da minha vida. Agradeço a minha mãe por sempre me ouvir e orar por mim.

A minha família, minha irmã Débora Maressa, minha avó Euridice Pereira, que muito orou por mim, minha Tia Betânia e sua amiga Vanusa, que deu grande incentivo. Aos meus avôs, Antônio Clementino da Silva e José Lauriano de França.

A minha namorada, Maysa Flora, agradeço por ser tão paciente, doce e amável, seu incentivo e ajuda da sua família foram essenciais.

A todos os meus colegas de curso e ABI, que marcaram minha vida em diversas etapas da graduação, em especial para meus amigos Lucas Félix de Melo e Paulo Roberto Magalhães.

Aos meus professores da Universidade Federal de Pernambuco, em especial, ao Prof. Samuel França Amorim, meu orientador, pela paciência, orientações e auxílio na realização deste trabalho e ao Prof. Washington Moura Júnior, que despertou o meu interesse pela área da geotecnia e serve de exemplo e inspiração para todos aqueles que tiveram a honra de serem seus alunos.

Aos colegas e amigos que fiz nos mais diversos estágios e a todos os engenheiros que tive a honra de trabalhar junto e que contribuíram direta ou indiretamente neste trabalho.

RESUMO

O melhoramento de solo é utilizado para aumento da tensão admissível do solo, redução do recalque total e diferencial e estabilização do terreno para possibilitar o uso de fundações superficiais de edificações em áreas que exigiriam outro tipo de solução. Este trabalho apresenta um estudo de melhoramento de solo por meio da execução de colunas de argamassa em um solo heterogêneo, com camadas iniciais de areia fina. O caso analisado refere-se a um edifício residencial localizado no bairro de Boa Viagem, em Recife, composto por 27 pavimentos no total, sendo 21 pavimentos tipo, com cargas variando entre 385 tf e 1540,9 tf, distribuídos em 12 sapatas. Foram executadas 992 colunas de argamassa com martelo vibratório e realizadas análises comparativas dos ensaios SPT, antes e após o melhoramento, a fim de averiguar a eficiência da técnica empregada e o aumento da tensão admissível do solo. Além disso, foi realizado o monitoramento dos pilares para comprovar a redução dos recalques. O comparativo dos ensaios SPT demonstram um aumento da compacidade do solo nas camadas melhoradas (até 7,45 m). O fator de melhoramento (k) atingiu valores máximos de 7,81 e 5,13, nas profundidades de 3,45 m e 4,45 m, respectivamente. O aumento da tensão admissível variou entre 16,3% até 231,2%. O recalque total máximo ($\rho_{\text{máx}}$) e o recalque diferencial máximo ($\delta_{\text{máx}}$) atingidos ficaram 16% e 10%, respectivamente, abaixo dos limites aceitáveis para solos arenosos, enquanto as distorções angulares (β) apresentaram resultados satisfatórios. Os resultados comprovam a eficácia da técnica de melhoramento utilizada, para viabilizar o uso de fundações superficiais em solos que naturalmente não suportariam cargas elevadas.

Palavras-chave: melhoramento de solo; coluna de argamassa; ensaios SPT; recalque.

ABSTRACT

Ground improvement is used to increase in the admissible soil tension, reduce total and differential settlement and stabilize the ground to enable the use of shallow foundations for buildings in areas that would require another type of solution. This work presents a study of soil improvement through the execution of mortar columns in a heterogeneous soil, with initial layers of fine sand. The case analyzed refers to a residential building located in the Boa Viagem neighborhood, in Recife, consisting of 27 floors in total, 21 of which are standard floors, with loads ranging from 385 tf to 1540.9 tf, distributed across 12 footings. 992 mortar columns were executed with a vibrating hammer and comparative analyses of the SPT tests were carried out before and after the improvement, in order to verify the efficiency of the technique used and the increase in the permissible soil stress. In addition, the pillars were monitored to prove the reduction of settlements. The comparison of SPT tests demonstrates an increase in soil compactness in the improved layers (up to 7.45 m). The improvement factor (k) reached average maximum values of 7.81 and 5.13, at depths of 3.45 m and 4.45 m, respectively. The increase in the admissible soil tension ranged from 16.3% to 231.2%. The maximum total settlement (p_{max}) and maximum differential settlement (δ_{max}) achieved were 16% and 10%, respectively, below the acceptable limits for sandy soil, while the angular distortions (β) presented satisfactory results. The results prove the effectiveness of the improvement technique used to enable the use of shallow foundations in soils that would naturally not support high loads.

Keywords: soil improvement; mortar columns; SPT tests; settlement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos	20
Figura 2 – Curvas granulométricas de alguns solos brasileiros	20
Figura 3 – Solos residuais x faixas climáticas	23
Figura 4 – Esquema da perfuração por percussão e amostragem	26
Figura 5 – Aplicabilidade dos métodos de melhoramento x custo e prazo de execução	32
Figura 6 – Aplicação das técnicas de melhoramento x granulometria	33
Figura 7 – Efeito da compactação inicial do solo no melhoramento	36
Figura 8 – Influência da distância lateral no melhoramento	37
Figura 9 – Relações entre índice de resistência e taxas admissíveis	38
Figura 10 – Definição de recalque total, diferencial e distorção angular	39
Figura 11 – Distorção angular e danos relacionados	40
Figura 12 – Planta de situação	42
Figura 13 – Corte esquemático do edifício	42
Figura 14 – Vista de satélite da localização da obra	43
Figura 15 – Vista 3D da localização da obra	43
Figura 16 – Projeto de forma de fundação da lâmina principal	44
Figura 17 – Corte do projeto de forma de Fundação	44
Figura 18 – Vista superior do terreno da obra antes da demolição da edificação existente	45
Figura 19 – Vista superior do terreno da obra após a demolição da edificação existente	46
Figura 20 – Ensaio SPT	46
Figura 21 – Locação dos primeiros furos de sondagem	47
Figura 22 – Boletim de sondagem SP-001 Parte 01/03 (22/06/2021)	48
Figura 23 – Boletim de sondagem SP-001 Parte 02/03 (22/06/2021)	49
Figura 24 – Boletim de sondagem SP-001 Parte 03/03 (22/06/2021)	50
Figura 25 – Planta de locação das colunas de compactação em argamassa	51
Figura 26 – Planta de locação das colunas de compactação em argamassa na fundação da lâmina principal	52
Figura 27 – Detalhes das colunas de compactação de argamassa	52
Figura 28 – Equipamentos utilizados no melhoramento de solo	53
Figura 29 - Lançamento de argamassa através do funil no tubo metálico	54
Figura 30 – Solo com melhoramento executado	55
Figura 31 – Mapa de rastreabilidade (Amostra S(P5+P6+P9))	55
Figura 32 – Planilha de rastreabilidade da argamassa das estacas de compactação	56

Figura 33 – Locação dos furos de sondagem pós melhoramento	57
Figura 34 – Boletim de sondagem SP-101 (14/05/2022)	58
Figura 35 – Diagrama de recalques	59
Figura 36 – Gráfico velocidade de recalque	60
Figura 37 - Perfil estratigráfico característico do solo estudado	61
Figura 38 - Sobreposição do gráfico 11 sobre figura 8	69
Figura 39 - Mapa de contorno do recalque em 28/02/2023 (64 dias) – Leitura L2	72
Figura 40 - Mapa de contorno do recalque em 17/12/2024 (722 dias) – Leitura L17	73
Figura 41 - Superfície 3D do recalque da leitura L17	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - N-spt médio antes e depois x fator de melhoramento (k)	65
Tabela 2 - N-spt antes x depois (SP-001 x SP-103)	66
Tabela 3 - N-spt antes x depois (SP-002 x SP-111)	66
Tabela 4 - N-spt antes x depois (SP-003 x SP-101)	66
Tabela 5 - N-spt antes x depois (SP-005 x SP-110)	67
Tabela 6 - N-spt antes x depois (SP-004 x SP-108)	67
Tabela 7 - Dimensões das sapatas	70
Tabela 8 - Estimativa do aumento da tensão admissível	71
Tabela 9 - Carga permanente por coluna de argamassa	71
Tabela 10 - Recalque entre L1 e L17	72
Tabela 11 - Maiores distorções angulares (β) registradas	73
Tabela 12 - Velocidade de recalque da Leitura 6	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – N_{spt} x Qualidade da camada	26
Quadro 2 – Fatores condicionantes do sistema solo-fundação	28
Quadro 3 – Fatores para escolha do método de melhoramento	29
Quadro 4 – Fatores para escolha do método de melhoramento	35
Quadro 5 - Velocidade admissíveis de recalques em edifícios	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil Nspt do solo natural (Até 45 m)	52
Gráfico 2 – Profundidade média das estacas de argamassa por sapata	58
Gráfico 3 - Perfil N-spt após da compactação	63
Gráfico 4 - Perfil N-spt antes da compactação	63
Gráfico 5 - Nspt's médios antes e depois do melhoramento	64
Gráfico 6 - N-spt antes x depois (SP-001 x SP-103)	66
Gráfico 7 N-spt antes x depois (SP-002 x SP-111)	66
Gráfico 8 - N-spt antes x depois (SP-003 x SP-101)	66
Gráfico 9 - N-spt antes x depois (SP-005 x SP-110)	67
Gráfico 10 - N-spt antes x depois (SP-004xSP-108)	67
Gráfico 11 - Efeito da compacidade inicial do solo no melhoramento do solo	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa e motivação	17
1.2 Objetivo geral e específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Melhoramento de Solo	18
2.1.1 Classificação dos solos	18
2.1.1.1 Característica das partículas	19
2.1.1.2 Mineralogia	21
2.1.1.3 Classificação pela origem	21
2.1.1.4 Solos problemáticos	23
2.1.1.5 Investigações Geotécnicas	24
2.1.2 Características específicas da edificação	26
2.1.2.1 Superestrutura	29
2.1.2.2 Tipos de Fundações	30
2.1.2.3 Avaliação econômica	32
2.1.3 Técnicas de melhoramento de solo	33
2.1.3.1 Estacas de Argamassa	34
2.1.4 Metodologia para escolha da técnica de melhoramento	35
2.3 CAPACIDADE DE CARGA (TENSÃO ADMISSÍVEL) DO SISTEMA SAPATA-SOLO	36
2.4 RECALQUE ADMISSÍVEL	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 DESCRIÇÃO DA OBRA	41

3.2 MÉTODO DE SONDAGEM DO SOLO	44
3.3 DISTRIBUIÇÃO DAS ESTACAS DE COMPACTAÇÃO	50
3.4 SONDAGEM DE VERIFICAÇÃO	56
3.5 ACOMPANHAMENTO DOS RECALQUES	58
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
4.1 ANÁLISE DOS ENSAIOS SPT ANTES E DEPOIS DO MELHORAMENTO	60
4.2 ESTIMATIVA DA MELHORA DA TENSÃO ADMISSÍVEL DO SISTEMA SAPATA-SOLO	70
4.3 ANÁLISE DOS RECALQUES	72
5 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	
APÊNDICE A – TABELAS DOS RECALQUES	
APÊNDICE B – MAPAS DE CONTORNO DO RECALQUE	
ANEXO A – BOLETIM DAS SONDAGENS ANTES DO MELHORAMENTO	

1 INTRODUÇÃO

A população brasileira aumentou aproximadamente 6,5%, segundo o último Censo Demográfico do IBGE, realizado em 2022, quando comparado ao censo de 2010. Além disso houve um aumento na expectativa de vida e na idade mediana, indicando uma transição demográfica no país. A partir dessas informações, pode-se inferir um aumento na renda média da população e, conseqüentemente, do poder de compra, especialmente no que se refere à busca por moradia.

É possível relacionar o crescimento populacional, o desenvolvimento econômico e a implementação de políticas públicas com o aumento percentual da taxa de urbanização, que foi de 1,79%, variando entre 84,36% e 85,87%. A expectativa é que, até 2050, essa taxa atinja 90%, segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU).

Ao realizar um recorte para o estado de Pernambuco, nota-se um crescimento populacional de 3%. Porém, ao analisar a cidade do Recife – que possui uma densidade demográfica de 6.803,60 habitantes por quilômetro quadrado, a 12ª maior do Brasil - houve uma variação de -3,20% e segundo Claudio Stenner, diretor de geociências do IBGE, um dos fatores que justificam isso é a diminuição de áreas utilizáveis, como ele afirma:

Muitas vezes o município núcleo da metrópole, daquela concentração urbana, perde população, mas as cidades vizinhas ganham. Isso tem a ver com o espalhamento do tecido urbano para além dos limites municipais. Isso quer dizer que há expansões novas, até pelo esgotamento de área desse município. É uma parte importante da explicação desse fenômeno (apud CABRAL, 2024).

Nesse sentido, é notório que o aumento populacional e o processo de urbanização ocasionam a limitação de terrenos disponíveis para habitação, gerando, por consequência, o aumento da procura por residências bem localizadas e com boa infraestrutura. Tal demanda, muitas vezes, restringe as opções de terrenos com solos adequados, restando, em muitos casos, apenas áreas alagadiças, encostas ou solos menos resistentes, inadequados para grandes construções. De acordo com GUSMÃO FILHO et al., 1998:

A valorização dos espaços urbanos e a pressão imobiliária têm verticalizado as construções nestas cidades, que são geralmente assentes sobre sedimentos recentes não consolidados. Além disso, algumas cidades possuem subsolos reconhecidamente complexos do ponto de vista geotécnico, como é o caso do Recife (apud GUSMÃO A. D., 2005).

O subsolo da cidade do Recife é tipicamente muito variado, o que torna indispensável a realização de prospecções geotécnicas para projetos de fundação, além de outros ensaios e do

acompanhamento dos recalques ao longo da construção (GUSMÃO A. D. 2005). O monitoramento do solo auxilia na escolha ideal do tipo de fundação, garantindo maior previsibilidade quanto ao comportamento do solo em relação ao adensamento e à estabilidade da construção ao longo de sua vida útil. Essa escolha também é definida a partir das cargas da superestrutura oriundas dos pilares, do tempo de execução da obra e da análise dos custos das fundações.

Dessa forma, quando o solo não apresenta as características ideais para determinada edificação, é possível utilizar de soluções técnicas de melhoramento do solo, as quais foram desenvolvidas e testadas, inicialmente, de forma empírica e, ao longo do tempo, demonstraram resultados práticos no aumento da coesão, da tensão admissível e no controle da deformabilidade do solo. Por isso, trata-se de uma prática indispensável na engenharia civil, a fim de garantir a segurança, a estabilidade e a viabilidade econômica de projetos em solos que, originalmente, seriam inadequados para a construção.

Assim, de acordo com Gusmão Filho (2002), as principais técnicas de melhoramento de solo empregadas na construção de edificações residenciais em Recife são as colunas de compactação de areia e brita, e colunas de compactação em argamassa. No entanto, existem outras técnicas consolidadas, utilizadas para diferentes finalidades. A eleição do método apropriado está sujeito ao exame das características do solo, das cargas distribuídas, do ambiente local e da avaliação econômica.

Este trabalho apresenta um estudo de melhoramento de solo por meio da execução de estacas de argamassa em um solo heterogêneo, com camadas iniciais de areia fina. O caso analisado refere-se a um edifício residencial localizado no bairro de Boa Viagem, em Recife, composto por 27 pavimentos no total, sendo 21 pavimentos tipo, com cargas variando entre 385 tf e 1540,9 tf, distribuídos em 12 sapatas. Foram realizadas análises comparativas dos ensaios SPT antes e após o melhoramento, a fim de averiguar a eficiência da técnica empregada e o aumento da tensão admissível do solo. Além disso, foi realizado o acompanhamento dos recalques para comprovar o bom desempenho da edificação.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

As características do solo e sua capacidade de resistência são fatores que influenciam diretamente na segurança, economia e no desempenho de qualquer construção civil. Solos com baixa capacidade de suporte e suscetíveis a recalques superficiais podem resultar em elevados custos de fundação ou manutenção. Para viabilizar edificações em terrenos problemáticos, é necessário implementar técnicas de melhoramento de solo que aumentem sua resistência e permitam o uso de fundações mais econômicas. Nesse sentido, de acordo com Gusmão Filho (2002), observa-se que, no Recife, esses métodos são amplamente utilizados devido à escassez de terrenos adequados. Por isso, torna-se imprescindível a avaliação dos métodos de melhoramento do solo em construções residenciais na cidade para comprovação da sua eficácia.

1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

Analisar a técnica de melhoramento do solo de colunas de argamassa em um estudo de caso referente à construção de um edifício residencial na cidade do Recife e avaliar a eficiência da solução empregada na adequação das características geotécnicas do solo, visando à garantia da segurança estrutural e à viabilidade econômica do projeto.

Como objetivos específicos deste trabalho, pode-se listar:

- 1 - Investigar metodologia para escolha do melhoramento do solo;
- 2 - Estudar a técnica de melhoramento de solo aplicada no estudo de caso;
- 3 - Avaliar a eficiência do melhoramento de solo escolhido por meio de ensaios SPT, antes e após o melhoramento;
- 4 - Verificar o aumento da tensão admissível com o melhoramento do solo;
- 5- Analisar a eficácia do processo de melhoramento do solo na redução dos recalques, por meio do monitoramento dos doze pilares que compõe a lâmina do prédio sobre solo melhorado;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MELHORAMENTO DE SOLO

O melhoramento de solo se apresenta como solução de aumento da resistência do solo para uma determinada escolha de fundação, portanto para o aumento da capacidade de carga do sistema solo-fundação. Muitas vezes por causa da característica do solo de baixa resistência somadas as cargas da estrutura são exigidas fundações de custo elevado, em vista disso as técnicas de melhoramento de solo foram desenvolvidas e permitiram o uso de fundações superficiais no lugar de fundações profundas (Gusmão Filho, 1998).

Rebello (2009), diz que as características do solo podem ser melhoradas de três maneiras: compactação, adensamento e estabilização. A compactação ocorre com a ajuda de equipamentos, podendo ser diretamente sobre o solo local ou sobre solo transportado, geralmente realizado em subleito de pavimentos flexíveis. O adensamento ocorre de forma natural pelo peso próprio do solo ou pelo sobrepeso da obra executada. A estabilização pode modificar a granulometria dos grãos do solo através da adição de outros materiais ou compostos, provocando o aumento da resistência e diminuição de recalques excessivos.

Escolher por realizar um melhoramento de solo é uma tarefa que requer uma avaliação de alguns aspectos, sendo os principais deles: características do solo (resistência, capacidade/consistência, nível d'água); características específicas da edificação; avaliação econômica (custo e prazo); eficácia do método em diferentes tipos de solos e sua execução (experiência; equipamentos).

Nos próximos tópicos serão abordados os principais aspectos que estariam presentes numa possível metodologia para escolha/aplicação de uma técnica de melhoramento de solo específica.

2.1.1 Classificação dos solos

Cada tipo de solo responde de uma maneira diferente as aplicações de cargas transmitidas pela estrutura, desse modo o entendimento das características e comportamentos do solo são imprescindíveis para concepção e dimensionamento dos projetos de fundações, isso levou a que eles fossem agrupados em grupos distintos com propriedades específicas. Dessa forma de organização experimental surgiram os sistemas de classificação (Pinto, 2006).

Como destaca Queiroz (2016, p.161) acerca da mecânica dos solos e dos solos respectivamente: “[...] é uma ciência da engenharia civil que trata do estudo dos solos do ponto de vista de tensões e deformações. [...] são compostos de uma fase sólida, formada por partículas granulares, envolta por uma fase fluida, constituída de água e ar ou gases.”

Realizar a classificação dos solos portanto é essencial para escolha adequada do tipo de fundação, melhoramento do solo ou contenção de terra. De acordo com Queiroz (2016, p 162): “Existem vários sistemas de classificação dos solos, normalmente com base nas dimensões das partículas e nas características dos argilominerais que compõem os solos.” A fim de identificar os solos de maneira prática e facilitar a comunicação, foram desenvolvidos os sistemas de classificação, apesar dos solos apresentarem características variáveis e em contrapartida os sistemas indicam parâmetros definidos por limites numéricos.

A seguir, são abordadas algumas características básicas dos solos, suas classificações (granulometria, plasticidade, sistema de classificação e origem), os solos mais problemáticos para construções e os métodos de investigações geotécnicas.

2.1.1.1 Característica das partículas

De acordo com Pinto (2006) os solos são constituídos de um conjunto de partículas com água e ar nos espaços intermediários, onde as partículas se encontram livres para se movimentar. O comportamento e desempenho dos solos depende do movimento e interações entre essas partículas. Uma das primeiras características que diferenciam os solos são os tamanhos das partículas, que podem ser distinguidas pelo tato e visão até não serem mais visualizadas, e esse aspecto junto com a constituição mineralógica pode determinar o comportamento do solo em contato com a água e perante solicitações de interesse da engenharia. O tamanho dos grãos é determinado pela análise granulométrica, porém as características dos argilominerais são medidas indiretamente pelo comportamento do solo na água através do limite de Atterberg.

A análise granulométrica é realizada em duas etapas: peneiramento (pedregulho e areias) e sedimentação (siltes e argilas). Realizado inicialmente, o peneiramento do solo é feito através da passagem do mesmo por uma série de peneiras com uma malha de abertura conhecida, representando o diâmetro das partículas (Figura 1), devendo-se obedecer a ABNT NBR 7181, dessa forma o peso do material que passa em cada peneira é medido em relação ao peso seco

da amostra e por fim é feita uma representação gráfica das “porcentagens que passam” (Queiroz, 2016).

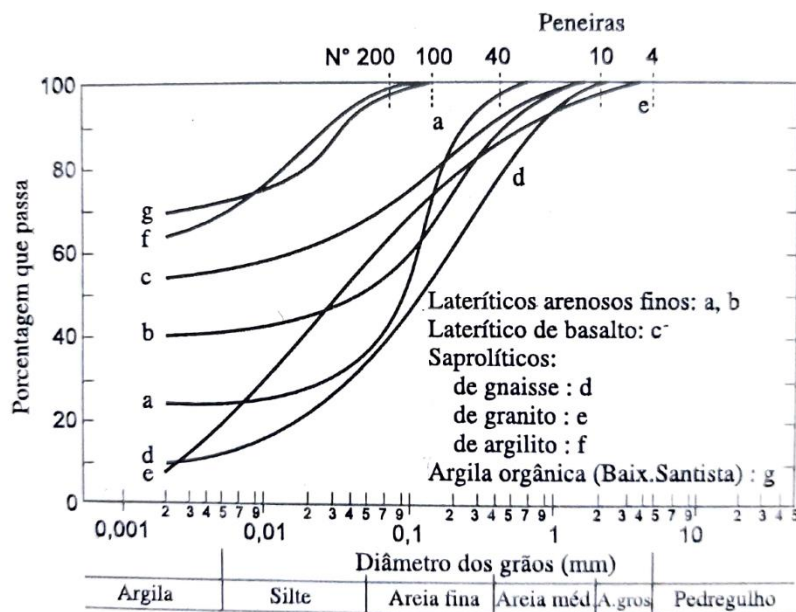
Figura 1 – Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos

Pedregulhos :	de 2,0 mm (ou 4,8 mm) a 15 cm
Areias :	de 0,075 mm (ou 0,06 mm) a 2,0 mm (ou 4,8 mm)
Silte :	de 0,002 mm (ou 0,005 mm) a 0,075 mm (ou 0,06 mm)
Argila :	inferior a 0,002 mm (ou 0,005 mm)

Fonte: Pinto (2006)

Para chegar ao resultado da distribuição da parte fina do solo é necessário se realizar a técnica de sedimentação que se baseia na Lei de Stokes¹, nesse ensaio medimos a densidade de uma suspensão de solo em água que não sedimentaram ao longo de um tempo, calculamos a porcentagem e associamos a Lei de Stokes para obter o diâmetro dos grãos, assim se completa a curva granulométrica, como vemos na figura 2.

Figura 2 – Curvas granulométricas de alguns solos brasileiros



Fonte: Pinto (2006)

¹A velocidade de queda de partículas esféricas num meio viscoso é proporcional ao quadrado do diâmetro da esfera

2.1.1.2 Mineralogia

De acordo com Ulbrich et al. (2023) a caracterização dos agregados depende do entendimento da sua mineralogia, como ele escreveu:

Uma areia composta por grãos de quartzo (como os sedimentos de praia encontrados em toda a orla atlântica brasileira) terá propriedades diferentes da areia das praias de ilhas oceânicas (e.g., Fernando de Noronha), onde predominam os fragmentos arredondados de corais e carapaças, constituída principalmente pelo carbonato calcita, mole e reativo. A identificação da composição mineral é muito importante em materiais mais finos (lamas e argilas). Os solos argilosos constituída dos pelo argilomineral caulinita, junto com fragmentos de quartzo, hidróxidos, etc., mostram comportamento diferente dos que apresentam as argilas expansivas, como montmorillonita, que acabam desestabilizando os solos e as obras construídas. (Ulbrich et al. 2023, p. 104)

Deste modo, podemos entender que apesar do solo possuir granulometrias parecidas, seu comportamento será ditado mineralogicamente a partir de sua formação, já que as partículas do solo dependem da rocha matriz pois os solos são formados a partir de ações físicas e químicas de degradações dessas. É comum que os pedregulhos sejam formados por quartzo por causa da sua resistência a degradação, já as partículas menores até 0,005 mm podem ser formadas por quartzo e outros minerais como feldspato, gipsita, calcita e mica, formando as frações de silte e areia do solo.

As argilas por sua vez são formadas de feldspato por serem os mais atacados na natureza com diâmetro inferior a 0,002 mm, apresentando comportamentos, devido ao seu tamanho e composição mineralógica, complexos e de extensa explicação que fogem a este trabalho, porém faremos menção de três argilominerais mais comuns: caulinita, illita e esmectita; suas estruturas químicas variam e determinam a superfície específica do conjunto de partículas que tem influência na forma de interação com a água, gerando uma diversidade de comportamentos e dificuldade de parametrizar elas (Pinto, 2006).

2.1.1.3 Classificação pela origem

Segundo Ulbrich et al. (2023) e Queiroz (2016), os solos podem ser classificados de acordo com sua origem em: residuais (possui camadas horizontais com partículas distribuídas em função dos minerais da rocha matriz, estando no mesmo local inicial e desenvolvido por movimentação vertical de água, gases e substâncias químicas, matéria orgânica e micro-

organismos) ou sedimentares (mostram maior heterogeneidade, que variam em função das rochas de origem e agentes de transporte, apresentando graduação variada e materiais orgânicos.

A figura 3, a seguir, foi adaptada do livro Geologia básica para engenheiros (Ulbrich et al, 2023, p. 107), para identificação dos principais solos residuais em cada zona climática. Destaque para os solos do clima quente e tropical no Árido, Semiárido e Seco e úmido, são eles: Solos desérticos vermelhos, solos marrom avermelhados, Solos castanhos avermelhados e Solos Lateríticos. Esses solos são tipicamente do nordeste e centro-oeste brasileiro.

Figura 3 – Solos residuais x faixas climáticas

	Teores crescentes de umidade							
Zona climática	Árido		Semiárido	Seco e úmido	Sub-úmido		Úmido	Muito úmido
Quente e temperado	Solos desérticos vermelhos	Solos marrom avermelhados	Solos castanhos avermelhados	Pradaria avermelhada	Podzólico degradado	Podzólico vermelho amarelado		
Quente								
Tropical								

Fonte: Adaptado de Ulbrich et al, (2023)

Da mesma forma, Caputo (1988, p. 15) concorda com essa classificação, afirmando: “Os solos residuais [...] permanecem no local da rocha de origem, observando-se uma gradual transição do solo até a rocha.” e diz que os solos sedimentares são formados sendo transportados e levam seus nomes de acordo com o agente transportador: aluvionares (água, rios, mar), eólicos (vento), coluvionares (gravidade) e glaciares (geleiras).

A obra do estudo de caso deste trabalho se localiza na cidade do Recife e no bairro de Boa Viagem, a predominância da formação do solo nessa região é aluvionar, Ulbrich et al. (2023) define da seguinte forma:

O aluvião aparece depositado como volumes lineares irregulares, já que geralmente ocupa uma parte limitada do leito do rio; em épocas de enchente, o rio depositará os seus sedimentos, geralmente mais finos, também na várzea em ambos os lados desse leito. Um perfil de depósitos aluvionares pode mostrar na base depósitos de cascalho (representando épocas de energia maior), cobertos por areias (depósitos de curso mais tranquilo) e por sua vez superpostos por depósitos de silte e argila, identificando os materiais sedimentados em época de pouca chuva e pouca movimentação no leito. [...] A construção civil em regiões de leitos e várzeas de rios não pode prescindir do conhecimento destes perfis, obtido por perfurações. Entre os materiais depositados pelo mar, interessam principalmente os encontrados a beira mar: geralmente, são areias e cascalhos. Em regiões com pouca ou nenhuma declividade topográfica, podem predominar os depósitos finos a muito finos, como os encontrados em

mangues; tipicamente, um perfil destes sedimentos mostra alternância de lentes de lamias e argilas pretas (com muita matéria orgânica) e areias finas a muito finas. (Ulbrich et al. 2023, p. 110)

2.1.1.4 Solos problemáticos

Para Antunes (2016), a primeira fase da metodologia de seleção de uma técnica de tratamento do solo é a identificação dos potenciais problemas da fundação a tratar, alguns deles são: prevenção dos fenômenos de liquefação, redução das deformações, estabilização de solos expansivos e colapsáveis, estabilização ou redução de recalques diferenciais de estruturas afetadas e formação de barreiras impermeáveis.

Alguns desses problemas envolvem a presença de determinados solos, segundo Gusmão Filho (2006) isso deve servir de alerta pois costumam apresentar complicações de comportamento para as construções e medidas cautelares devem ser tomadas no projeto e na execução da obra. As características dos solos problemáticos estão listadas a seguir:

- Areias finas fofas: Sujeitas a recalques por vibração; liquefação, quando saturadas; “piping”, se a água do terreno estiver em movimento (N_{spt} entre 4 e 10).

- Argilas moles: Sofre grandes recalques com pequenos carregamentos; amolgamento, se deformam facilmente; fluência, deformações lentas submetido a cargas constantes ($N_{spt}=5$).

- Argilas expansivas: Nesses solos pode ocorrer o levantamento da fundação e a diminuição de resistência devido à expansão, após ciclos de molhagem e secagem (Norma 6122:2022); fissuramento, quando seca; presença de montmorilonita na sua constituição; após molhadas, expandem, exercendo uma pressão várias vezes superior ao próprio peso. Não existe um modelo único de identificação.

- Argilas dispersivas: Apresenta elevada instabilidade estrutural; presença de túneis de erosão por percolação; identificação com ensaio especial dispersivo.

- Solos colapsáveis: Deve ser considerada a possibilidade de ocorrer o encharcamento (devido a, por exemplo, vazamentos de tubulações de água, elevação do lençol freático etc.). Essas características devem ser consideradas no projeto e no método construtivo. (Norma 6122:2022); sujeito a perda de resistência quando exposto a água corrente; se houver percolação pode ocorrer “piping”; apresenta valores de N_{spt} variáveis, quando seco, alto e quando molhado, baixo.

2.1.1.5 Investigações Geotécnicas

Diversos autores concordam com os objetivos e resultados encontrados para diversos tipos de investigação geotécnica, visto que, para os principais métodos, o assunto já está amplamente estudado. O engenheiro deve escolher a técnica mais adequada às condições de cada projeto. De acordo com Caputo (1988):

No planejamento de um programa de investigações geotécnicas há que se considerar não só as características do terreno - natureza, propriedades, sucessão e disposição das camadas e. presença do nível de água - como o tipo da estrutura: grande ou pequena, pesada ou leve e rígida ou flexível. A modalidade, o número, a disposição e a profundidade dos reconhecimentos geotécnicos se estabelecem em função das dimensões e forma das estruturas, das cargas e das características dos terrenos. A locação em planta e a elevação dos pontos de reconhecimento devem ficar perfeitamente definidas. (Caputo, 1988, p. 7)

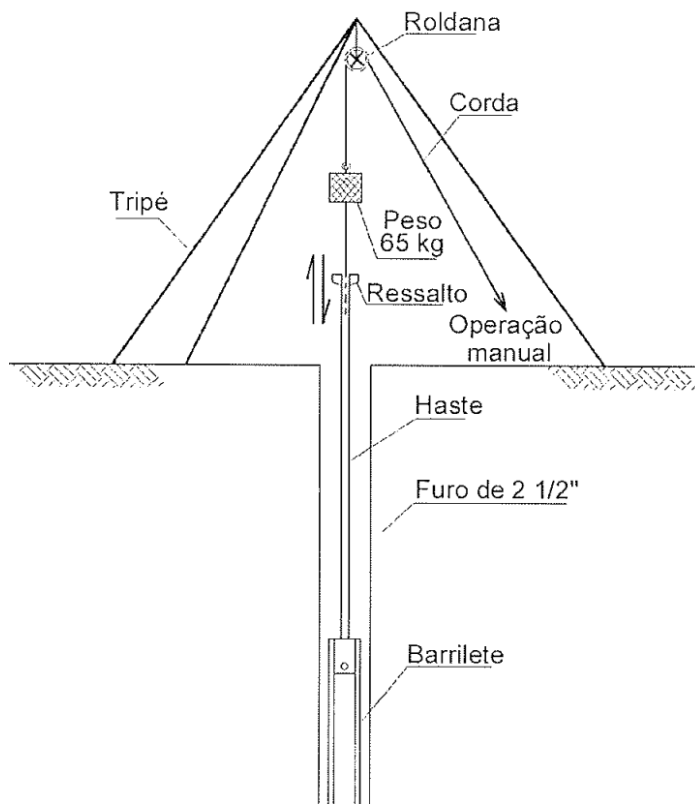
Existem várias técnicas, classificadas em diretas ou indiretas, dessas o SPT (Standard Penetration Test) é o método de natureza semiempírica mais utilizado, por sua economia e difusão, é aplicado à estimativa de recalques e à capacidade de carga de fundações. A norma que regulamenta esse ensaio e descreve a execução é a NBR: 6484. Foi utilizado no estudo de caso deste trabalho e segue basicamente duas operações: perduração e amostragem. Tem pelo menos três objetivos: a determinação dos tipos de solo em suas respectivas profundidades de ocorrência, a profundidade do nível d'água e os índices de resistência à penetração (N) a cada metro.

De acordo com Schnaid (2000):

O ensaio SPT constitui-se em uma medida de resistência dinâmica conjugada a uma sondagem de simples reconhecimento. A perfuração é realizada por trado e circulação de água utilizando-se um trépano de lavagem como ferramenta de escavação. Amostras representativas do solo são coletadas a cada metro de profundidade por meio de amostrador-padrão, de diâmetro externo de 50mm. O procedimento de ensaio consiste na cravação deste amostrador no fundo de uma escavação (revestida ou não), usando um peso de 65,0 kg, caindo de uma altura de 750 mm [...]. O valor N_{spt} é o número de golpes necessário para fazer o amostrador penetrar 30 cm, após uma cravação inicial de 15 cm. (Schnaid, 2000, p. 9)

Algumas das vantagens desse ensaio são: custo baixo, simplicidade de equipamento e resultado obtido que pode ser relacionado com fórmulas empíricas. A figura 4 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 4 – Esquema da perfuração por percussão e amostragem



Fonte: Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/ 3ª edição, p. 35.

No Quadro 1 elaborada pelo Professor e engenheiro civil Dickran Berberian temos referência qualitativa em relação ao número de golpes por camada.

Quadro 1 – Nspt x Qualidade da camada

Número de golpes de SPT "nSPT"	Qualificação da camada
< 10	Ruim
10 a 20	Razoável
20 a 25	Bom
25 a 30	Ideal

Fonte: Dickran Berberian.

2.1.2 Características específicas da edificação

Entender as características da obra é um dos aspectos decisivos na escolha da técnica de melhoramento do solo, no subtópico anterior apresentamos alguns tipos de solo e pontuamos a importância de se conhecer o solo para se realizar um tratamento, já neste subtópico queremos enfatizar outros aspectos além do solo que fazem parte desse processo.

Os fatores que estamos procurando se assemelham muito aos elementos necessários para um projeto de fundação, de acordo com Velloso et al. (2010) esses elementos são:

1-Topografia da Área (Levantamento topográfico planialtimétrico; Dados sobre taludes e encostas no terreno ou que possam em caso de acidente, atingir o terreno; Dados sobre erosões ou evoluções preocupantes na geomorfologia); 2- Dados Geológicos-Geotécnicos (Investigação do subsolo, preferencialmente em duas etapas: preliminar e complementar; Outros dados geológicos e geotécnicos, mapas, fotos aéreas e levantamentos aerofotogramétricos, artigos sobre experiências anteriores na área etc.); 3- Dados da Estrutura a Construir (Tipo e uso que terá a nova obra; Sistema estrutural; Cargas (Ações nas fundações); 4- Dados sobre construções vizinhas (Tipo de estrutura e fundações; Número de pavimentos, carga média por pavimento; Desempenho das fundações; Existência de subsolo; Possíveis consequências de escavações e vibrações provocadas pela nova obra). (Velloso et al., 2010)

As variáveis que o engenheiro dispõe para avaliar o comportamento das fundações projetadas ou seu desempenho estão dentro do sistema solo-fundação-estrutura e são quatro: superestrutura, infraestrutura, solo de fundação e espaço ambiental (Gusmão Filho, 2002). Sendo assim existem condicionantes para cada variável que estão relacionadas no Quadro 02.

Observa-se na variável da superestrutura que uma das implicações da escolha do material de construção da estrutura é quanto a sua capacidade de absorver as consequências de um recalque diferencial entre pilares, o aço ele resiste às tensões de compressão e tração, o que não acontece com outros materiais como o concreto armado.

Quadro 2 – Fatores condicionantes do sistema solo-fundação

VARIÁVEL	DISCRIMINAÇÃO	FATORES CONDICIONANTES
SUPER ESTRUTURA	SISTEMA ESTRUTURAL	Estruturas em vigas, pilares e lajes. Estruturas em pórtico, arco, treliça ou casca. Estruturas soltas, enterradas, ancoradas ou atirantadas
	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	Concreto armado. Concreto protendido. Aço. Alvenaria. Madeira. Presença de vidro em larga fachadas. Plásticos.
	DETALHE DE CONSTRUÇÃO	Existência de subsolo. Presença de juntas. Sequência de obra.
	TIPO DE CARREGAMENTO	Peso próprio. Sobrecarga móvel. Carga dinâmica. Vento. Água. Pressão das terras. Temperatura. Outros.
INFRA ESTRUTURA	TIPO DE PEÇA DE FUNDAÇÃO	Bloco. Sapata. Placa. Caixão. Estaca. Tubulão. Tirante. Cintas.
	GEOMETRIA	Dimensão das peças. Profundidade.
	MATERIAL	Concreto. Aço. Madeira.
	PROCESSO DE EXECUÇÃO	Cravação de estaca pré-moldada ou moldada in-situ. Cravação de estaca Méga por prensagem. Estaca escavada. Raiz. Estacão. Tubulão a ar-comprimido ou a céu aberto. Escavação. Escoramento. Rebaixamento do N.A.
	DETALHE DE CONSTRUÇÃO	Sequência de execução. Sapatas em cotas diferentes. Execução de estaqueamento em areia (vibração) ou em argila (levantamento). Papel das cintas na interação solo-estrutura.
SOLO DE FUNDAÇÃO	TIPO DE SOLO	Areia. Argila. Silte. Rocha. Turfa. Solos especiais expansivos e colapsíveis. Solos saprolíticos
	GEOMETRIA	Profundidade e espessura das camadas. Posição do N.A. . Direção de mergulho da rocha.
	DADOS GEOTÉCNICOS	Caracterização. Compressibilidade. Resistência. Permeabilidade. Mineralogia do solo.
	MELHORAMENTO DO TERRENO	Remoção. Substituição. Compactação. Injeção. Vibração. Drenos de areia. Estacas de brita. Geosintéticos.
	ALTERAÇÃO	Amolgamento. Densificação. Liquefação. Expansão. Colapso. Erosão interna
ESPAÇO AMBIENTAL	TIPO DE ESPAÇO	Vizinhos. Encostas. Planície. Beira mar. Vale de rio. Dunas. Falha geológica. Tálus.
	GEOMETRIA	Distância. Inclinação do talude. Direção de movimentos das dunas. Direção das fraturas da rocha.
	PROCESSO GEOLÓGICO	Cheia. Erosão. Abalos sísmicos. Cavernas subterrâneas. Instabilidade de taludes. Atividade tectônica. Erosão de leito. Erosão de costa. Erosão eólica. Avanço do mar.
	ATIVIDADE BIOLÓGICA	Panelas de formigas. Microrganismos na madeira. Canaliculos de termitas (cupins).

Fonte: Fundações: do conhecimento geológico à prática da engenharia, Gusmão Filho, 2002)

Podemos perceber nesse exemplo que o sistema solo-fundação-estrutura está interligado, sendo possível para esse caso projetar fundações com recalques maiores ou menores a depender da resposta da estrutura, colocar juntas em locais de carregamentos distintos ou modificar a sequência de execução de construção, como retardar a execução da alvenaria para esperar a acomodação dos carregamentos na estrutura, tendo em vista que a alvenaria tolera menos deslocamentos.

De acordo com U.S. Army Corps of Engineers (1999) os fatores a considerar em uma obra para se decidir por um determinado método de melhoramento de solo estão listados no Quadro 03, destacamos o estudo da localidade, o prazo de execução, a disponibilidade dos equipamentos e a experiência com conhecimento do executor da técnica.

Quadro 3 – Fatores para escolha do método de melhoramento

Características da edificação	○ Edifício novo ou existente ○ Assentamentos / deformabilidade da fundação admissíveis pela estrutura ○ Classe de consequência do edifício (Anexo B – EC0)
Condicionais do local a tratar	○ Dimensão da área a ser tratada ○ Zona urbana ou rural ○ Acessibilidades ao local ○ Presença de edificações vizinhas sensíveis às vibrações ○ Prever para a técnica a analisar se o tratamento é invasivo em relação aos terrenos vizinhos (micro-estacas, ancoragens, etc.)
Características específicas do solo	○ Tipo de solo a tratar ○ Profundidade e espessura (possança) da camada a tratar ○ Saturação do solo / profundidade do nível freático ○ Heterogeneidade do solo a tratar, com existência de diferentes camadas sobrepostas que necessitem de tratamento e eventual necessidade de considerar dois tratamentos distintos
Prazo de execução	○ Prazo de execução disponível para realizar o tratamento
Disponibilidade financeira e de equipamentos	○ Verba disponível para executar o tratamento ○ Disponibilidade de equipamentos do empreiteiro
Experiência	○ Experiência e conhecimento dos empreiteiros na execução da técnica

Fonte: Antunes (2016) – Dissertação de Mestrado (ISEL)

2.1.2.1 Superestrutura

Muitos projetistas limitam-se ao estudo das características do solo e da peça ou elemento de fundação para avaliar o desempenho e projetar, porém como vimos no Quadro 02, o autor Gusmão Filho (2002) nos alerta para a importância de outras variáveis para se alcançar o resultado mais acurado em um projeto de fundação, um deles é a superestrutura que pode ter naturezas diferentes, um sistema estrutural variado e portanto uma resposta a recalques diferenciais variada e consequentemente provocando diferenças na transmissão dos carregamentos ou gerando carregamentos variáveis.

As estruturas de um edifício podem ser feitas com materiais variados: concreto armado; aço; madeira; alvenaria estrutural ou misto. Essa variedade de material é responsável por limitar ou expandir as formas dos elementos como: vigas, pilares, lajes, pórticos metálicos, treliças, perfis estruturais, vigas laminadas, pilares de madeira, telhados estruturais, blocos cerâmicos, blocos de concreto, etc.

Além dos edifícios existem outras estruturas urbanas e de transporte como: pontes, passarelas, estádios, arenas, torres, mastros, barragens, rodovias elevadas, túneis, ferrovias, aeroportos. E existem estruturas que se utilizam do terreno como elemento de fundação e transmitem diretamente seus esforços ao solo, são alguns deles: Muros de arrimo e contenção, taludes estabilizados, barragens de terra e enrocamento, diques e estruturas de proteção contra enchentes, aterros, galerias subterrâneas, etc.

Ao se atentar para as estruturas é importante observar três aspectos: 1-Capacidade de resposta a recalques diferencial (Exemplo: Estruturas de aço são mais flexíveis do que de concreto armado); 2- Interação Solo-Estrutura (Exemplo: Estruturas rígidas redistribuem as cargas e reduzem os recalques diferenciais e solos de rigidez elevadas diminuem os recalques diferenciais); 3- Vida útil (Exemplo: A fundação deve ter vida útil compatível com a estrutura).

2.1.2.2 Tipos de Fundações

É de comum senso à diversos autores que as fundações são elementos infraestruturais responsáveis pela transmissão das cargas ou esforços de uma obra de engenharia ao terreno, porém quando a superestrutura repousa diretamente no terreno, admite-se que o solo é a própria fundação.

De acordo com Gusmão Filho (2002), na realização de um projeto de fundação deve se buscar: segurança técnica (segurança à ruptura do solo de fundação, da peça estrutural transmissora da carga ao solo, ao tombamento e deslizamento do conjunto da obra); desempenho (funcionalidade, estabilidade e aparência), economia e mercado.

As fundações são divididas normalmente em dois grupos: superficiais e profundas. A ABNT NBR 6122 define fundação rasa ou superficial como o elemento de fundação cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação, recebendo aí as tensões distribuídas que equilibram a carga aplicada; e as fundações profundas como o elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, sendo sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e no mínimo 3,0 m; quando não for atingido o limite de oito vezes, a denominação é justificada.

Os principais tipos de fundações superficiais são: sapatas, sapatas associadas, blocos, viga de fundação e radier. E os principais tipos de fundações profundas são: estacas (Strauss, Franki, Raiz e Hélice Contínua) e tubulão.

2.1.2.3 Avaliação econômica

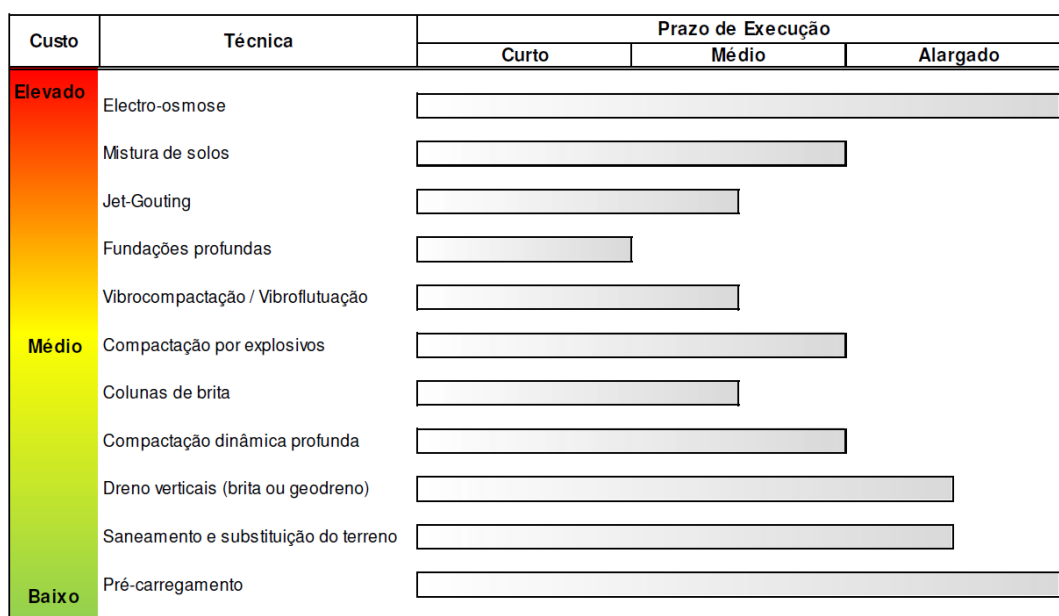
A decisão a partir de uma avaliação econômica entre realizar um melhoramento de solo ou uma fundação convencional depende principalmente da possibilidade que o solo e a obra dão para uma variedade de fundações, por exemplo, dependendo do tipo de solo e da exigência de carregamento, uma fundação profunda é indispensável, porém outras obra podem permitir uma diversidade de soluções. Neste caso é possível realizar um estudo das alternativas baseando-se no custo, tempo de execução e disponibilidade de equipamentos e mão de obra.

Esse estudo das possibilidades geralmente irá incluir os tipos de soluções em fundação superficial permitidos pela obra, caso o solo seja resistente, seus custos e prazos; ou os tipos de

fundações profundas, caso o solo exija o alcance de uma resistência em profundidade; ou um melhoramento de solo para viabilizar fundações rasas, dando opções de técnicas de melhoramento, seus custos e prazos. Entram nesse estudo alguns fatores que podem interferir numa escolha aparentemente óbvia, tais como o custo com o material (volume de concreto, aço etc.), movimentações de terra, rebaixamento do nível d'água, custo com mão de obra, equipamentos, logística e tempo de execução.

Devido o melhoramento as sapatas podem ser projetadas para suportar cargas mais elevadas, diminuindo os volumes de escavação e de concreto, em outros casos o melhoramento pode ajudar a reduzir a quantidade e profundidade de estacas e o volume dos blocos de coroamento. A figura 5 relaciona algumas técnicas de melhoramento com os seus respectivos custos e prazos de execução.

Figura 5 – Aplicabilidade dos métodos de melhoramento x custo e prazo de execução



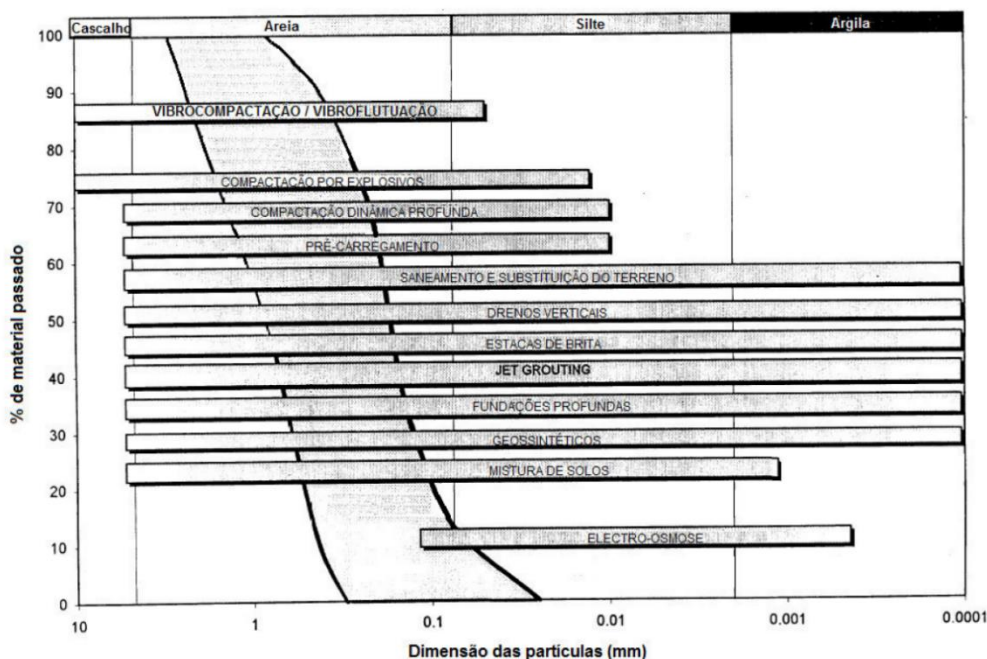
Fonte: Antunes (2016) – Dissertação de Mestrado (ISEL)

2.1.3 Técnicas de melhoramento de solo

De acordo com Antunes (2016), depois de realizada a investigação geotécnica do solo, análise dos carregamentos do edifício, a compatibilidade da estrutura-fundação-solo no que diz respeito a capacidade de carga é possível ter a percepção da necessidade de um melhoramento de solo. A partir desse ponto é realizado um estudo das técnicas, suas aplicações (tipo de solo, tipo de intervenção, profundidade máx.), vantagens e desvantagens, para melhor tomada de decisão. As principais técnicas estão mencionadas nas figuras 5 e 6.

A classificação dos métodos de melhoramento de solo quanto à sua aplicação em solos coesivos e granulares, mostrada na figura 6 a seguir, é uma das primeiras análises realizadas.

Figura 6 – Aplicação das técnicas de melhoramento x granulometria



Fonte: U.S. Army Corps of Engineers (1999)

Essa classificação nos dá uma indicação quanto a necessidade de conhecermos o solo para escolha do tipo de técnica de melhoramento, nesse caso específico a granulometria pode nos dar indicativos de que determinada técnica ira ter a eficiência necessária em um tipo de solo, por exemplo, a execução de estacas de areia e brita em solos com a presença de finos saturado apresenta menor resistência ao cisalhamento, podendo provocar a perda de estabilidade lateral das colunas por causa de deformações do solo ao redor das colunas.

Diversos autores concordam que as técnicas de melhoramento de solo são essenciais para aumentar a capacidade de carga do solo, reduzir recalques e distorções angulares e prevenir a ocorrência de liquefação em situações de carregamentos dinâmicos. Esse processo busca viabilizar

a construção em solos problemáticos, utilizando-os de maneira adequada e atendendo tanto aos critérios técnicos quanto econômicos.

2.1.3.1 Estacas de Argamassa

A técnica de melhoramento de solo utilizada nesse trabalho foi de estacas de argamassa, que de acordo com Gusmão Filho (2002) é uma variação das estacas de areia e brita desenvolvidas em Recife, por causa das difíceis condições do subsolo. O material utilizado na verdade é concreto simples e é empregado quando é detectado a presença de camadas argilas moles superficiais, o método é aplicado nesse caso para redução dos recalques.

O equipamento utilizado pode ser o mesmo das estacas de areia e brita, realizado através da cravação dinâmica de um tubo metálico (300mm) até a profundidade especificada em projeto, através de um bate estaca tipo Franki de menor porte, com pilão entre 15 e 25 kN de peso e altura de queda de 3 a 7 m. O procedimento também pode ser realizado por vibração, como descrito por Sampaio (2024):

O procedimento começa com o posicionamento do tubo verticalmente no prumo, assim como na cravação dinâmica, porém, a cravação do tubo, que possui uma tampa em sua extremidade inferior, é realizada por vibrações geradas por um martelo vibratório. Ao atingir a profundidade definida no projeto, o material a ser compactado é lançado na parte superior do tubo com o auxílio de uma retroescavadeira equipada com um funil. Em seguida, o martelo vibratório inicia o processo de retirada do tubo, também gerando vibrações. A tampa na extremidade inferior do tubo é então aberta, permitindo que o material forme a estaca de compactação. Seu grande benefício em relação ao método de cravação dinâmica é o fato de causar menos impacto na vizinhança (Sampaio, 2024, p. 33).

Após a realização da técnica de melhoramento em estacas de argamassa, devem ser realizados três controles: sondagens a percussão, ensaios de placa e monitoramento de recalques. Para uma melhor comparação, recomenda-se que os novos furos de sondagem sejam realizados o mais próximo dos antigos (Gusmão Filho, 2002).

2.1.4 Metodologia para escolha da técnica de melhoramento

Antunes (2016) desenvolveu uma metodologia para escolher a melhor técnica de melhoramento de solo, ela se divide em duas etapas: 1ª Fase – Identificação do problema para separação do conjunto de técnicas adequadas para o tratamento; 2ª Fase – Considerar um conjunto de fatores relativos as características da edificação, a localidade, ao terreno, prazos, disponibilidade dos métodos, equipamentos equipes, custos. Essas etapas foram citadas neste trabalho nos subtópicos.

Com base nessas duas etapas é possível escolher quais metodologias são aplicáveis a obra em análise, reduzindo a quantidade de opções e sistematizando o processo da tomada de decisão. No Quadro 04 a seguir estão listados os fatores a considerar na 2ª Fase.

Quadro 4 – Fatores para escolha do método de melhoramento

Edificação	Edifício Novo / Existente	Novo
	Assent. Admissíveis	Existente
		Grandes
Condicionalismos do local a tratar	Dimensão Área a tratar	Pequenos
		Grande
	Tipo de Zona	Pequena
		Urbana
	Acessibilidades	Rural
		Boas
	Edificações Vizinhas	Más
Sim		
Características do terreno	Tipo de solos	Não
		Cascalheira
		Areia
		Silte
	Profundidade máxima	Argila
		< 5 m
		5 ~ 10 m
		10 ~ 30 m
	Nível Freático	> 30 m
		Saturado
		Parcial
Terreno Heterogéneo	Seco	
	Sim	
Prazo de Execução	Não	
	Alta	
Disponibilidade Financeira	Alargado	
	Baixa	

Fonte: Antunes (2016) – Dissertação de Mestrado (ISEL)

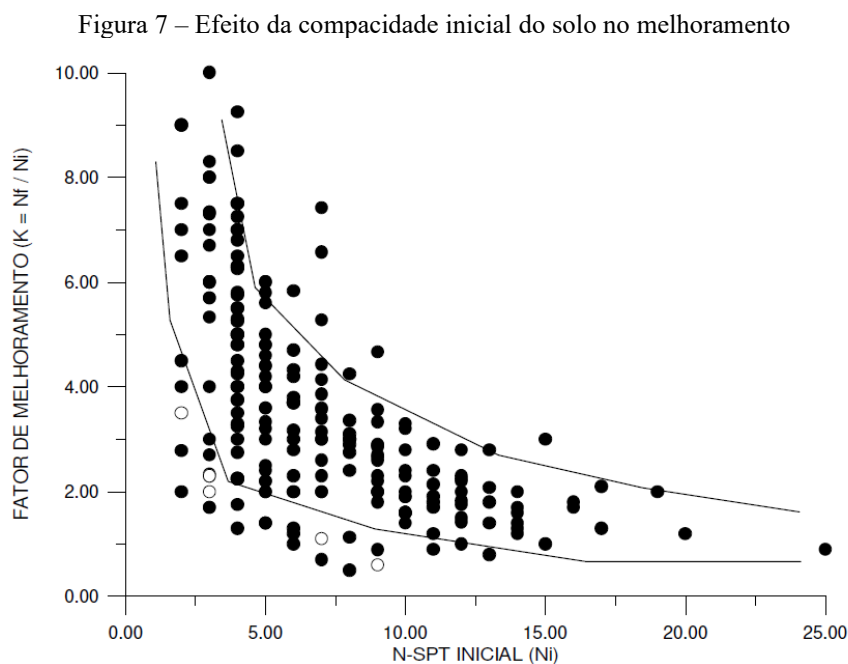
Com base na análise dos diversos métodos de tratamento, de acordo como cada um se adequa aos fatores é selecionada a técnica.

2.2 EFICIÊNCIA DO MELHORAMENTO

Segundo Gusmão Filho e Gusmão (2000), os fatores influentes no melhoramento do solo com estacas de compactação são: granulometria, compacidade inicial do solo, energia de compactação e espaçamento entre as estacas.

De acordo com Amorim et al. (2013), o controle em sua maior parte é realizado apenas com sondagens SPT, antes e depois do melhoramento, devido à escassez de dados de prova de carga em placas de solos melhorados.

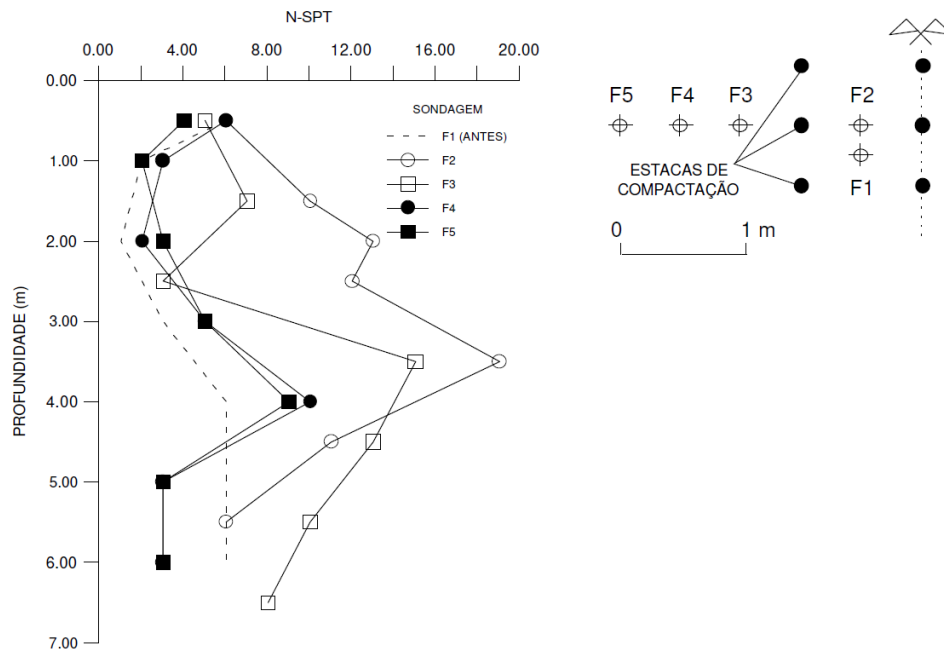
O fator de melhoramento K relaciona o N_{spt} inicial e o N_{spt} final, $K = N_f/N_i$. Na figura 7 é possível perceber uma tendência de comportamento, quanto maior a compacidade inicial do solo, menor o aumento no N_{spt} , pois menor é o volume de material adicionado, por isso quanto maior a energia de compactação, maior o K . Para solos com N_{spt} inicial, antes do melhoramento, superiores a 20 golpes/30cm, o melhoramento tende a ser ineficaz ($N_i > 20$; $K \leq 1$).



Fonte: Gusmão Filho e Gusmão (2000)

A figura 8 mostra o raio de ação da estaca de melhoramento, sendo de 2 a 2,5 vezes o diâmetro da estaca, notamos esse resultado através dos ensaios de SPT posicionados em distâncias diferentes. Portanto a malha de distribuição deve ter de 4 a 5 vezes o diâmetro e cobrir a lâmina da edificação sob todas as sapatas.

Figura 8 – Influência da distância lateral no melhoramento



Quando há uma excessiva fração de finos no solo os efeitos do melhoramento diminuem bastante. Em praticamente todas as obras, o melhoramento apresenta baixa eficiência até 1,5m de profundidade. Fato é explicado devido à falta de confinamento do solo próximo a superfície do terreno, que provoca levantamento das camadas mais superficiais com a compactação. (Tabosa Filho, 2022)

2.3 CAPACIDADE DE CARGA (TENSÃO ADMISSÍVEL) DO SISTEMA SAPATA-SOLO

A tensão admissível do solo pode ser estimada através de métodos semiempíricos, para tanto são considerados alguns fatores: profundidade, dimensões e formas das fundações; características do terreno abaixo do nível da fundação e lençol d'água. Como descritos por Teixeira (1998) e Décourt e Quaresma (1978), respectivamente, a seguir.

Tensão admissível (Teixeira, 1998) – $\sigma_{adm} = 20 \times N_{spt} \text{ (kN/m}^2\text{)} = N/5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$

Tensão admissível (Décourt e Quaresma, 1978) * – $\sigma_{adm} = 0,1 \times N_{spt} \times 100 \times (B/1,5)^{0,5}$

*Fórmula para areias.

Onde: N_{spt} – Média aritmética simples dos valores de N_{spt} que se encontram dentro da influência do bulbo de tensões. A área de influência do bulbo de tensões equivale a duas vezes o valor da menor dimensão B da sapata. Válida para solo natural no intervalo $5 \leq N \leq 20$.

O intervalo de validade busca não permitir o emprego de fundações rasas no solo mole ou fofo ($N < 5$) e limitar a tensão admissível máxima para 400 kPa, valores mais elevados apenas com ensaios específicos e com auxílio de especialistas. O emprego das expressões pressupõe que abaixo da cota de apoio das sapatas os solos não tenham características inferiores.

Os métodos semiempíricos relacionam resultados de ensaios (tais como o SPT, CPT etc.) com tensões admissíveis ou tensões resistentes de cálculo. Devem ser observados os domínios de validade de suas aplicações, bem como as dispersões dos dados e as limitações regionais associadas a cada um dos métodos (NBR 6122: 2018, p. 22). É possível também utilizar de tabelas empíricas como da figura a seguir:

Figura 9 – Relações entre índice de resistência e taxas admissíveis

Areia		Nº de golpes SPT	Tensão Admissível (Kg/cm²)	
Fofa		≤ 4	< 1,0	
Pouco Compacta		5 - 10	1,0 - 2,0	
Medianamente Compacta		11 - 30	2,0 - 4,0	
Compacta		31 - 50	4,0 - 6,0	
Muito Compacta		> 50	> 6,0	
Argila	Nº de Golpes SPT	Tensões Admissíveis (Kg /cm²)		
		Sapata Quadrada	Sapata Contínua	
Muito Mole	≤ 2	< 0,30	< 0,20	
Mole	3 - 4	0,33 - 0,60	0,22 - 0,45	
Média	5 - 8	0,60 - 1,20	0,45 - 0,90	
Rija	9 - 15	1,20 - 2,40	0,90 - 1,80	
Muito Rija	16 - 10	2,40 - 4,80	1,60 - 3,60	
Dura	> 30	> 4,80	> 3,60	

Fonte: Prospecção Geotécnica do Subsolo (Maria José Porto 1979)

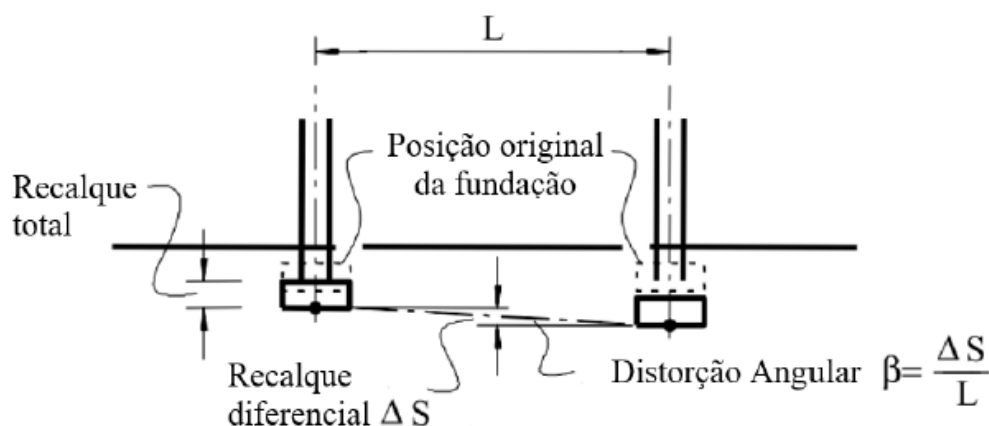
2.4 RECALQUE ADMISSÍVEL

Gusmão Filho (2002, p. 163) afirma: “o recalque resultante do carregamento do solo deve ser admissível para a obra, quer do ponto de vista de sua segurança estrutural, como de sua funcionalidade e uso, e eventualmente de sua aparência” e Santos (2020, p. 14) diz: “Para avaliar o desempenho de fundações de edificações, três critérios básicos que devem ser satisfeitos em relação aos danos causados às estruturas pelos movimentos de fundações, são eles: aparência; funcionalidade e estabilidade.”

Burland e Wroth (1974) apresentaram uma padronização de terminologia e símbolos a serem usados no estudo de movimento de fundações, a figura 10 ajuda a explicar eles. Os principais tipos de movimentos são:

- Recalque total (ρ): é o movimento descendente de um pilar ou elemento de fundação;
- Recalque diferencial (δ): é a diferença entre o recalque total de dois pilares ou elementos de fundação;
- Distorção angular, ou rotação relativa (β): a razão entre o recalque diferencial e a distância entre dois pontos.

Figura 10 – Definição de recalque total, diferencial e distorção angular



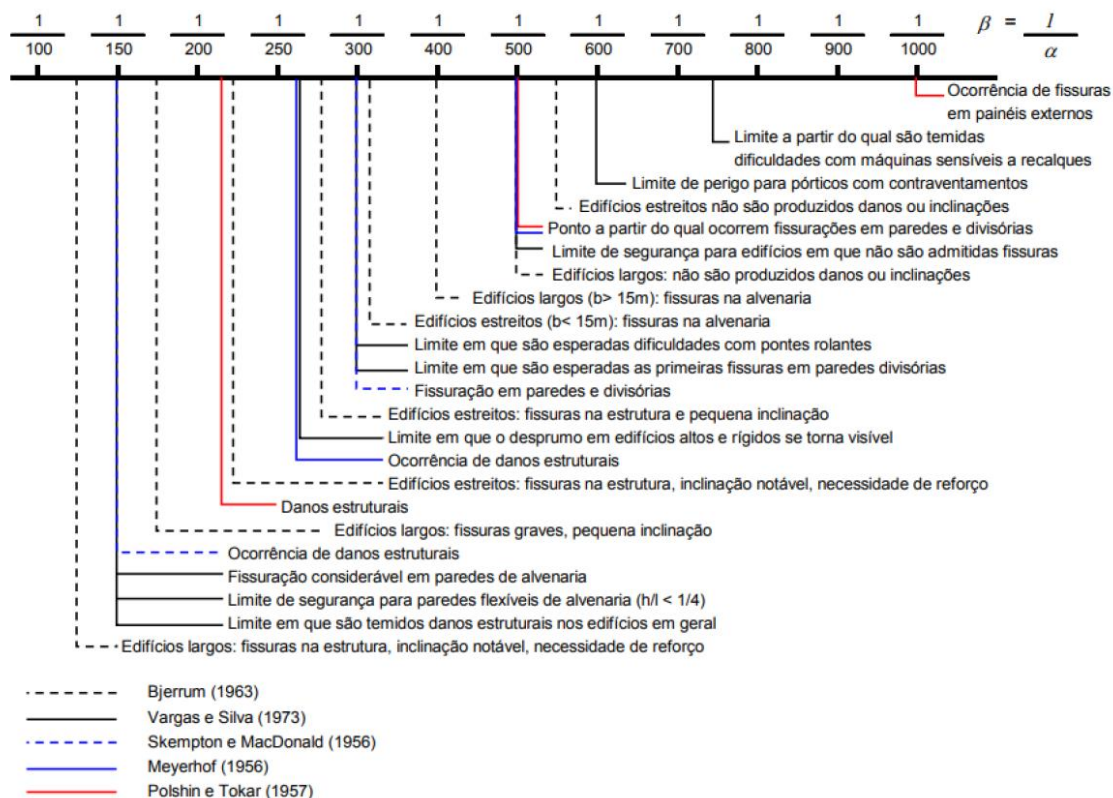
Fonte: Poulos et al. (2001).

De acordo com Cintra et al. (2003), os deslocamentos admissíveis máximos suportados pela estrutura e sem prejuízo aos estados-limites de serviço, tanto os absolutos quanto os relativos, devem ser calculados e definidos pelo projetista.

Os critérios de distorção angular, baseados em diversos estudos feitos por autores como Bjerrum (1963), Vargas e Silva (1973), Skempton e MacDonald (1956), Meyerhof (1956) e Polshin e Tokar (1957), mostrados na Figura 11, devem ser analisados com cautela, pois

dependem de alguns fatores, tais como: tipo e características do solo, tipo da fundação, tipo, porte função e rigidez da superestrutura e propriedades dos materiais empregados. O engenheiro deve distinguir as obras corriqueiras das especiais (edifícios altos, vãos grandes, vigas de grande inércia etc.). Alguns autores recomendam o limite de β para prédios altos entre 1/1.200 e 1/2000, (acima disso para paredes de alvenaria estrutural).

Figura 11 – Distorção angular e danos relacionados



Fonte: Velloso e Lopes (1997, adaptado por ALVAREZ DE BARROS, 2005)

Segundo Poulos et al. (2001, apud Santos, 2020, p. 16), os edifícios de concreto armado não podem exceder valores entre 50 mm e 75 mm, de recalque total ($\rho_{\text{máx}}$), para terrenos arenosos e entre 75 mm e 135 mm para terrenos argilosos. Já outros autores como Burland et al. (1977) são mais conservadores, aceitando valores limites entre 40 mm e 65 mm para sapatas isoladas, de solos arenosos e argilosos, respectivamente.

Skempton-Macdonald (1956), recomenda valores máximos para recalques diferenciais ($\delta_{\text{máx}}$) de 25 mm (areias) e 40 (mm) (argilas), e para distorções angulares (β) valores superiores a 1/500. O início das fissuras em alvenaria é percebido para $\beta > 1/300$ e danos estruturais em $\beta > 1/150$.

Para Teixeira e Godoy (1998):

Teoricamente, uma estrutura que sofresse recalques uniformes não sofreria danos, mesmo para valores exagerados do recalque total. Na prática, no entanto, a ocorrência de recalque uniforme não acontece, havendo sempre recalques diferenciais decorrentes de algum tipo de excentricidade de cargas, ou heterogeneidade do solo. A limitação do recalque total é uma das maneiras de limitar o recalque diferencial. (Teixeira e Godoy, 1998, p. 262)

Acerca das medições dos recalques Gusmão (2006, p. 207)) afirma: “é [...] a grande solução para se acompanhar o desempenho de uma edificação, inclusive a interação solo-estrutura.”, esse método de instrumentação é simples e é realizado através de leituras dos pinos engastados nos pilares, com um nível ótico de precisão, em relação a uma referência de nível fixa.

O intervalo da leituras é feito em função da variação da velocidade dos recalques, quanto mais rápido for essa variação, menor o tempo entre leituras. A velocidade é medida em μ /dia. O quadro 05 mostra uma sugestão de valores admissíveis de velocidades de recalques para cada condição da edificação.

Quadro 529 - Velocidade admissíveis de recalques em edifícios

Condição da edificação		Velocidade	Característica
Prédios com mais de 5 anos de construção, se estabilizados		Acima de 40 μ m/dia	Muito alta
		De 20 a 40 μ m/dia	Moderada a alta
		Abaixo de 20 μ m/dia	Normal
Prédios com idade entre 1 e 5 anos		Até 30 μ m/dia	Aceitável
Prédios em Construção	Fundações Rasas	Até 200 μ m/dia	Normal
	Fundações Profundas	Até 100 μ m/dia	Normal

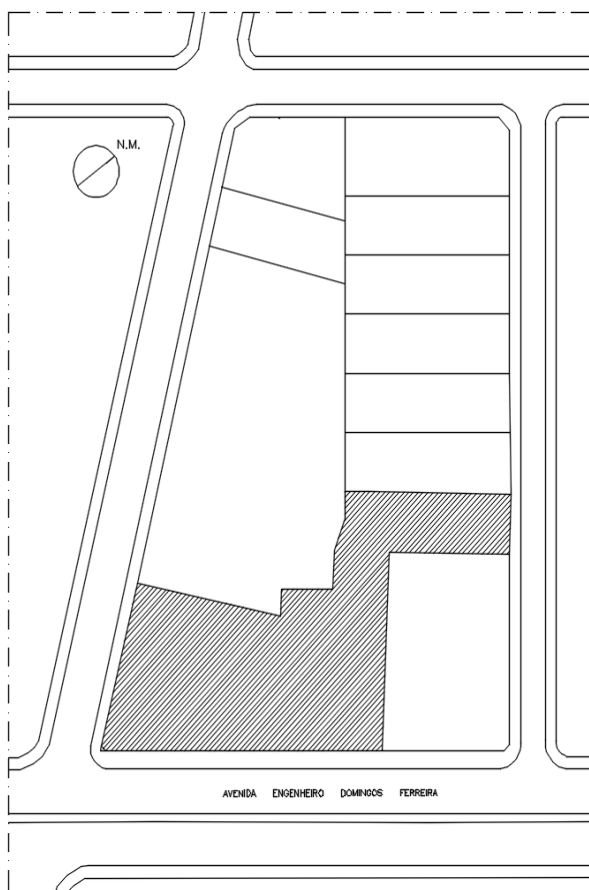
Fonte: Alonso (1991)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA OBRA

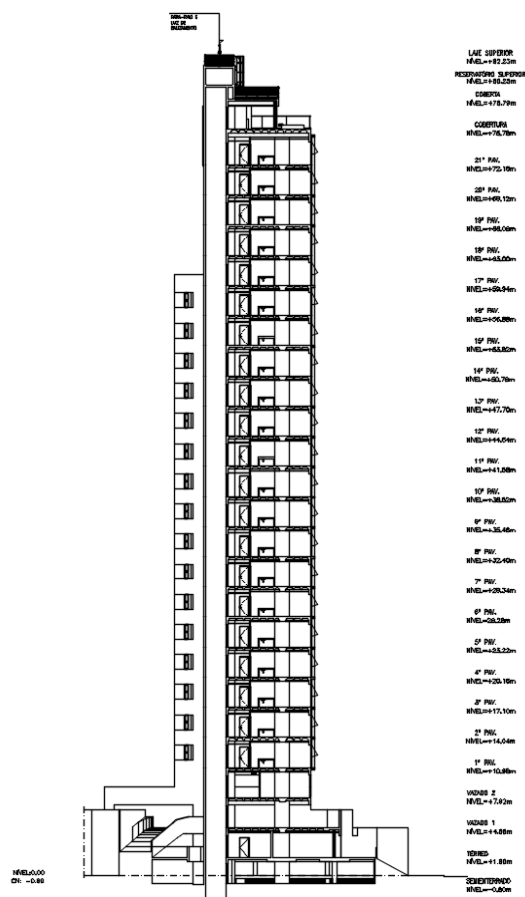
O estudo de caso foi realizado em um empreendimento com tipo de ocupação residencial e comercial, composto por um edifício de 27 pavimentos ao todo, atingindo uma altura de 84,25 m, divididos entre Semienterrado, Térreo, Vazado 01, Vazado 02, 21 Tipos, Cobertura, Coberta e Ático, contendo 197 unidades sendo a primeira delas uma loja no térreo e 196 unidades de apartamento. A área do terreno é de 2.512,96 m², perímetro de 290 m e a área total construída é 13.491,51 m². A figura 12 nos mostra a planta de situação adaptada pelo autor.

Figura 12 – Planta de situação



Fonte: Empresa projetista de arquitetura

Figura 13 – Corte esquemático do edifício



Fonte: Empresa projetista de arquitetura

Conforme a Figura 14 e Figura 15 mostram, a obra está localizada no bairro de Boa Viagem, na cidade de Recife, capital do estado Pernambucano. A distância da obra até a praia é de 350 m e da obra até a Via Mangue de 640 m (Figura 14).

Figura 14– Vista de satélite da localização aproximada da obra



Fonte: Google Earth 2022

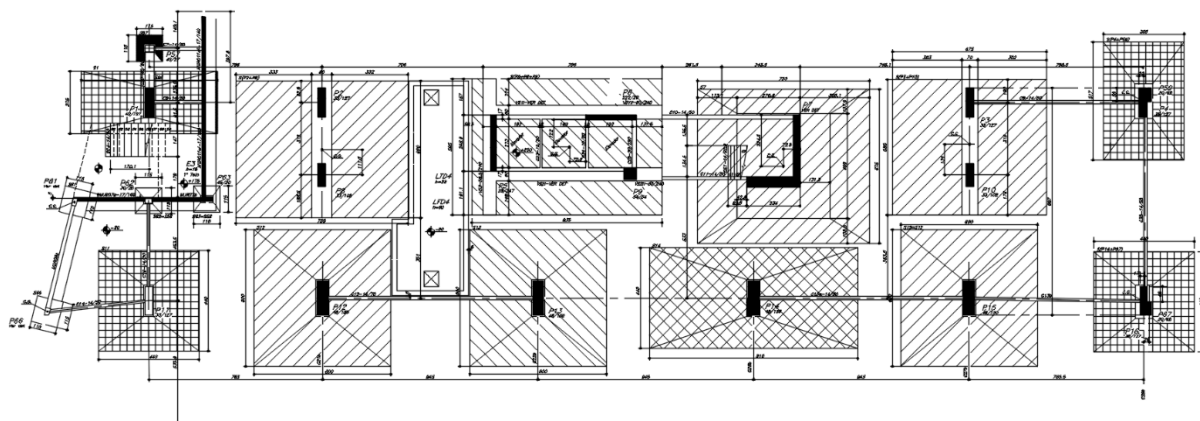
Figura 15 – Vista 3D da localização da obra



Fonte: Google Earth 2013

A obra possui 18 Pilares na sua lâmina principal, com cargas variando entre 385 tf e 1540,9 tf, distribuídos em 12 sapatas, sendo 5 delas associadas, conforme vemos na Figura 16. No total são 86 pilares e 60 sapatas em toda extensão da edificação.

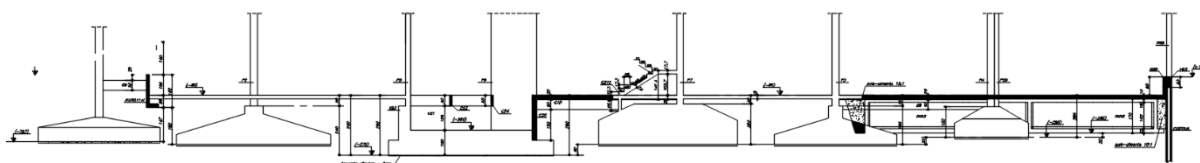
Figura 16 – Projeto de Forma de Fundação da lâmina principal



Fonte: Empresa projetista estrutural

A figura 17 mostra um corte que passa pelas sapatas S1, S(P2+P8), S(P5+P6+P9), S7, S(P3+P10) e S(P4+P59), nessa ordem, da esquerda para direita, nela podemos identificar que as sapatas estão em cotas de arrasamento diferentes variando entre -2,85 m e -3,70 m.

Figura 17 – Corte do Projeto de Forma de Fundação



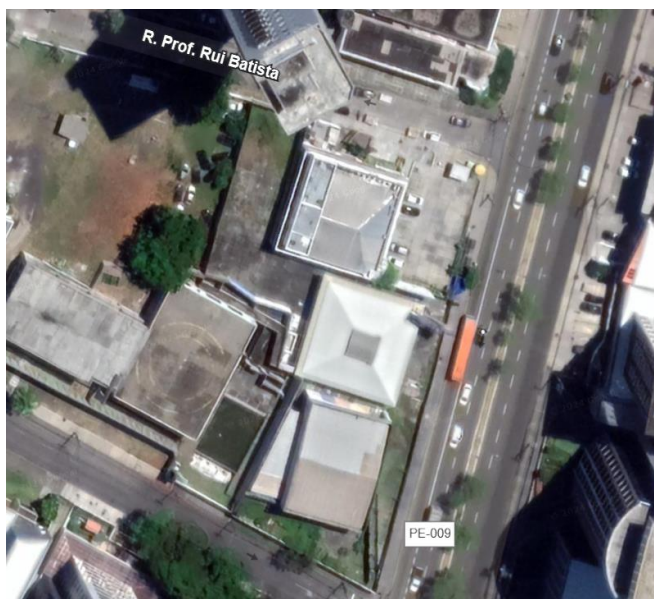
Fonte: Empresa projetista estrutural

3.2 MÉTODO DE SONDAGEM DO SOLO

A sondagem, o estudo geotécnico e o levantamento planialtimétrico foram realizados por empresas especializadas, atendendo as normas técnicas vigentes, ABNT NBR 8036 – Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundação de edifícios e ABNT NBR 13133 – Execução e levantamento topográfico, respectivamente. Esses estudos serviram de base para a elaboração dos Projetos Estruturais e de Fundações.

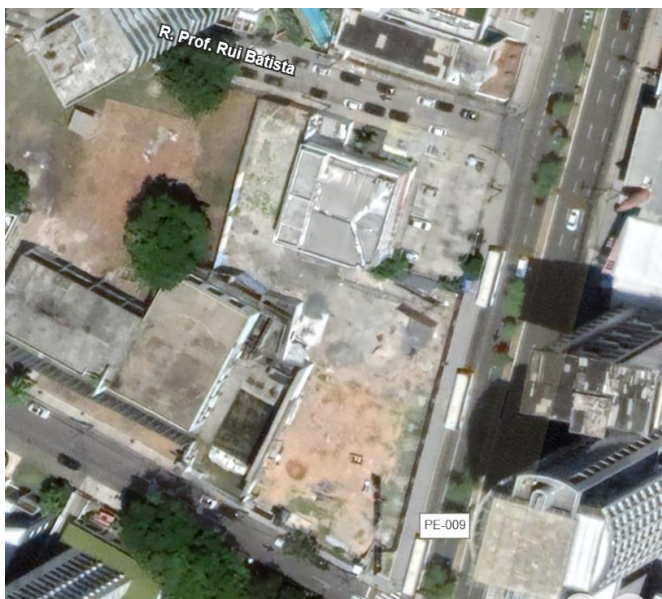
Para a implantação da edificação foi realizado a demolição das construções e pisos existentes, limpeza mecanizada do terreno e posterior terraplanagem para cota -0,80 m, como mostram as Figuras 18 e Figura 19, conforme cotas do Projeto Estrutural e de Fundações. Esses serviços foram executados atendendo às Normas de Segurança vigentes. O canteiro foi provido de instalações Provisórias e de Segurança, atendendo aos requisitos da norma regulamentadora do Ministério do Trabalho NR-18 – Condições e meio ambiente de Trabalho na Construção Civil.

Figura 18 – Vista superior do terreno da obra antes da demolição da edificação existente



Fonte: Google Earth - 08/09/2020

Figura 19 – Vista superior do terreno da obra após a demolição da edificação existente



Fonte: Google Earth – 07/12/2021

Inicialmente foram realizadas sondagens do tipo SPT (Standard Penetration Test), seguindo a ABNT NBR 6484 com a finalidade de determinar os tipos de solos e suas respectivas profundidades, a posição do nível d'água e os índices de resistência a penetração (N). A figura 20 mostra uma foto do ensaio sendo realizado na obra.

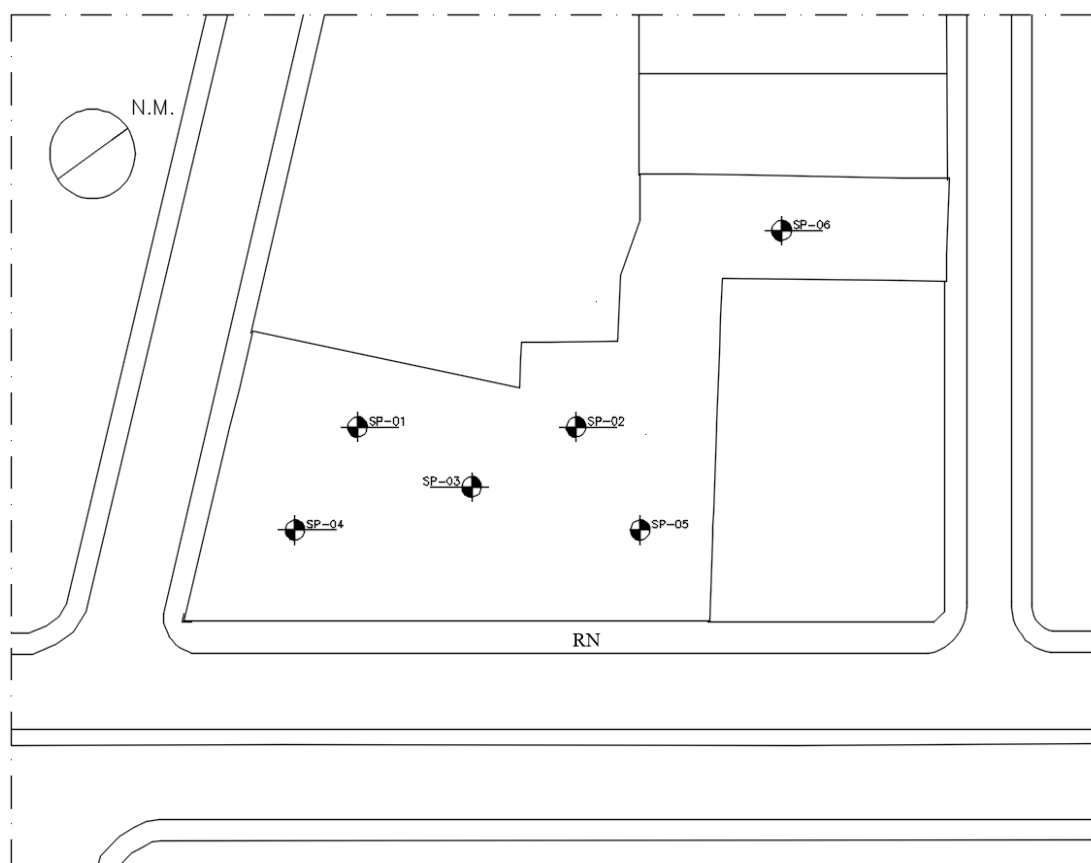
Figura 20 – Ensaio SPT



Fonte: Registro de Obra (2021)

A figura 21 mostra a localização dos 6 primeiros furos de sondagem realizados antes do melhoramento do solo em 2021 pela Empresa Terra Forte fundações Ltda. Os boletins de sondagem revelam a predominância de três principais tipos de solos: areia fina à média siltosa cor cinza; argila orgânica siltosa com fragmentos de concha e areia grossa e média com pedregulho, de média a rija; areia média, fina e grossa pouco siltosa com muitos pedregulhos, a marelada, muito compacta. As sondagens foram em média até uma profundidade de 48,5m, após isso o solo torna-se mais resistente e quando atingidos os critérios de paralisação definidos pela NBR 6484 (Subtópico 6.4) as sondagens foram encerradas.

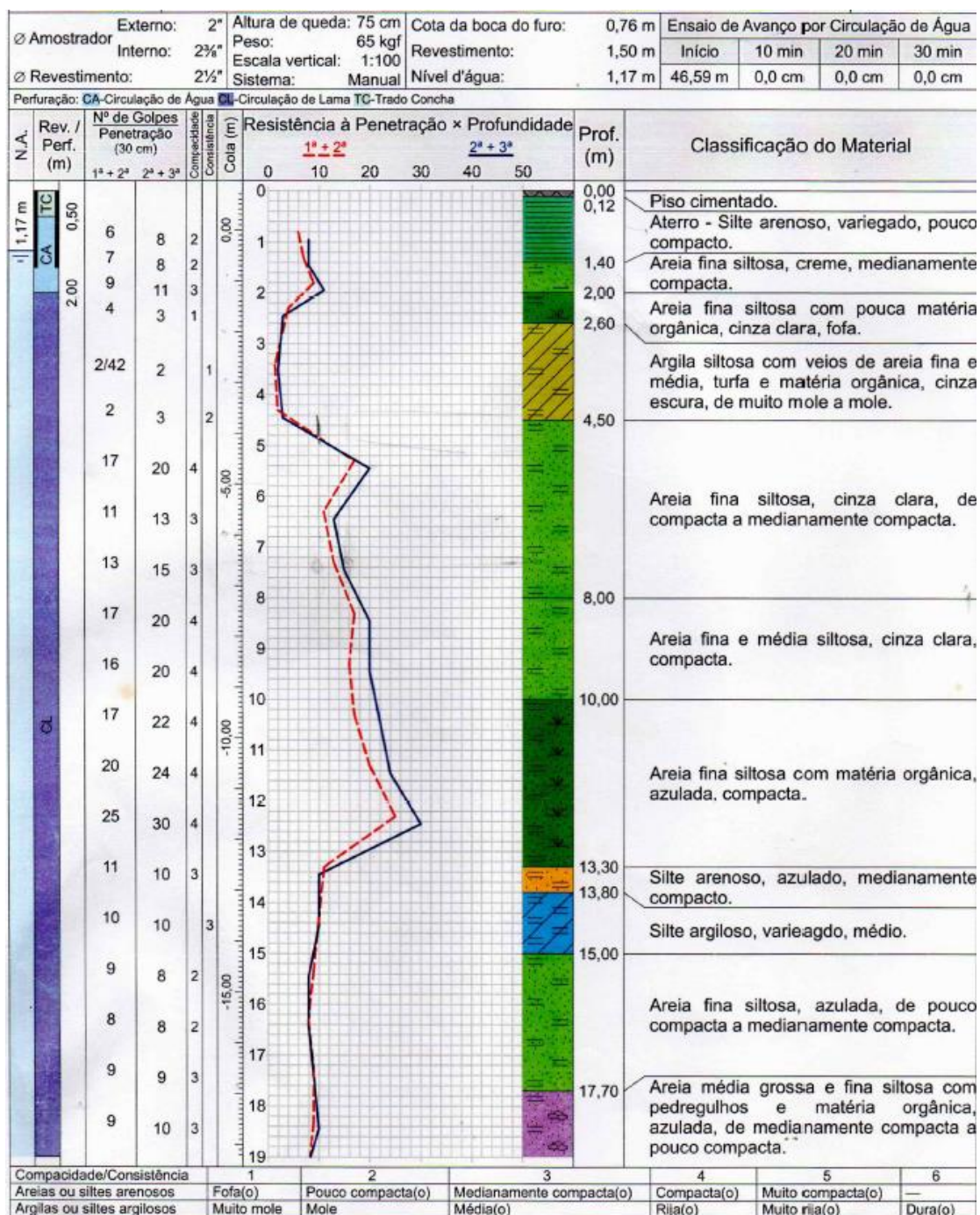
Figura 21 – Localização dos primeiros furos de sondagem



Fonte: O Autor (2025)

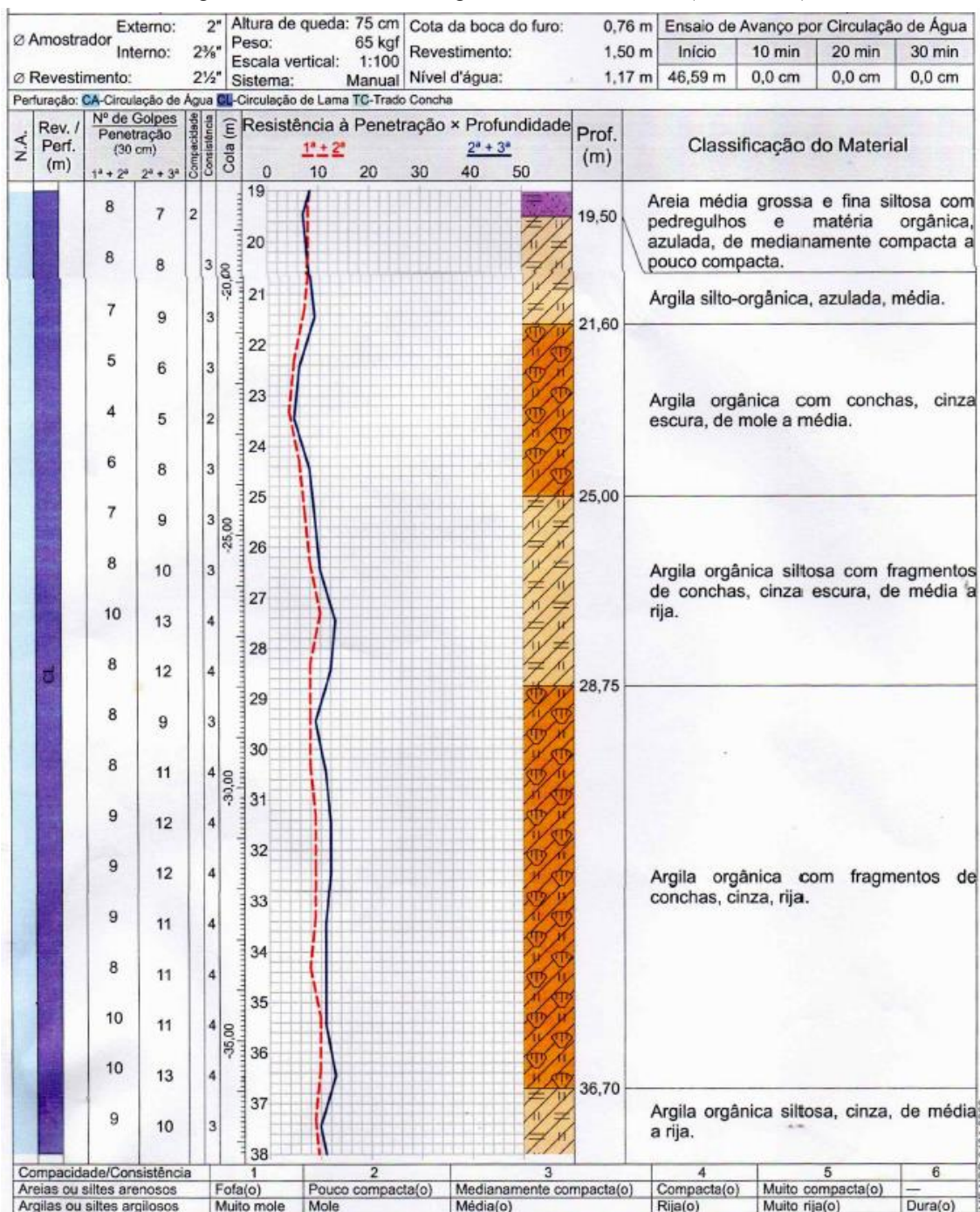
A seguir, nas Figuras 22 a 24, é apresentado uma amostra de um boletim de sondagem dos primeiros furos (SP-001), com valores médios do índice de resistência à penetração NSPT. Os demais boletins (SP-002 a SP-006) seguem o mesmo padrão e estão expostos no ANEXO A.

Figura 22 – Boletim de sondagem SP-001 Parte 01/03 (22/06/2021)



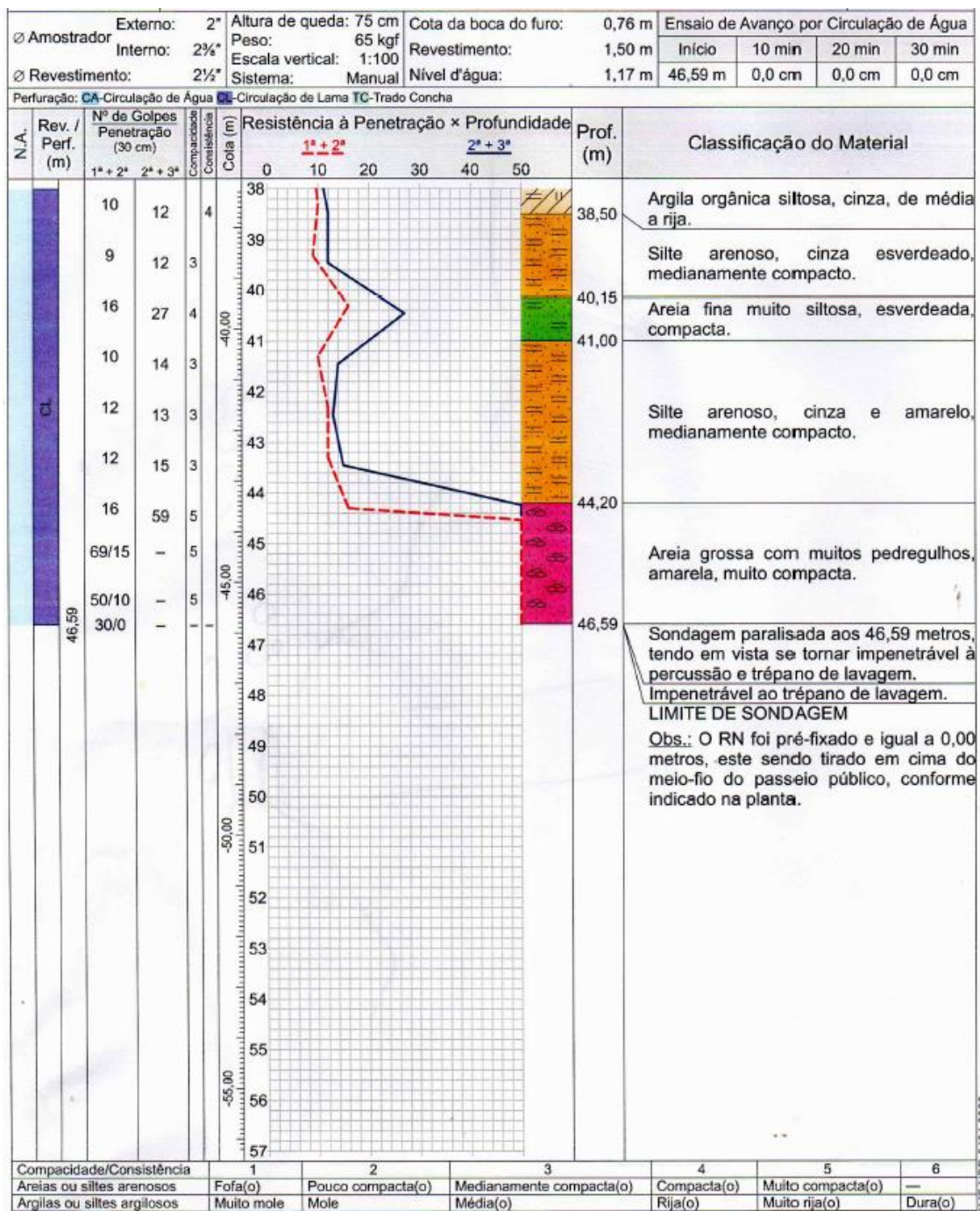
Fonte: Empresa responsável pelas sondagens

Figura 23 – Boletim de sondagem SP-001 Parte 02/03 (22/06/2021)



Fonte: Empresa responsável pelas sondagens

Figura 24 – Boletim de sondagem SP-001 Parte 03/03 (22/06/2021)



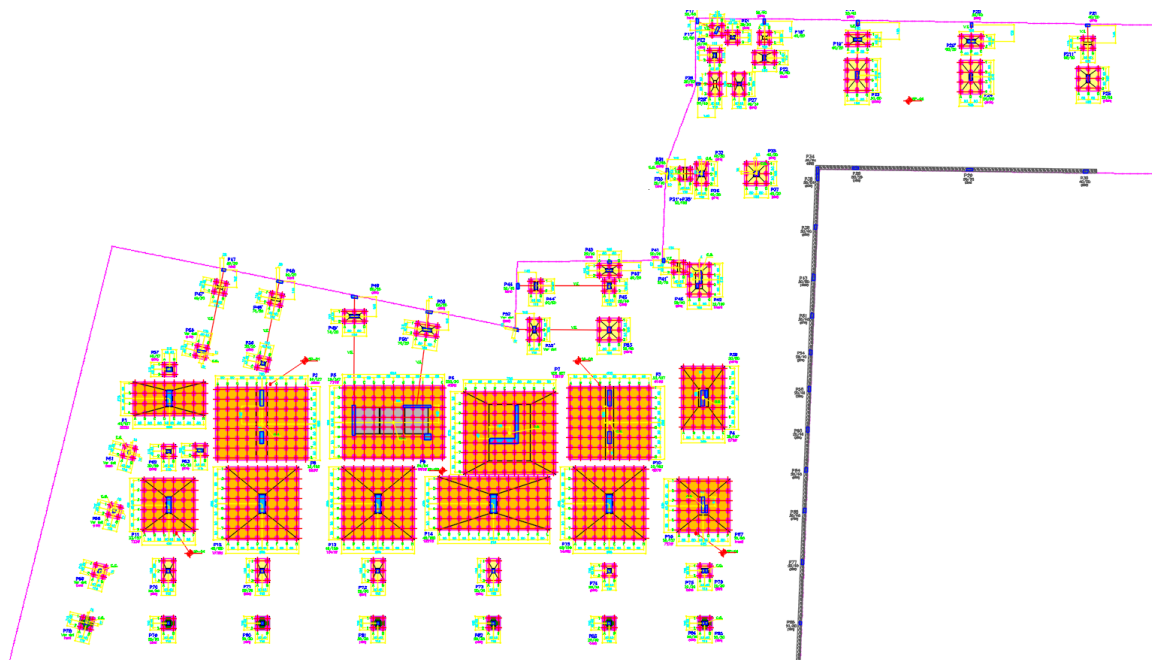
Fonte: Empresa responsável pelas sondagens

3.3 DISTRIBUIÇÃO DAS ESTACAS DE COMPACTAÇÃO

A técnica de melhoramento de solo escolhida foi a realização de colunas de compactação em argamassa, optada devido aos problemas de execução de estacas de areia e brita em solos com a presença de finos e o nível de água elevado, ou seja, um solo saturado com finos, apresenta menor resistência ao cisalhamento, podendo provocar a perda de estabilidade lateral das colunas por causa de deformações do solo ao redor das colunas. Além disso, o mecanismo de densificação se dá através do deslocamento de solo causado pela cravação do tubo metálico num solo com argila siltosa saturada, provocando o aumento da pressão neutra.

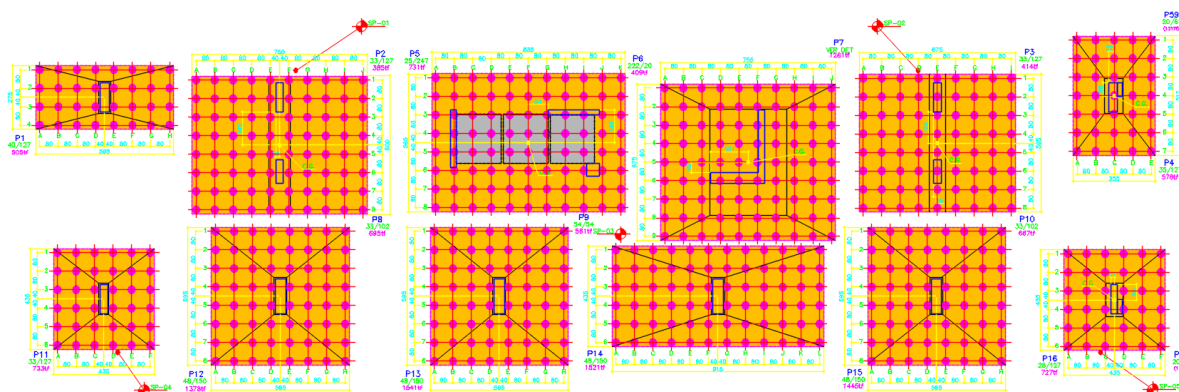
Foram executadas 992 colunas de argamassa com martelo vibratório e tubo de ponta fechada com 280 mm de diâmetro, comprimento de 6,00 m e espaçamento de 0,8 m, totalizando 5.952,00 m de colunas. Destas, 733 colunas estão sob as 12 sapatas da superestrutura principal e 259 sob as 48 sapatas restantes, conforme vemos nas Figuras 25 e 26. O traço solicitado em projeto foi de 1 (cimento): 6 (areia): 3 (brita 38 mm). A execução durou do dia 03/05/2022 até 17/06/2022, totalizando 47 dias. Destes, 29 dias úteis, resultando numa produtividade de 992 estacas / 34 dias = 29 estacas/dia e totalizando 174 m/dia (29 estacas/dia*6m/estaca).

Figura 25 – Planta de locação das colunas de compactação em argamassa



Fonte: Empresa responsável pelo projeto de melhoramento de solo

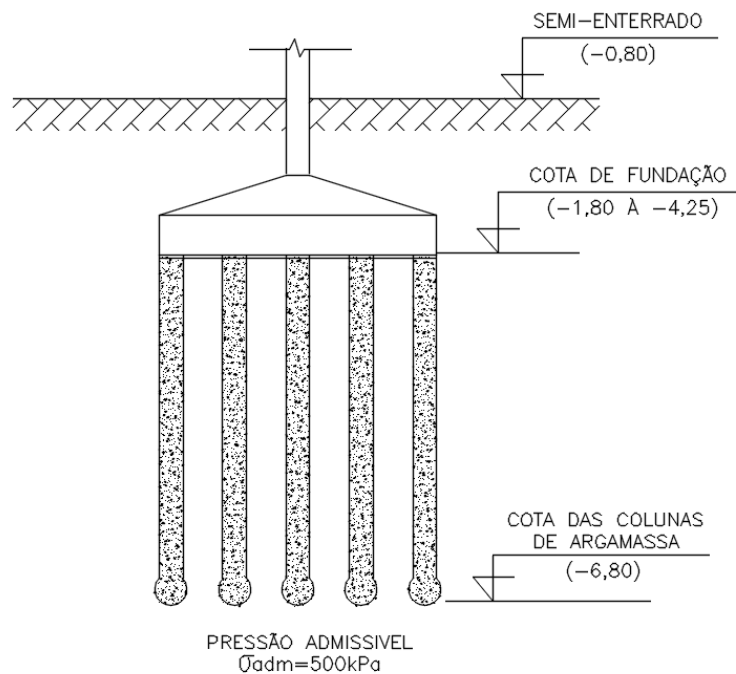
Figura 26 – Planta de localização das colunas de compactação em argamassa na fundação da lâmina principal



Fonte: Empresa responsável pelo projeto de melhoramento de solo

Conforme vemos na Figura 27, retirada do projeto de execução, as estacas estão sendo representadas totalmente contidas na projeção da sapata, e o espaçamento delas definindo a geometria destas, assim como se recomenda a melhor prática.

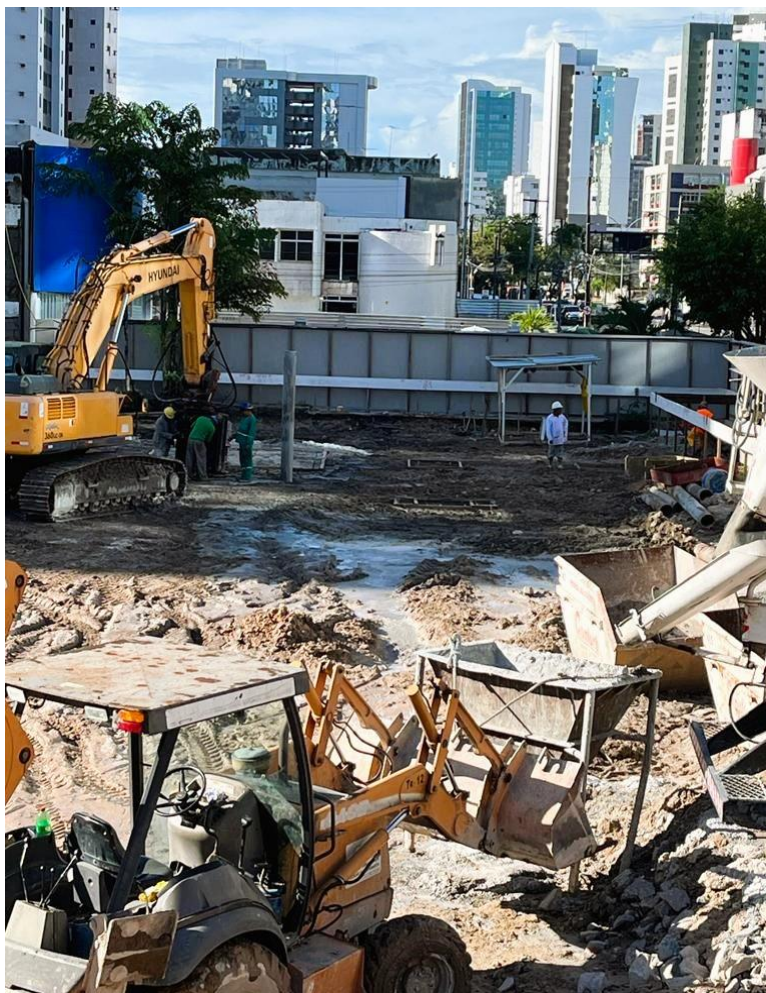
Figura 27 – Detalhes das colunas de compactação de argamassa



Fonte: Empresa responsável pelo melhoramento de solo

Os equipamentos utilizados estão mostrados na figura 28, sendo eles uma escavadeira equipada com martelo vibratório (ao fundo da figura), um tubo com bucha seca de 6,0 m e uma retroescavadeira equipada com funil (à frente na imagem). Durante o processo de execução é necessário tomar medidas preventivas para assegurar que as estacas já realizadas não sofram danos devido a vibração de cravação para realização de estacas adjacentes a essas, para tanto é importante ‘pular’ a execução de estacas vizinhas dando um intervalo de pelo menos 1 dia para suficiente enrijecimento da argamassa afim de resistir as tensões impostas, impedindo que ela estando fresca seja deslocada ou comprimido. No caso estudado foi dado um intervalo de duas estacas entre cravações.

Figura 28 – Equipamentos utilizados no melhoramento de solo



Fonte: Registro de Obra (2022)

A execução das estacas de argamassa seguiu as etapas do processo, inicialmente com o terreno já limpo, nivelado e gabaritado com os marcos de referência, a retroescavadeira equipada com martelo vibratório e com o tubo metálico de 6 m de tampa falsa na sua extremidade, verticalizava o tubo acima no eixo locado e realizava a cravação até atingir a profundidade de projeto ou limite de energia de cravação imposto pelo equipamento.

Figura 29 - Lançamento de argamassa através do funil no tubo metálico



Fonte: Registro de Obra (2022)

Posteriormente a argamassa era lançada dentro do tubo através de um funil que quando posicionado podia ser aberto na base e o material era despejado por gravidade, conforme mostrado na Figura 29. Foi utilizada argamassa feita no local (5MPa) e posteriormente também foi feito uso de concreto usinado (30Mpa). O despejo da argamassa era contínuo para evitar a formação de vazios. A retirada do tubo foi realizada de forma lenta, enquanto o peso próprio do solo e a vibração ajudavam a compactar. Na figura 30 é possível ver o topo de algumas estacas de argamassa, numa última etapa é crucial reverificar o posicionamento e cravação de todas as estacas enquanto o equipamento está disponível.

Figura 30 – Solo com melhoramento executado



Fonte: Registro de Obra (2022)

Foi realizado um acompanhamento da execução das estacas através de um formulário apresentado na figura 31, registrando a data, profundidade de cravação e rastreabilidade da argamassa utilizada correspondendo com o número do caminhão daquele dia, nº da nota e cada estaca executada. Isso foi realizado para poder ser feito o rastreio do concreto e teste da resistência da argamassa à ruptura aos 28 dias superior a 5 Mpa, como mostrado na figura 32.

Figura 31 – Mapa de rastreabilidade (Amostra S(P5+P6+P9))

MAPA DE RASTREABILIDADE		ESTACA DE ARGAMASSA																																																																																																														
OBRA/TORRE:																																																																																																																
P5 25/247 731tf P6 222/20 409tf P9 54/54 561tf Obs.:		<table border="1"> <thead> <tr> <th>ESTACA</th> <th>DATA</th> <th>PROFUND.</th> <th>CARRO</th> <th>Nº DA NOTA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1 A</td><td>31/05/22</td><td>5,10</td><td>4</td><td>110865</td></tr> <tr><td>1 B</td><td>31/05/22</td><td>5,10</td><td>4</td><td>110865</td></tr> <tr><td>1 C</td><td>31/05/22</td><td>4,10</td><td>3</td><td>73646</td></tr> <tr><td>1 D</td><td>31/05/22</td><td>4,80</td><td>3</td><td>73646</td></tr> <tr><td>1 E</td><td>31/05/22</td><td>4,20</td><td>3</td><td>73646</td></tr> <tr><td>1 F</td><td>31/05/22</td><td>4,10</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>1 G</td><td>31/05/22</td><td>4,80</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>1 H</td><td>31/05/22</td><td>4,20</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>1 I</td><td>31/05/22</td><td>4,55</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>1 J</td><td>31/05/22</td><td>4,20</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>1 K</td><td>31/05/22</td><td>4,95</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>2 A</td><td>31/05/22</td><td>4,80</td><td>3</td><td>73646</td></tr> <tr><td>2 B</td><td>31/05/22</td><td>4,90</td><td>3</td><td>73646</td></tr> <tr><td>2 C</td><td>31/05/22</td><td>4,40</td><td>3</td><td>73646</td></tr> <tr><td>2 D</td><td>31/05/22</td><td>4,20</td><td>3</td><td>73646</td></tr> <tr><td>2 E</td><td>31/05/22</td><td>4,20</td><td>3</td><td>73646</td></tr> <tr><td>2 F</td><td>31/05/22</td><td>4,10</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>2 G</td><td>31/05/22</td><td>4,50</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>2 H</td><td>31/05/22</td><td>4,90</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>2 I</td><td>31/05/22</td><td>4,10</td><td>1</td><td>110823</td></tr> <tr><td>2 U</td><td>31/05/22</td><td>5,00</td><td>1</td><td>110823</td></tr> </tbody> </table>	ESTACA	DATA	PROFUND.	CARRO	Nº DA NOTA	1 A	31/05/22	5,10	4	110865	1 B	31/05/22	5,10	4	110865	1 C	31/05/22	4,10	3	73646	1 D	31/05/22	4,80	3	73646	1 E	31/05/22	4,20	3	73646	1 F	31/05/22	4,10	1	110823	1 G	31/05/22	4,80	1	110823	1 H	31/05/22	4,20	1	110823	1 I	31/05/22	4,55	1	110823	1 J	31/05/22	4,20	1	110823	1 K	31/05/22	4,95	1	110823	2 A	31/05/22	4,80	3	73646	2 B	31/05/22	4,90	3	73646	2 C	31/05/22	4,40	3	73646	2 D	31/05/22	4,20	3	73646	2 E	31/05/22	4,20	3	73646	2 F	31/05/22	4,10	1	110823	2 G	31/05/22	4,50	1	110823	2 H	31/05/22	4,90	1	110823	2 I	31/05/22	4,10	1	110823	2 U	31/05/22	5,00	1	110823
ESTACA	DATA	PROFUND.	CARRO	Nº DA NOTA																																																																																																												
1 A	31/05/22	5,10	4	110865																																																																																																												
1 B	31/05/22	5,10	4	110865																																																																																																												
1 C	31/05/22	4,10	3	73646																																																																																																												
1 D	31/05/22	4,80	3	73646																																																																																																												
1 E	31/05/22	4,20	3	73646																																																																																																												
1 F	31/05/22	4,10	1	110823																																																																																																												
1 G	31/05/22	4,80	1	110823																																																																																																												
1 H	31/05/22	4,20	1	110823																																																																																																												
1 I	31/05/22	4,55	1	110823																																																																																																												
1 J	31/05/22	4,20	1	110823																																																																																																												
1 K	31/05/22	4,95	1	110823																																																																																																												
2 A	31/05/22	4,80	3	73646																																																																																																												
2 B	31/05/22	4,90	3	73646																																																																																																												
2 C	31/05/22	4,40	3	73646																																																																																																												
2 D	31/05/22	4,20	3	73646																																																																																																												
2 E	31/05/22	4,20	3	73646																																																																																																												
2 F	31/05/22	4,10	1	110823																																																																																																												
2 G	31/05/22	4,50	1	110823																																																																																																												
2 H	31/05/22	4,90	1	110823																																																																																																												
2 I	31/05/22	4,10	1	110823																																																																																																												
2 U	31/05/22	5,00	1	110823																																																																																																												

Fonte: Registros de Obra (2022)

Figura 32 – Planilha de rastreabilidade da argamassa das estacas de compactação

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												

RASTREABILIDADE DO CONCRETO

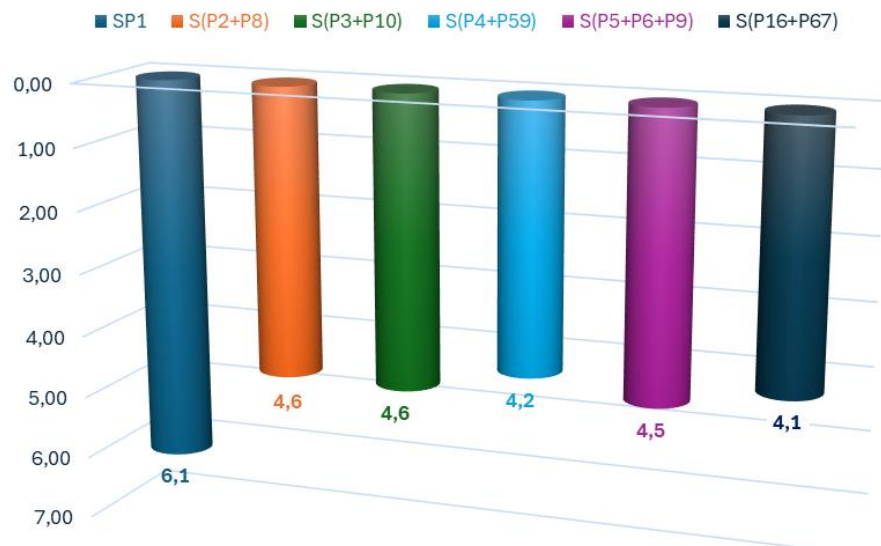
Fck de Referência:	5,0	Mpa
--------------------	-----	-----

DATA DA MOLDAGEM	Carro (nº)	N. F./ REMESSA	SLUMP	Nº DO C.P.	PEÇA CONCRETADA	Especificação do Local da Peça	Torre	FCK (7DIAS)	STATUS (7 DIAS)	FCK (28DIAS)	STATUS (28 DIAS)
03/05/22	1º Carro	72721		1	P1 (4H, 3H, 2H, 1H)	Fundação		9,8	Em aguardo	13,3	Aprovado
03/05/22	2º Carro	72734		2	P1 (4G, 3G)	Fundação		5,3	Em aguardo	9,4	Aprovado
05/05/22	1º Carro	109901		3	P1 (2G, 1G, 4F, 3F, 2F, 1F, 4E)	Fundação		6,6	Em aguardo	8,8	Aprovado
05/05/22	2º Carro	109935		4	P1 (3E, 2E, 1E, 4D, 3D, 2D, 1D, 4C)	Fundação		6,0	Em aguardo	9,1	Aprovado
08/05/22	1º Carro	110016		5	P1(1A, 2A, 3A, 4A, 1B, 2B, 3B, 4B, 1C, 2C, 3C)	Fundação		4,7	Em aguardo	5,5	Aprovado
08/05/22	1º Carro	110016		5	P13(8A, 8B, 8C, 8D, 8E, 8F)	Fundação		4,0	Em aguardo	5,5	Aprovado
08/05/22	2º Carro	110032		6	P13 (5A, 5C, 5E, 5G, 7A, 7C, 7D, 8G, 8H, 7F)	Fundação		4,0	Em aguardo	11,6	Aprovado
08/05/22	2º Carro	110032		6	P2/8 (1I, 3I, 5I, 1J, 2J, 3J, 1H,) P14(8L)	Fundação		4,0	Em aguardo	11,6	Aprovado
10/05/22	1º Carro	110056		7	P14(5K, 6J, 6F, 5E, 5L, 6H, 5G) P82-(1B, 20B, 1A, 2A)	Fundação		10,5	Em aguardo	12,7	Aprovado
10/05/22	2º Carro	110071		8	P2/8 (1G, 3G, 1F, 2L, 3H, 2G, 3F) P80 (2B, 2A, 1B, 1A,)	Fundação		7,3	Em aguardo	10,7	Aprovado
10/05/22	2º Carro	110071		8	P81 (2A, 2B, 1B, 1A,) P79- (2A)	Fundação		7,3	Em aguardo	10,7	Aprovado
10/05/202	3º Carro	73004		9	P2/8 (1E, 5J, 6J, 7J, 5I, 6I, 2E, 3E, 4H, 5J) P79 (1A, 2B, 1B)	Fundação		10,9	Em aguardo	12,7	Aprovado
10/05/22	4º Carro	73020		10	P2/8 (7I, 8I, 8H, 8G, 7G, 5H, 6H, 7H)	Fundação		7,6	Em aguardo	10,8	Aprovado
10/05/22	4º Carro	73020		10	P14 (5F, 5H, 5L, 6K)	Fundação		7,6	Em aguardo	9,8	Aprovado
11/05/22	1º Carro	110150		11	P14 (5C, 4C, 5B, 4F, 5A, 4B, 4A, 5D, 4E, 4D, 6B, 6A, 4G)	Fundação		6,3	Em aguardo	10,4	Aprovado
11/05/22	1º Carro	110150		11	P2/8 (6G, 1D, 1B)	Fundação		6,3	Em aguardo	10,0	Aprovado
11/05/22	2º Carro	110160		12	P14 (3G, 4I, 3J, 4K, 4L, 3L, 2L, 1L, 3K)	Fundação		5,8	Em aguardo	8,5	Aprovado
11/05/22	2º Carro	110160		12	P13 (1A) P2/8 (2H, 3F, 4H, 5G, 4F, 5F)	Fundação		5,8	Em aguardo	7,9	Aprovado
12/05/22	1º Carro	110189		13	P24 (4A, 3A, 2A, 1A, 1B, 2B, 3B, 4B, 4C, 3C)	Fundação		10,3	Em aguardo	10,8	Aprovado
12/05/22	1º Carro	110189		13	P27 (2A, 1B, 1A, 3B, 3A, 2B)	Fundação		10,4	Em aguardo	11,3	Aprovado
13/05/22	1º Carro	73118		14	P24 (2C, 1C,) P20 (2C, 2B, 2A, 1A, 1B, 1C)	Fundação		6,9	Em aguardo	9,3	Aprovado
13/05/22	1º Carro	73118		14	P25 (3A, 2A, 1A)	Fundação		6,9	Em aguardo	9,3	Aprovado

Fonte: Registros de Obra (2022)

O autor encontrou o registro da profundidade, atingida pelo melhoramento, no acompanhamento da rastreabilidade de apenas seis sapatas, o gráfico 01 mostra os valores médios da profundidade atingida pelas estacas sob essas sapatas.

Gráfico 1 – Profundidade média das estacas de argamassa por sapata

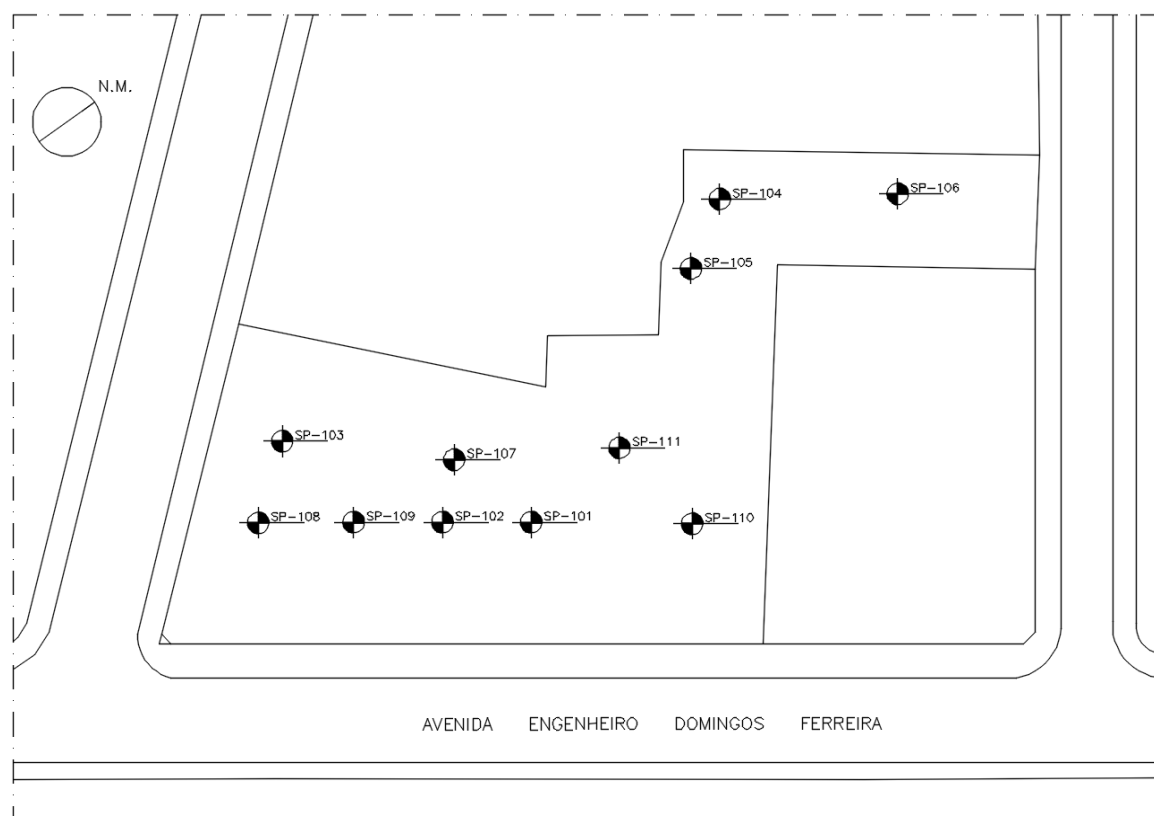


Fonte: O autor (2025)

3.4 SONDAGEM DE VERIFICAÇÃO

Após a realização do melhoramento foi realizado novos furos de sondagem SPT para comparar e avaliar a eficácia do método, o ideal é que esses novos furos sejam feitos o mais próximo possível dos primeiros. A profundidade dos ensaios atingiu máxima de 15,45 m e média de 12,81 m, visto que a espessura de solo melhorado foi inferior a 7 m. A figura 33 nos mostra a locação dos novos furos.

Figura 33 – Locação dos furos de sondagem pós melhoramento

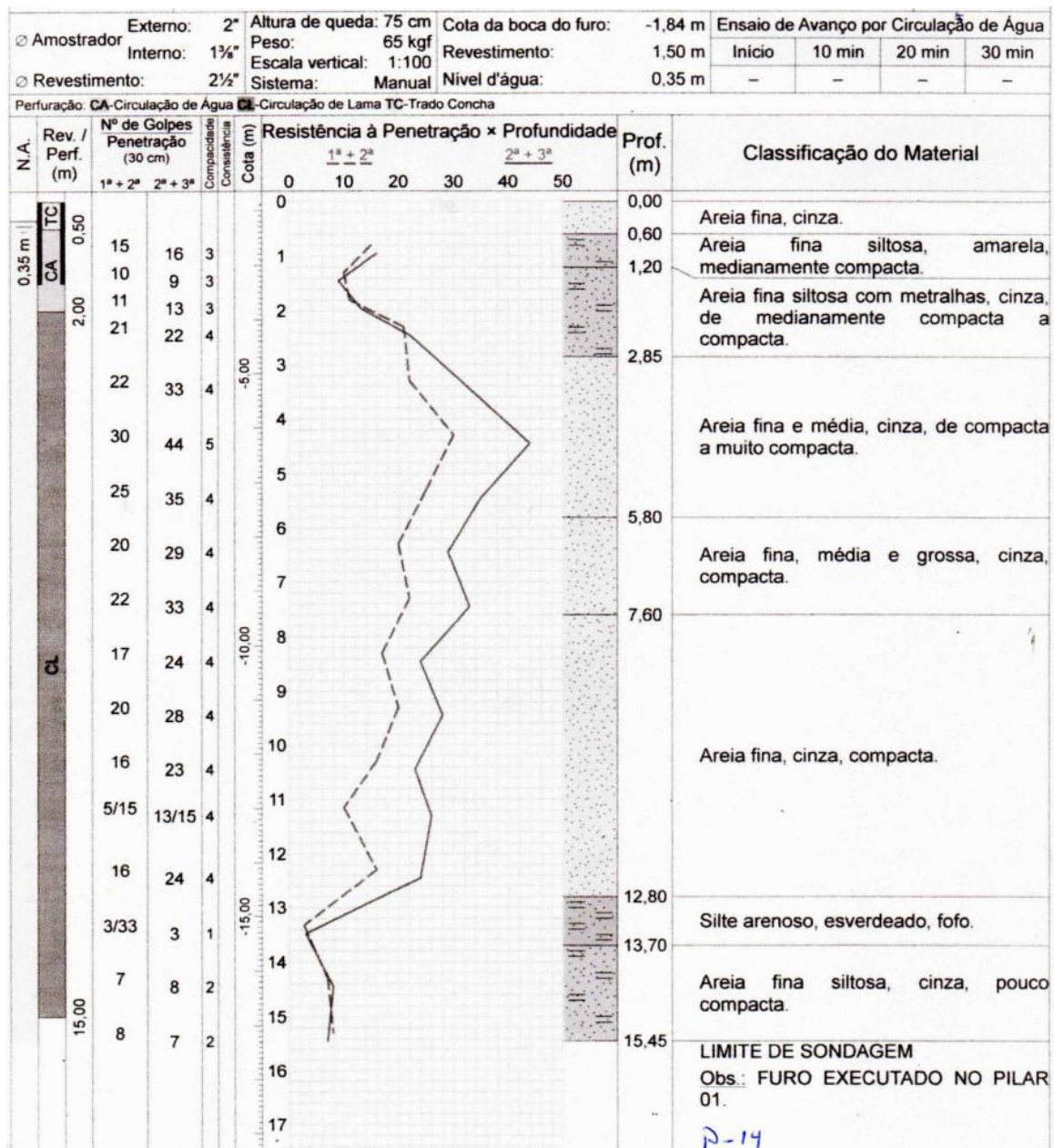


Fonte: O Autor (2025)

Podemos relacionar, através da locação dos furos de sondagem, os ensaios realizados antes e depois do melhoramento que mais próximos estiverem e assim proceder com a análise dos dados, comparando-os e verificando o fator de melhoramento (k). Para fins de análise os furos SP- 104, SP-105 e SP-106 foram descartados pois não estão localizados na lâmina principal do edifício. A análise e a comparação estão no capítulo 4.

A seguir na figura 34 é a apresentado o relatório de sondagem do furo SP-101, com os valores médios de resistência à penetração N_{spt} .

Figura 34 – Boletim de sondagem SP-101 (14/05/2022)



Fonte: Empresa responsável pelas sondagens

3.5 ACOMPANHAMENTO DOS RECALQUES

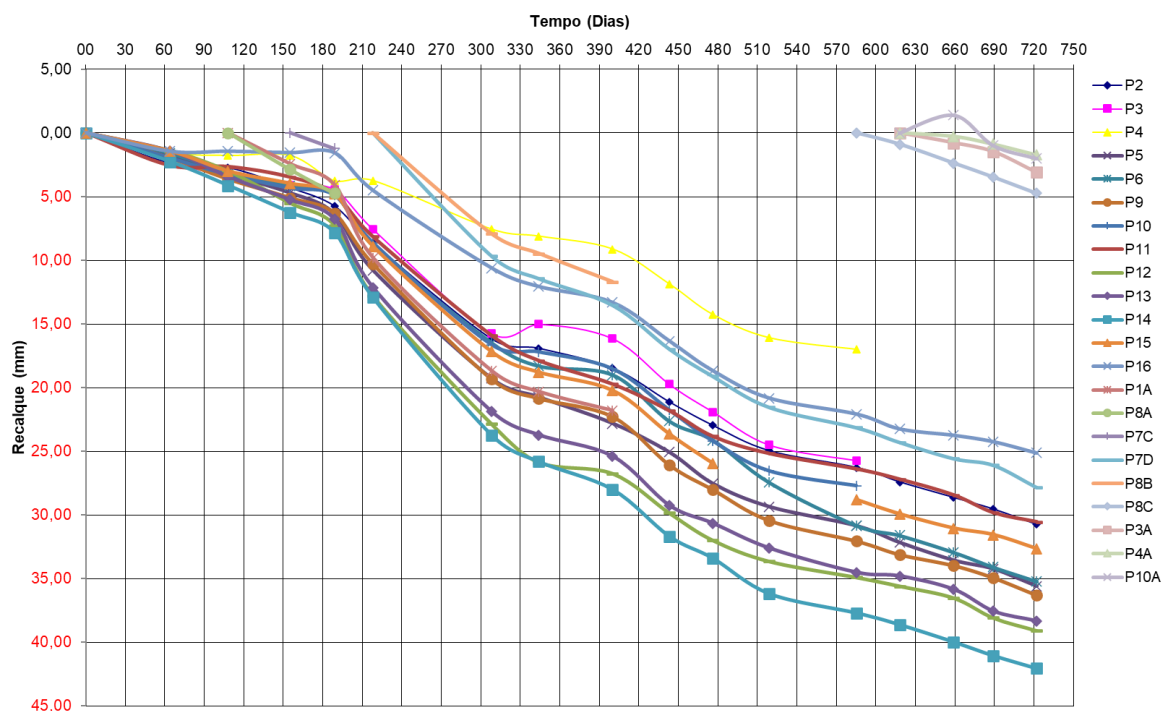
Foi realizado o monitoramento do recalque do prédio com o objetivo de assegurar o bom desempenho da interação entre o solo e a estrutura em geral, dessa forma atestando também o resultado do melhoramento com estacas de argamassa.

Para realização do monitoramento foram instalados pinos de leitura nos 16 pilares da lâmina principal do prédio. O intervalo entre as datas das medições foi variado, no total houve 17 leituras, a primeira leitura (L1), que serviu de referência ocorreu no dia 26 de dezembro de 2022, as demais leituras foram sendo feitas ao longo da evolução da obra e a última leitura (L17) considerada neste trabalho ocorreu no dia 17 de dezembro de 2024.

Algumas leituras de pilares foram desconsideradas, como as leituras dos pilares P1 e P7 que iniciaram tardiamente e foram interrompidas. A seguir estão as figuras das tabelas e gráficos das leituras de recalque realizadas durante quase 2 anos (722 dias).

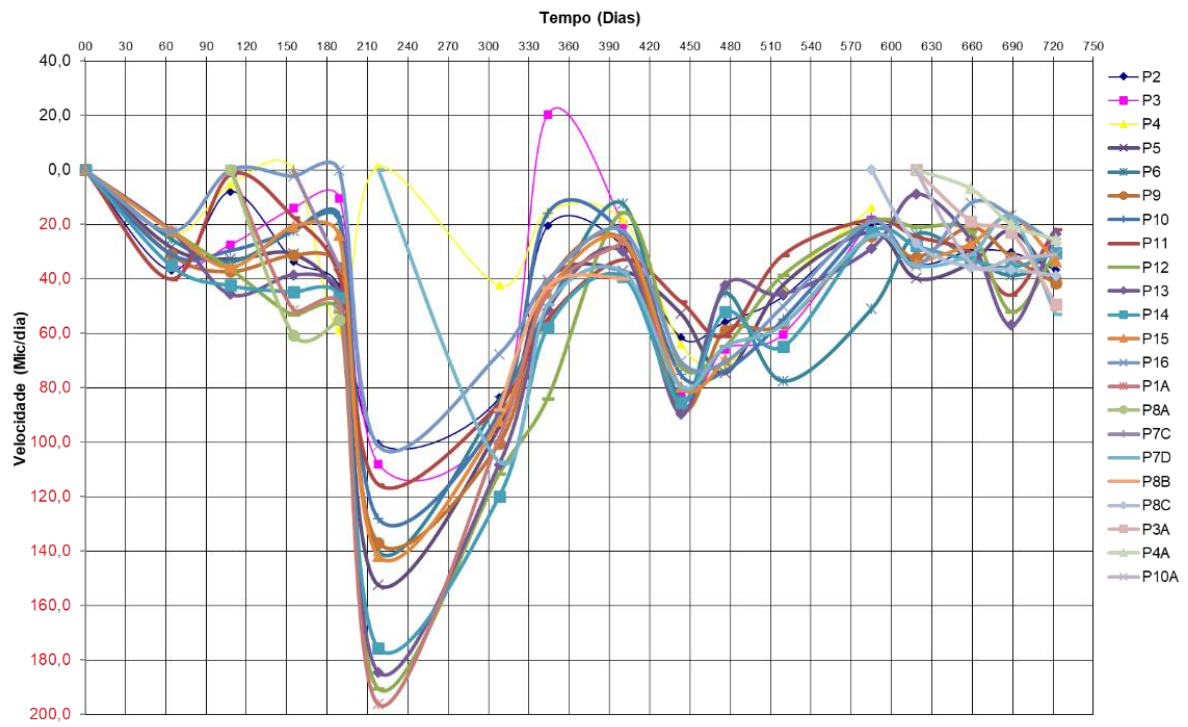
A figura 35 e 36 mostras o diagrama de recalques e o gráfico da velocidade de recalque para as 17 leituras feitas, a tabela dos recalques acumulados e a tabela das leituras de cota do instrumento estão no ANEXO A.

Figura 35 – Diagrama de recalques



Fonte: Empresa H. Laprovitera.

Figura 36 – Gráfico velocidade de recalque



Fonte: Empresa H. Laprovitera.

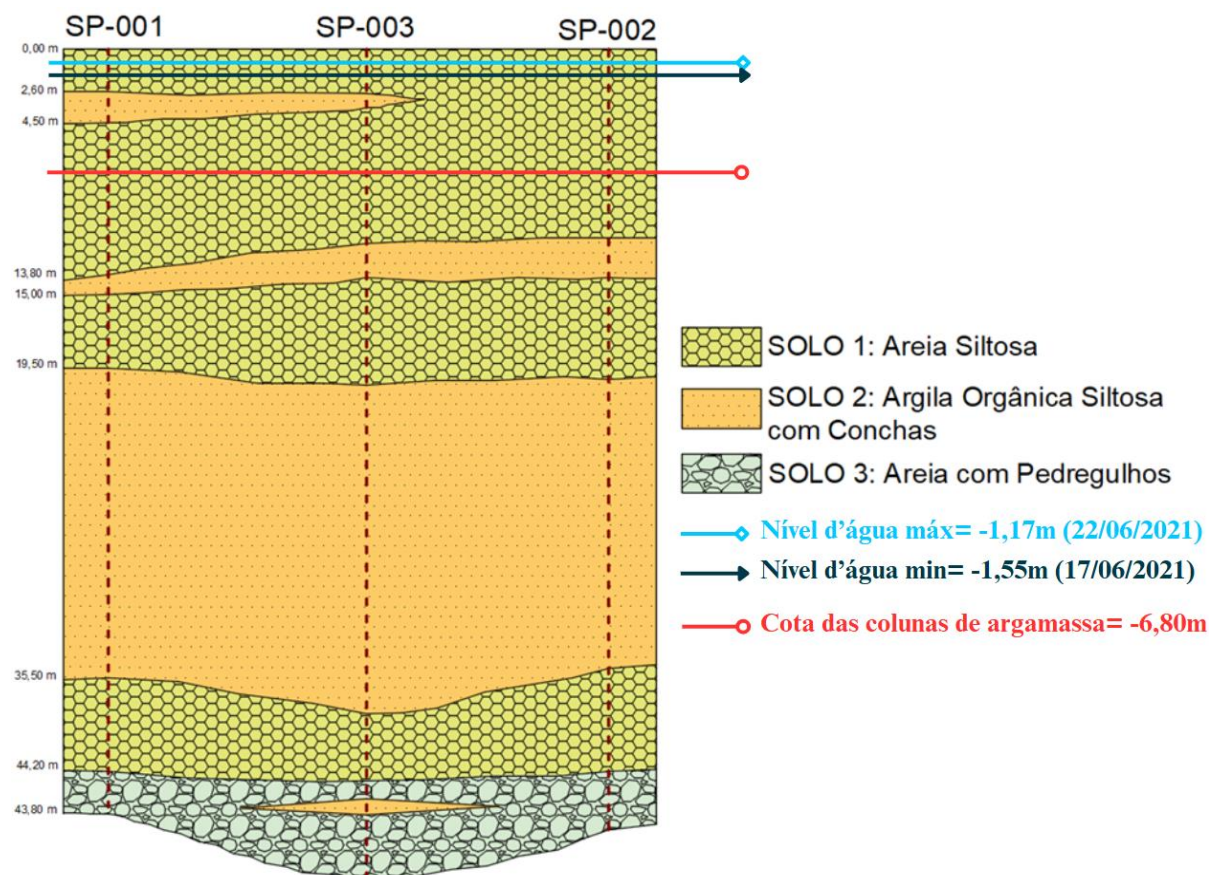
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DAS SONDAGENS SPT ANTES DO MELHORAMENTO

Baseado nos Boletins de sondagem SP-001, SP-002 e SP-003 foi possível criar um perfil estratigráfico característico do solo da obra, apresentado na figura 37. Conforme vimos na Figura 21, a localização do furo SP-003 está localizada no meio dos outros dois, desses três furos foram selecionados os solos que apareceram com maior incidência.

Para fins de análise do solo quanto ao melhoramento, que será abordado no capítulo 4 deste trabalho, foi descartado o ensaio SP-006, pois sua localização não está posicionada na lâmina principal de fundação do edifício, que recebeu a maior quantidade de colunas de compactação em argamassa.

Figura 37 - Perfil estratigráfico característico do solo estudado

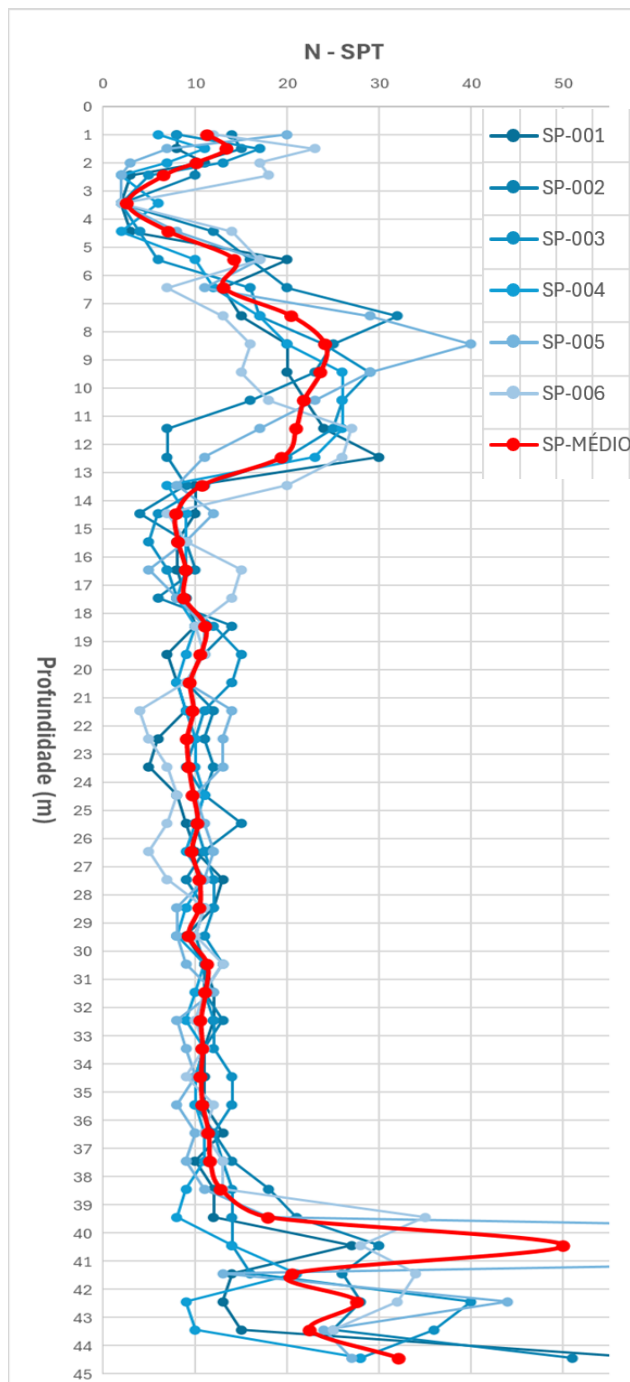


Fonte: O autor (2025)

A escolha do tipo de fundação pode ser baseada em alguns fatores, entre eles estão os ensaios SPT, as características do solo, as cargas da superestrutura oriundas dos pilares, as estimativas de recalque, o tempo de execução e a análise dos custos.

Através dos laudos de sondagens iniciais (ANEXO A), podemos perceber, em média, nos 20 primeiros metros a presença de areia medianamente compacta à muito compacta, de 20 m até 38,5 m um solo predominantemente argiloso de médio a rijo depois novamente uma camada de areia e por fim após 44 m uma areia com pedregulhos muito compacta.

Gráfico 2 – Perfil Nspt do solo natural (Até 45 m)



Fonte: O autor (2025)

O Gráfico ao lado mostra o perfil Nspt do solo natural dos 6 primeiros furos de sondagem até a profundidade máxima de 45 m, a linha vermelha é o Nspt médio. Podemos perceber um $N_{\text{médio}} < 10$ entre as camadas iniciais de 2 m até 5 m; um $N_{\text{médio}} > 20$ entre 7 m até 12 m; e um $N_{\text{médio}} = 10$ entre 14 m até 38,5 m, essa última representa em geral as camadas de argila, enquanto as duas primeiras as camadas de areia.

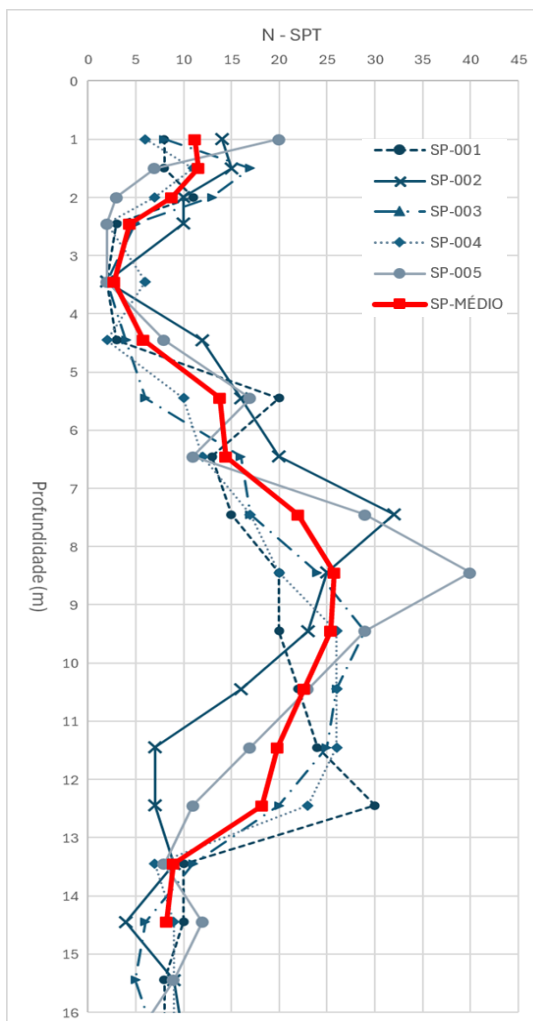
Optou-se por realizar um melhoramento de solo com colunas de compactação em argamassa para aumentar o Nspt médio ($N > 20$) nas camadas iniciais (2 até 6 m) e, portanto, a tensão admissível, viabilizando a solução de fundação superficial para distribuição das cargas provenientes da superestrutura no solo, a uma profundidade de assentamento das sapatas variando entre 2,85 m e 3,70 m. Visto que de 8 m até 13 m o Nspt permanece acima de 20, esse trecho garante a segurança de que após o melhoramento o solo abaixo tem resistência dentro do limite de influência do bulbo de tensões.

4.2 ANÁLISE DOS ENSAIOS SPT ANTES E DEPOIS DO MELHORAMENTO

Com base nos ensaios SPT foi possível gerar tabelas de cada furo de sondagem, relacionando a profundidade com seu respectivo N-spt e a partir daí através de uma média aritmética observar os valores médios para cada profundidade, tanto antes como depois do melhoramento de solo com estacas de argamassa. Como já mencionado no capítulo anterior para fins de análise do solo quanto ao melhoramento, foi descartado o ensaio SP-006 (ANTES), pois sua locação não está posicionada na lâmina principal de fundação do edifício, assim também como os furos SP-104, SP-105 e SP106 (DEPOIS).

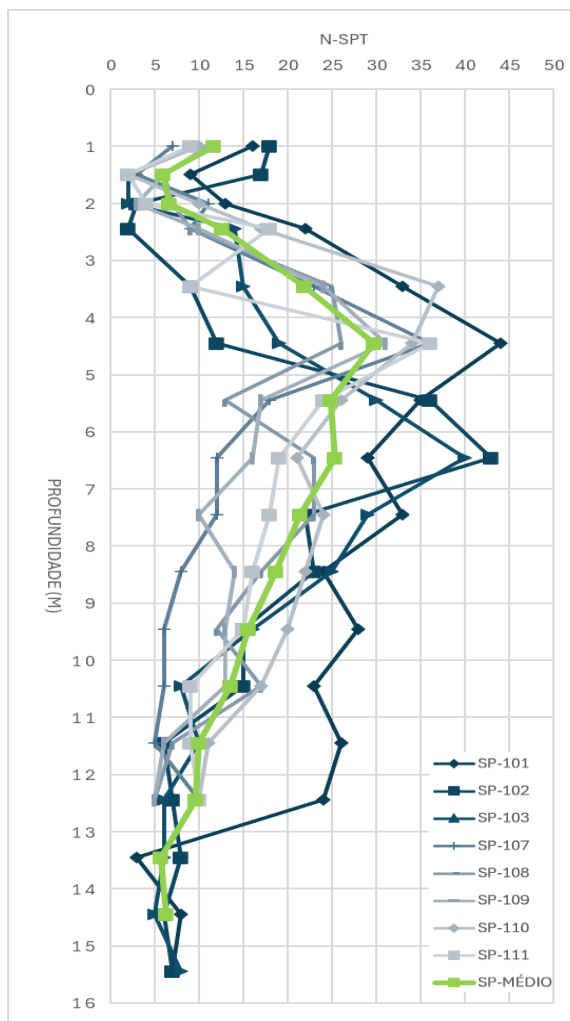
Nos gráficos 03 e 04 temos os gráficos N-SPT x Profundidade de todos os furos de sondagem posicionados na lâmina principal de fundação do prédio com o acréscimo da linha média, o gráfico 03 mostrando antes do melhoramento e o gráfico 04 após o melhoramento.

Gráfico 03 - Perfil N-spt antes da compactação



Fonte: O autor (2025)

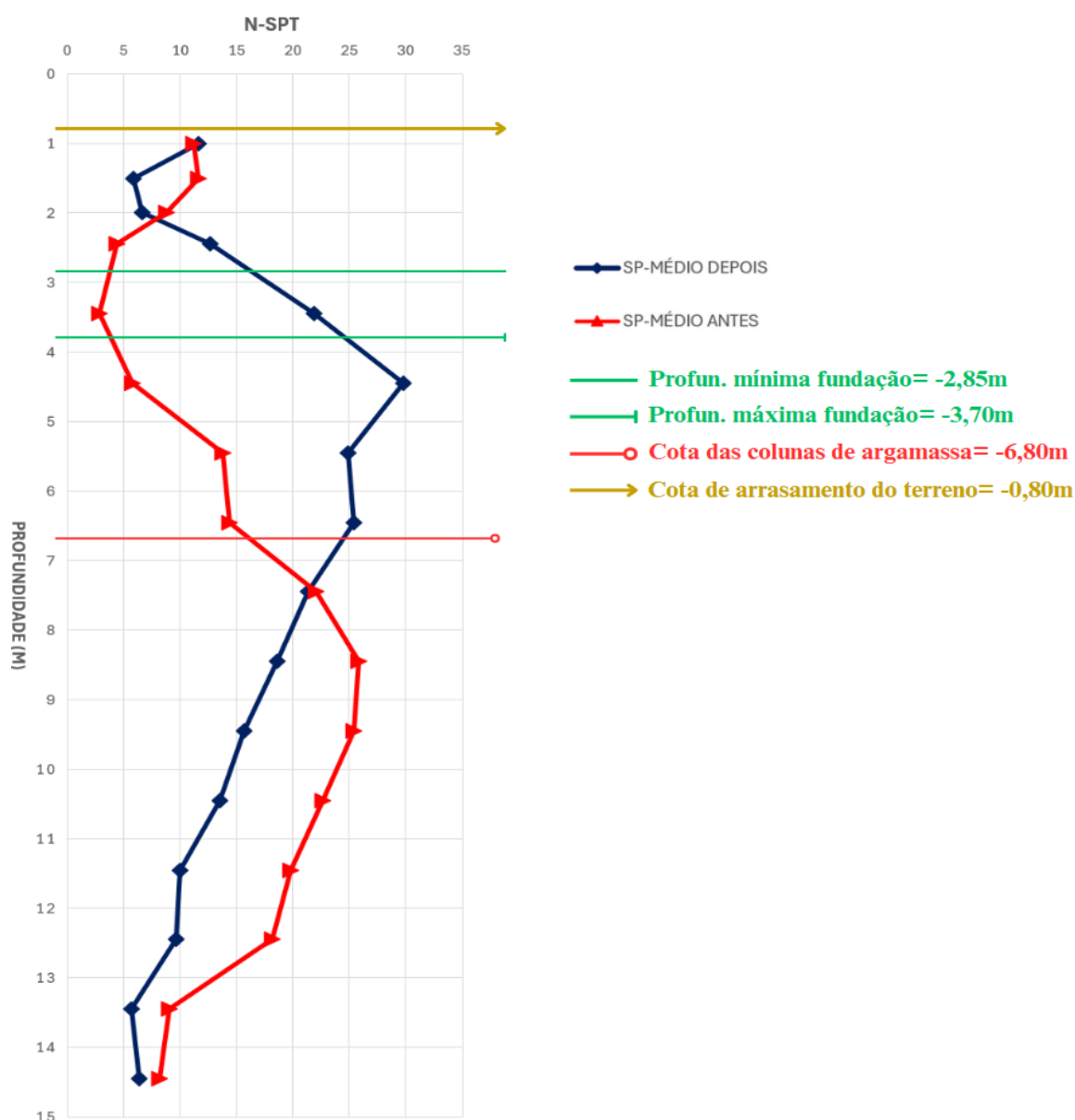
Gráfico 04 - Perfil N-spt após da compactação



Fonte: O autor (2025)

O gráfico 05 mostra a comparação apenas das linhas médias de todos os furos antes (vermelho) e todos os furos depois (verde) do melhoramento. É possível perceber uma redução média do Nspt na 1ª camada analisada, entre o 1º e 2º metro de sondagem, isso pode ser explicado devido a falta de confinamento do solo, devido a presença de finos próximo a superfície do terreno, que provoca levantamento das camadas mais superficiais com a compactação.

Gráfico 5 - Nspt's médios antes e depois do melhoramento



Fonte: O autor (2025)

No trecho entre 2,45 m e 7,45 m nota-se uma melhora considerável no Nspt médio, alcançando um fator de melhoramento $k_{\text{médio}}$ máximo de 7,81 e 5,13 em 3,45 m e 4,45 m, respectivamente, conforme observamos na tabela 01. Com este resultado nas camadas iniciais se alcançou o objetivo do aumento da tensão admissível, a fim de apoiar fundações superficiais nesses primeiros metros de solo, visto que a cota de fundação varia entre -2,85 m e -3,70 m conforme vimos no tópico 3.2.

Na Tabela 01 estão os valores de NSPT médio antes e depois do melhoramento e o fator de melhoramento (k) a cada profundidade. Até a profundidade de 7,45 m, que corresponde a faixa onde ocorreu a compactação, o fator médio de melhoramento do solo, em todas as camadas, foi de $k = 2,52$, porém essa média cai quando comparado até 14,45 m de profundidade ($k = 1,69$).

É esperado que os valores de k sejam maiores que 1 em praticamente todas as profundidades, porém analisando o gráfico 05 e a Tabela 01 podemos notar que a partir de 7,45 m houve uma redução do N-spt médio, expresso em fatores de melhoramento (k) menores que 1. Essa redução pode ser explicada devido ao elevado N_i (N-spt inicial) que pode diminuir o efeito do melhoramento; outra explicação é a quantidade de energia de compactação utilizada que se limita ao martelo vibratório e o atrito entre o solo e o tubo metálico para se atingir

Tabela 1 - N-spt médio antes e depois x fator de melhoramento (k)

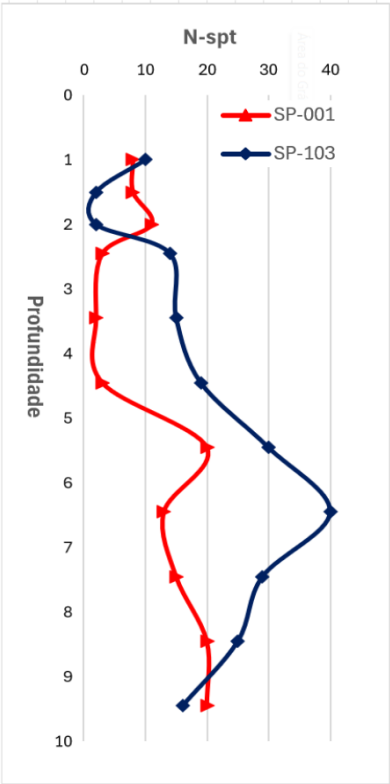
Profundidade (m)	Nspt médio		Fator melhoramento k
	N-spt antes	N-spt depois	
1	11,2	11,6	1,04
1,5	11,6	5,9	0,51
2	8,8	6,6	0,75
2,45	4,4	12,6	2,87
3,45	2,8	21,9	7,81
4,45	5,8	29,8	5,13
5,45	13,8	24,9	1,80
6,45	14,4	25,4	1,76
7,45	22	21,4	0,97
8,45	25,8	18,6	0,72
9,45	25,4	15,6	0,62
10,45	22,6	13,5	0,60
11,45	19,8	10,0	0,51
12,45	18,2	9,6	0,53
13,45	9	5,7	0,63
14,45	8,2	6,3	0,77

Fonte: O autor (2025)

maiores profundidades, porém sabemos que as estacas de argamassa atingiram profundidades máximas de 6,9 m em relação ao RN (0,00 m), pois foi retirada uma camada de solo de 0,80 m deixando o terreno no nível do semi enterrado, logo é inconclusivo o motivo da redução do N-spt médio em maiores profundidades.

Os gráficos e tabelas a seguir representam um comparativo individual entre furos de sondagem a percussão antes e depois do melhoramento, que foram realizados os mais próximos possíveis. Dos 8 furos pós melhoramento, dentro da lâmina principal, foram selecionados 5, tendo em vista que antes do estaqueamento foram realizadas apenas 5 sondagens. Em cada gráfico, através do Kmédio, constatamos que houve um melhoramento considerável em cada comparação.

Gráfico 6 - N-spt antes x depois (SP-001 x SP-103)



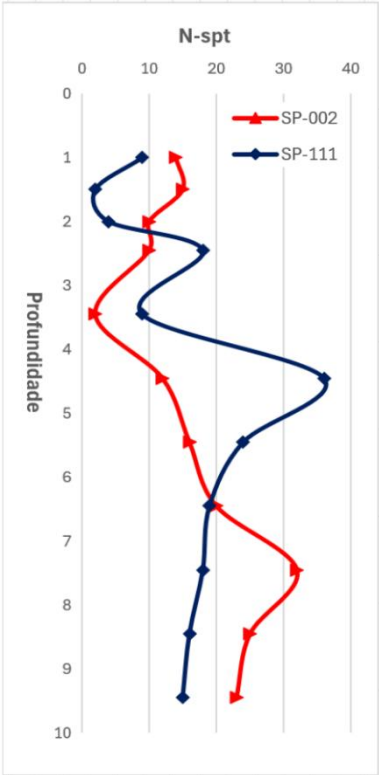
Fonte: O autor (2025)

Tabela 2 - N-spt antes x depois (SP-001 x SP-103)

SP-001 → SP-103			
Profundidade (m)	N-SPT ANTES	N-SPT DEPOIS	K
1	8	10	1,25
1,5	8	2	0,25
2	11	2	0,18
2,45	3	14	4,67
3,45	2	15	7,50
4,45	3	19	6,33
5,45	20	30	1,50
6,45	13	40	3,08
7,45	15	29	1,93
8,45	20	25	1,25
MÉDIA			2,79

Fonte: O autor (2025)

Gráfico 7 N-spt antes x depois (SP-002 x SP-111)



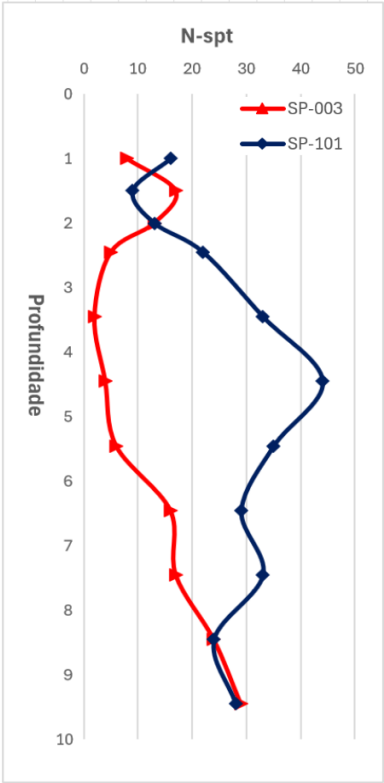
Fonte: O autor (2025)

Tabela 3 - N-spt antes x depois (SP-002 x SP-111)

SP-002 → SP-111			
Profundidade (m)	N-SPT ANTES	N-SPT DEPOIS	K
1	14	9	0,64
1,5	15	2	0,13
2	10	4	0,40
2,45	10	18	1,80
3,45	2	9	4,50
4,45	12	36	3,00
5,45	16	24	1,50
6,45	20	19	0,95
7,45	32	18	0,56
8,45	25	16	0,64
MÉDIA			1,41

Fonte: O autor (2025)

Gráfico 8 - N-spt antes x depois (SP-003 x SP-101)



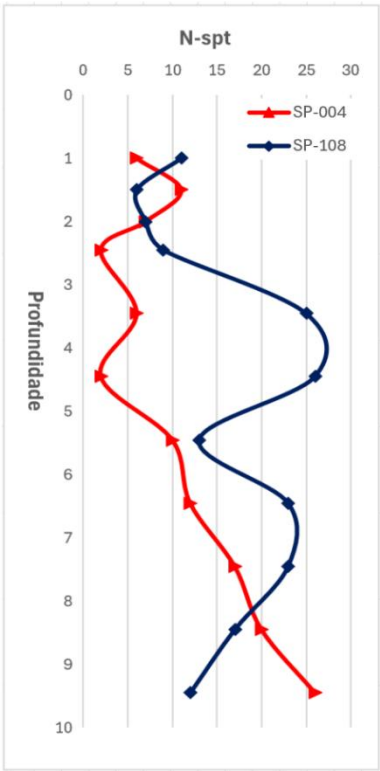
Fonte: O autor (2025)

Tabela 4 - N-spt antes x depois (SP-003 x SP-101)

SP-003 → SP-101			
Profundidade (m)	N-SPT ANTES	N-SPT DEPOIS	K
1	8	16	2,00
1,5	17	9	0,53
2	13	13	1,00
2,45	5	22	4,40
3,45	2	33	16,50
4,45	4	44	11,00
5,45	6	35	5,83
6,45	16	29	1,81
7,45	17	33	1,94
8,45	24	24	1,00
MÉDIA			4,60

Fonte: O autor (2025)

Gráfico 9 - N-spt antes x depois (SP-004xSP-108)



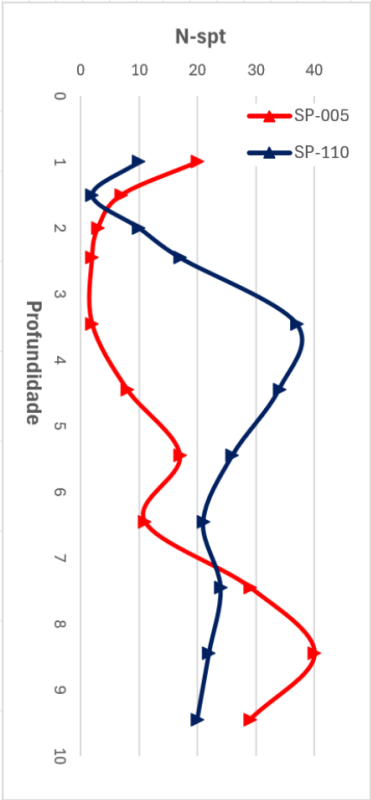
Fonte: O autor (2025)

Tabela 5 - N-spt antes x depois (SP-004 x SP-108)

SP-004 → SP-108			
Profundidade (m)	N-SPT ANTES	N-SPT DEPOIS	K
1	6	11	1,83
1,5	11	6	0,55
2	7	7	1,00
2,45	2	9	4,50
3,45	6	25	4,17
4,45	2	26	13,00
5,45	10	13	1,30
6,45	12	23	1,92
7,45	17	23	1,35
8,45	20	17	0,85
MÉDIA			3,05

Fonte: O autor (2025)

Gráfico 10 - N-spt antes x depois (SP-005 x SP-110)



Fonte: O autor (2025)

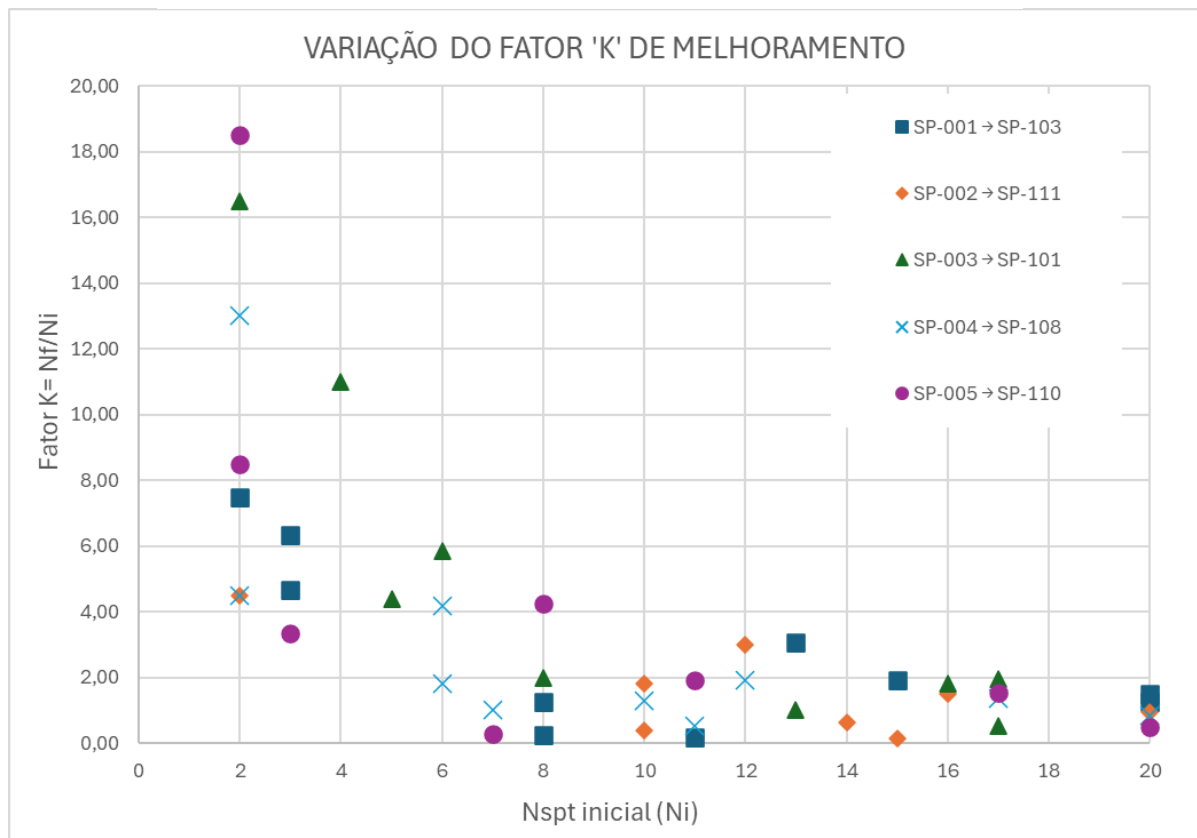
Tabela 6 - N-spt antes x depois (SP-005 x SP-110)

SP-005 → SP-110			
Profundidade (m)	N-SPT ANTES	N-SPT DEPOIS	K
1	20	10	0,50
1,5	7	2	0,29
2	3	10	3,33
2,45	2	17	8,50
3,45	2	37	18,50
4,45	8	34	4,25
5,45	17	26	1,53
6,45	11	21	1,91
7,45	29	24	0,83
8,45	40	22	0,55
MÉDIA			4,02

Fonte: O autor (2025)

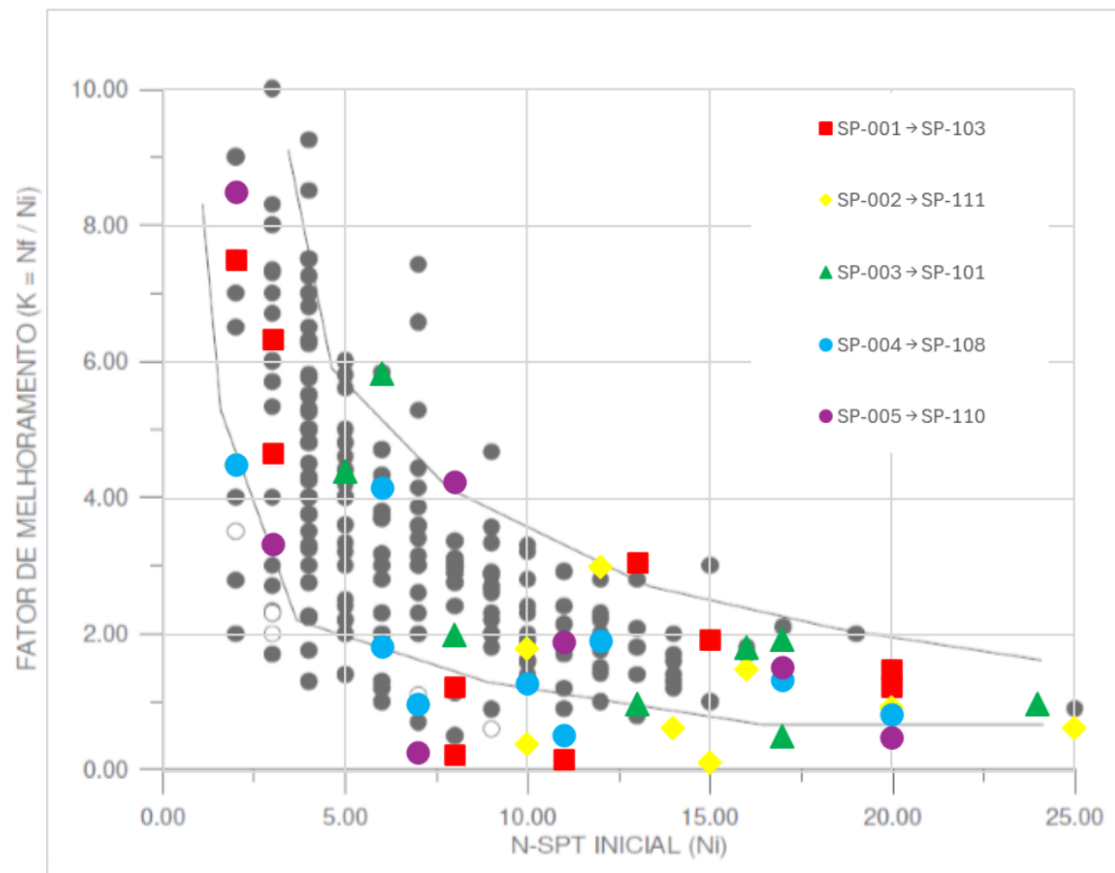
Através do resultado obtido nas 5 tabelas anteriores foi possível gerar o Gráfico 11 a seguir, relacionando o fator de melhoramento (k) em função do Nspt inicial (Compacidade inicial do solo), podemos notar que os pontos apresentam uma faixa definida que corresponde ao resultado encontrado por Gusmão Filho e Gusmão (2000), conforme discorrido no subtópico 2.2 e mostrado na Figura 39. O fator k diminui à medida que a compacidade inicial do solo aumenta, gerando essa ‘faixa’. Analisando através das tabelas e comparando com o gráfico 11 é observado que 15 dos 50 resultados com $K < 1$, porém 9 deles foram nas camadas iniciais (até 2 m), resultado já esperado, 5 deles ocorreram após 7,45 m, ou seja, fora do limite do alcance das estacas de melhoramento e apenas 1 com $N_i = 20$ ocorreu uma redução para 19 ($k = 0,95$). Portanto chegamos no valor limite de $N_i (> 20)$ que torne ineficiente o melhoramento apenas 1 vez, comprovando o referencial teórico. - N-spt antes x depois (SP-005 x SP-110)

Gráfico 11 - Efeito da compacidade inicial do solo no melhoramento do solo



Fonte: O autor (2025)

Figura 39 – Sobreposição do gráfico 11 sobre figura 8



Fonte: O autor (2025)

4.3 ESTIMATIVA DA MELHORA DA TENSÃO ADMISSÍVEL DO SISTEMA SAPATA-SOLO

Para verificar o quanto de melhora na tensão admissível foi gerada através do melhoramento de solo foram utilizados métodos empíricos, com a devida resguarda de que são estimativas ilustrativas, para demonstrar o quanto houve possivelmente de aumento percentual da capacidade de carga do sistema. As medidas das sapatas usadas nos métodos poderiam ser arbitrariamente quadradas, porém foi optado por demonstrar diretamente nas dimensões das sapatas no estudo de caso, indicadas na tabela 7.

Tabela 7 - Dimensões das sapatas

SAPATAS	TIPO	Lx (m)	Ly (m)	COTA DE FUNDAÇÃO (m) - Projeto de melhor.	COTA DE FUNDAÇÃO (m) - Projeto de Forma	NÚMERO DE COLUNAS
P1	ISOLADA	5,95	2,75	-2,85	-3,07	32
P2+P8	ASSOCIADA	7,55	5,95	-2,85	-3,2	80
P3+P10	ASSOCIADA	6,75	5,95	-2,85	-3,2	72
P4+P59	ASSOCIADA	3,55	5,15	-2,85	-2,85	35
P5+P6+P9	ASSOCIADA	8,35	5,95	-2,85	-3,7	88
P7	ISOLADA	7,55	6,75	-2,85	-3,2	90
P11	ISOLADA	4,35	4,35	-2,85	-3,2	36
P12	ISOLADA	5,95	5,95	-2,85	-3,2	64
P13	ISOLADA	5,95	5,95	-2,85	-3,7	64
P14	ISOLADA	9,15	4,35	-2,85	-3,35	72
P15	ISOLADA	5,95	5,95	-2,85	-3,2	64
P16+P67	ASSOCIADA	4,35	4,35	-2,85	-2,85	36

Fonte: O autor (2025)

De acordo com o projeto de melhoramento do solo a carga permanente máxima por coluna é de 200kN (20tf). A tabela 8 mostra a carga máxima por estaca em cada sapata, observamos que quatro destas (S12, S13, S14 e S15) excedem o limite estabelecido pelo projeto em no máximo 18% no caso da S13. Porém este resultado não é de todo preocupante, pois segundo Gusmão Filho e Gusmão (2000), a execução de uma estaca promove a compactação do solo circundante em um raio de influência da ordem de 2 a 2,5 vezes o diâmetro da estaca, e visto que as sapatas em redor estão compactadas, geram um confinamento maior na lâmina do prédio.

Tabela 8 - Carga permanente por coluna de argamassa

CARGA DE SERVIÇO DAS ESTACAS				
SAPATA	QUANTIDADE DE ESTACAS	CARGA TRANSMITIDA PELO PILAR (Tf)	CARGA TRANSMITIDA PELO PILAR (kN)	CARGA POR ESTACA (kN)
S1	32	504,1	4943,6	154,5
S(P2+P8)	80	1079,3	10584,4	132,3
S(P3+P10)	72	1080	10591,2	147,1
S(P4+P59)	35	577	5658,5	161,7
S(P5+P6+P9)	88	1699,5	16666,5	189,4
S7	90	1280,5	12557,5	139,5
S11	36	732,9	7187,3	199,6
S12	64	1377,1	13504,8	211,0
S13	64	1540,9	15111,1	236,1
S14	72	1520,9	14915,0	207,2
S15	64	1444,1	14161,9	221,3
S(P16+P67)	36	726,8	7127,5	198,0

Fonte: O autor (2025)

Na tabela 9 foram estimadas as tensões admissíveis aplicando o método de Teixeira e o método de Décourt e Quaresma, comparando os resultados antes e depois do melhoramento de solo. Foi usado o N_{spt} médio da base da sapata até a profundidade do bulbo de tensões (2b). O aumento percentual é igual para os dois métodos, variando entre 16,3% até 231,2%. Um trabalho semelhante de Tabosa Filho (2022), com melhoramento de estacas de argamassa, encontrou um resultado variando entre 96,4% e 166,7%.

Tabela 9 - Estimativa do aumento da tensão admissível

SAPATA	MENOR DIMENSÃO b (m)	PROFUNDIDADE DO BULBO DE TENSÕES (m)	COTA DA BASE DA SAPATA (m)	MÉDIA DOS Nspt NO BULBO		TENSÃO ADMISSÍVEL (kN/m²)				AUMENTO (%)
						DÉCOURT E QUARESMA		TEIXEIRA (SIMPLIFICADO)		
				ANTES DO MELHOR.	DEPOIS DO MELHOR.	ANTES DO MELHOR.	DEPOIS DO MELHOR.	ANTES DO MELHOR.	DEPOIS DO MELHOR.	
P1	2,75	5,5	-3,07	7,7	25,5	104,3	345,3	154	510	231,2
P2+P8	5,95	11,9	-3,2	15,5	20,01	308,7	398,5	310	400,2	29,1
P3+P10	5,95	11,9	-3,2	15,5	20,01	308,7	398,5	310	400,2	29,1
P4+P59	3,55	7,1	-2,85	10,8	22,6	166,1	347,7	216	452	109,3
P5+P6+P9	5,95	11,9	-3,7	16,5	20,01	328,6	398,5	330	400,2	21,3
P7	6,75	13,5	-3,2	15,3	17,8	324,6	377,6	306	356	16,3
P11	4,35	8,7	-3,2	13,7	23,6	233,3	401,9	274	472	72,3
P12	5,95	11,9	-3,2	15,5	20,01	308,7	398,5	310	400,2	29,1
P13	5,95	11,9	-3,7	16,5	20,01	328,6	398,5	330	400,2	21,3
P14	4,35	8,7	-3,35	13,7	23,6	233,3	401,9	274	472	72,3
P15	5,95	11,9	-3,2	15,5	20,01	308,7	398,5	310	400,2	29,1
P16+P67	4,35	8,7	-2,85	12,7	22,1	216,3	376,3	254	442	74,0

Fonte: O autor (2025)

4.4 ANÁLISE DOS RECALQUES

A partir das medições de recalque elaboradas, contendo as leituras de cota dos pinos de cada pilar em função do tempo, sempre em relação a primeira leitura feita em 26/12/2022 e em posse das coordenadas de cada pino, como mostrado na Tabela 10, foi possível com o auxílio do Software Surfer gerar representações gráficas das curvas de isorecalque para cada leitura e, através dessas curvas, obter uma visão global do desempenho da edificação.

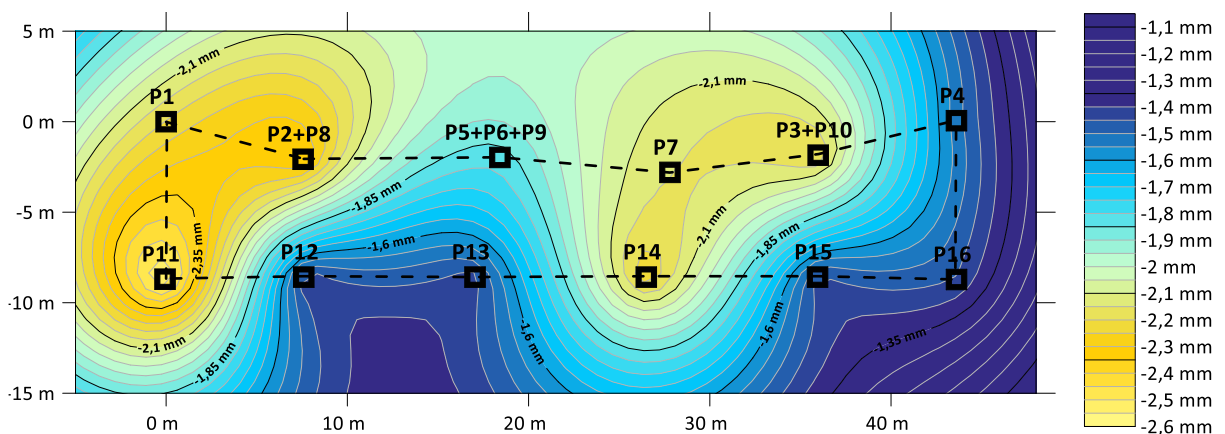
Tabela 10 - Recalque entre L1 e L17

Pinos	COTA		L1 - L17		COORDENADAS	
	L1 (m)	L17 (m)	RECALQUE (mm)	VELOCIDADE (µm)	X	Y
P2+P8	5,08868	5,05793	30,75	43	7,60	-2,11
P3+P10	5,07911	5,04784	31,27	43	36,08	-1,88
P4	5,07293	5,05341	19,52	27	43,66	0
P5+P6+P9	5,09864	5,06305	35,59	49	19,46	-1,99
P11	5,13783	5,10730	30,53	42	0,00	-8,6
P12	5,08549	5,04641	39,08	54	7,64	-8,6
P13	5,05301	5,01468	38,33	53	17,10	-8,6
P14	5,11632	5,07427	42,05	58	26,56	-8,6
P15	5,03883	5,00618	32,65	45	35,90	-8,6
P16	5,11052	5,08539	25,13	35	43,66	-8,6

Fonte: O autor (2025)

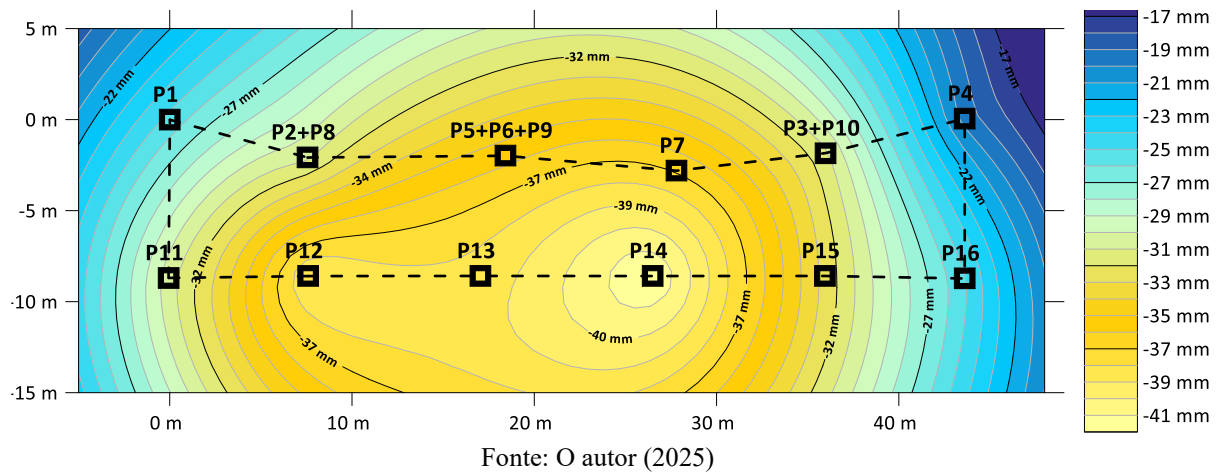
Os mapas de contorno das Leituras L2 e L17, estão representados nas Figura 39 e 40, as demais leituras, da L3 até L16, estão registradas no APENDICE B. A leitura L2 foi realizada quando a estrutura alcançou o 4º teto e a leitura L17, quando a estrutura estava finalizada, juntamente com toda a alvenaria, revestimentos e esquadrias.

Figura 39 – Curvas de isorecalque em 28/02/2023 (64 dias) – Leitura L2



Fonte: O autor (2025)

Figura 40 – Curvas de isorecalque em 17/12/2024 (722 dias) – Leitura L17



Para alguns autores o limite do recalque total (ρ) em solos arenosos é 40 mm, esse limite foi ultrapassado em 2,05 mm pelo pilar P14, que atingiu um $\rho_{\max}$ de 42,05 mm. Já para Poulos et al. (2001), esse recalque total está inferior ao limite de 50mm.

O recalque diferencial (δ) limite para areias é 25mm, o máximo atingido foi entre os pilares P4 e P14, com $\delta_{\max} = 22,53\text{mm}$, portanto dentro do aceitável.

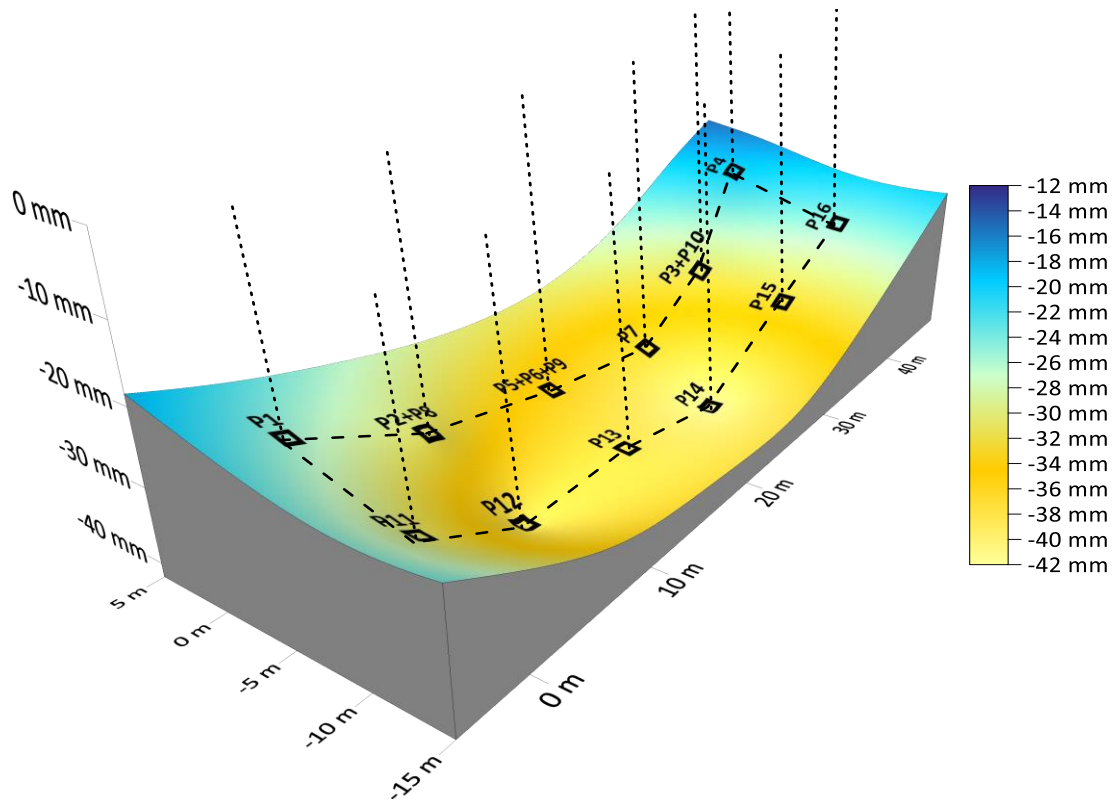
Quanto maior a quantidade de curvas de nível entre pilares, maior é o recalque diferencial (δ), somando-se a isso, se a distância entre pinos for pequena, maior será a distorção angular (β). As três maiores distorções angulares estão entre os pilares $P3/10/P4 = 1/665$, $P2/P12 = 1/779$ e $P4/P14 = 1/850$ (Tabela 11). Todas abaixo do limite ($1/500$) sugerido por Skempton e Macdonald (1956) e reassegurado por diversos outros autores, como mostrado na Figura 13 do subtópico 2.4, esse é o limite para a segurança contra fissuras.

Tabela 11 - Maiores distorções angulares (β)

PILARES		Distorção angular (β)
P3-P10	P4	1/665
P2	P12	1/779
P4	P14	1/850
P11	P12	1/894
P14	P16	1/1011
P3-P10	P14	1/1081
P4	P13	1/1484
P2	P13	1/1518
P4	P16	1/1533
P4	P5	1/1573
P5	P14	1/1618
P3-P10	P16	1/1650

Fonte: O autor (2025)

Figura 41 - Superfície 3D do recalque da leitura L17



Fonte: O autor (2025)

Algumas leituras de pilares foram desconsideradas, como as leituras dos pilares P1 e P7 que iniciaram tardiamente e foram interrompidas. A valores recalques utilizados para gerar as imagens que representam esses pilares foram feitos pelo próprio software, por meio de aproximações a partir dos valores dos pilares mais próximos.

As velocidades de recalques, calculadas para os pilares monitorados, se mostraram compatíveis e dentro do padrão de normalidade de acordo com Alonso (1991), como mostrado na Figura 38, no subtópico 3.6, e na tabela 12, pois não excederam 200 $\mu\text{m}/\text{dia}$, que segundo o autor, para prédios em construção e apoiados em fundação rasa, podem ser considerados normais. As maiores velocidades foram registradas na Leitura 6, no dia 01/08/2023, quando o prédio estava finalizando a parte estrutural e com alvenaria avançada e o Pilar 12 atingiu 190,3 $\mu\text{m}/\text{dia}$.

Tabela 12 - Velocidade de recalque da Leitura 6

PILARES	P2	P3	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
μ/dia	-100,3	-107,9	-152,4	-140	-136,9	-127,9	-115,5	-190,3	-184,5	-175,5	-141,7	-101,4

Fonte: O autor (2025)

5 CONCLUSÃO

Através da análise dos dados da obra apresentada neste trabalho, localizada na zona sul de Recife, onde foi realizada uma técnica de melhoramento de solo com estacas de compactação, foi possível demonstrar a eficiência dessa solução para ganho de resistência nas camadas iniciais do terreno e, através do acompanhamento dos recalques, comprovou o sucesso da execução.

A observação dos resultados das sondagens a percussão (SPT), antes e após o melhoramento, mostrou uma melhora significativa ao longo do comprimento das estacas, que foi em média 4,7 metros. No trecho entre 2,45 m e 7,45 m nota-se uma melhora considerável no N_{spt} médio, alcançando um fator de melhoramento $k_{médio}$ máximo de 7,81 e 5,13 em 3,45 m e 4,45 m, respectivamente. Com este resultado nas camadas iniciais se alcançou o objetivo do aumento da tensão admissível, variando entre 16,3% até 231,2%. A produtividade alcançada executando a técnica com martelo vibratório foi de 174 m/dia de estacas.

De acordo com o prof. Phd. Washington Moura, avaliador interno deste trabalho, através de sua experiência trabalhando na região de boa viagem a mais de 30 anos, foi possível perceber um aumento da consistência das argilas presentes nesse solo, anteriormente costumava ser de muito mole a mole e neste trabalho está variando de mole à média.

O recalque total máximo ($\rho_{máx}$) e o recalque diferencial máximo ($\delta_{máx}$) atingidos ficaram 16% e 10%, respectivamente, abaixo dos limites aceitáveis para solos arenosos, enquanto as distorções angulares (β) apresentaram resultados satisfatórios, menores que 1/500. Os resultados comprovam a eficácia da técnica de melhoramento utilizada, para viabilizar o uso de fundações superficiais em solos que naturalmente não suportariam cargas elevadas.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1991.
- ALVAREZ DE BARROS, R. **Avaliação do comportamento de fundações em estaca hélice através de medidas de recalques**. Campos dos Goytacazes: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia, 2005.
- AMORIM, M. D et al. **Plate Load Tests on Improved Ground with Construction and Demolition Wastes Compaction Piles**. In: 5TH INTERNATIONAL YOUNG GEOTECHNICAL ENGINEERS' CONFERENCE. Proceedings... Paris, 2013. p. 69-72.
- ANTUNES, Pedro Nuno de Noronha. **Técnicas de melhoramento de solos e metodologia de seleção**. 2016. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Área Departamental de Engenharia Civil, Lisboa, 2016.
- U.S. Army Corps of Engineers (1999). **Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities**. Engineering end Design. Department of the Army. Engineer Technical Letter 1110-1-185.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6122:2022: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459:2016: Solo — Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016. Versão corrigida em 24 abr. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6484:2020: Solo — Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180:2016: Solo — Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181:2025: Solo — Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7183:1982: Solo — Determinação do limite e relação de contração de solos.** Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8036:1983: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios — Procedimento.** Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13133:2021: Execução de levantamento topográfico — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2021. Versão corrigida em 19 mar. 2025.

BJERRUM, L. **Interaction between structure and soil.** Proceedings European CSMFE. **Anais...** Wiesbaden: 1963

BURLAND, J.B.; BROMS, B.B.; MELLO, V.F.B. (1977). Behavior of foundations and structures. In: INT. CONF. ON SOIL MECH. AND FOUND. ENGNG., 9., 1977, Tokyo. V.2, p.495-546.

BURLAND, J. B.; WROTH, C. P. **Settlement of buildings and associated damage: Session V review paper.** Conference on Settlement of Structures. **Anais...** Cambridge: Pentch Press, 1974.

CABRAL, Umberlândia. De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões. **Agência de Notícias IBGE**, 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de->

noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes. Acesso em: 3 set. 2024.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CINTRA J.C. A; AOKI, N.; ALBIERO, J H. **Tensão admissível em fundações diretas**. São Paulo, SP: Editora RiMa, 2003.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A.R. (1978). **Capacidade de carga de estacas a partir de valores SPT**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 6., 1978, Rio de Janeiro. V.1, p.45-54.

GUSMÃO, A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A.; OLIVEIRA, J. T. R.; e MAIA G. Brito. **Geotecnia no Nordeste**. 1. ed. Recife: Editora UFPE, 2005.

GUSMÃO FILHO, Jaime. **Desempenho de Obras Geotécnicas**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2006.

GUSMÃO FILHO, Jaime de Azevedo. **Fundações: do conhecimento geológico à prática da engenharia**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2002.

GUSMÃO FILHO, J. A. e GUSMÃO, A. D. (2000). **“Compaction Piles for Building Foundation”**. **International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne**, CD-ROM.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama do município de Recife**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>. Acesso em: 3 set. 2024.

MEYERHOF, G. G. **Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils**. J.S.M.F.D., A.S.C.E., v. 82, n. SM1, p. 866–1, 1956.

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

POLSHIN, D. E.; TOKAR, R. A. **Maximum allowable non-uniform settlement of structures**. Proceedings 4th. ICSMFE, v. 1, p. 402–405, 1957.

POULOS, H. G.; CARTER, J. P.; SMALL, J. C. Foundations and retaining structures - Research and practice. **15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2001.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geologia básica para engenharia civil**. São Paulo: Blucher, 2016.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 2. ed. São Paulo: Zigurate, 2009.

SAMPAIO, Bruno Sérgio. **Melhoramento de solo: avaliação de dois casos práticos**. 2024. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.

SANTOS, Danilo Silva dos. **Recalque em fundações profundas: análise da interação entre estacas de um edifício instrumentado do Recife**. 2020. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SCHNAID, Fernando. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SKEMPTON, A. W.; MACDONALD, D. H. The Allowable Settlements of Buildings. **Proc. I.C.E.**, v. 5, p. 727–768, 1956.

SOBRAL, Máira. **Como crescimento populacional lento e aumento na expectativa de vida influenciam o mercado imobiliário**. ADIT Brasil, 2024. Disponível em: <https://adit.com.br/como-crescimento-populacional-lento-e-aumento-na-expectativa-de-vida-influenciam-o-mercado-imobiliario/>. Acesso em: 30 ago. 2024.

SOUZA, Abner Pedro Queiroz de. **Avaliação de método de melhoramento de solo (em profundidade) para redução de custos de fundações**. 2015. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 2015.

TABOSA FILHO, Ricardo Sergio Macedo. **Melhoramento de solo arenoso por estacas de argamassa: um estudo de caso**. 2022. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Núcleo de Tecnologia, Caruaru, 2022.

TEIXEIRA, A.H.; GODOY, N.S. (1998). **Análise, projeto e execução de fundações rasas**. In: HACHICH et al. (eds.). *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini. Cap. 7, p.227-264.

ULBRICH, Horstpeter H. G. J.; MADUREIRA FILHO, José B. de; DEL LAMA, Eliane A.; DEHIRA, Lauro K. **Geologia básica para engenheiros**. São Paulo: IGc-USP, 2023.

VARGAS, M.; SILVA, F. R. **O problema das fundações de edifícios altos: experiência em São Paulo**. Conferência Regional Sul-Americana Sobre Edifícios Altos. **Anais...**Porto Alegre: 1973

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

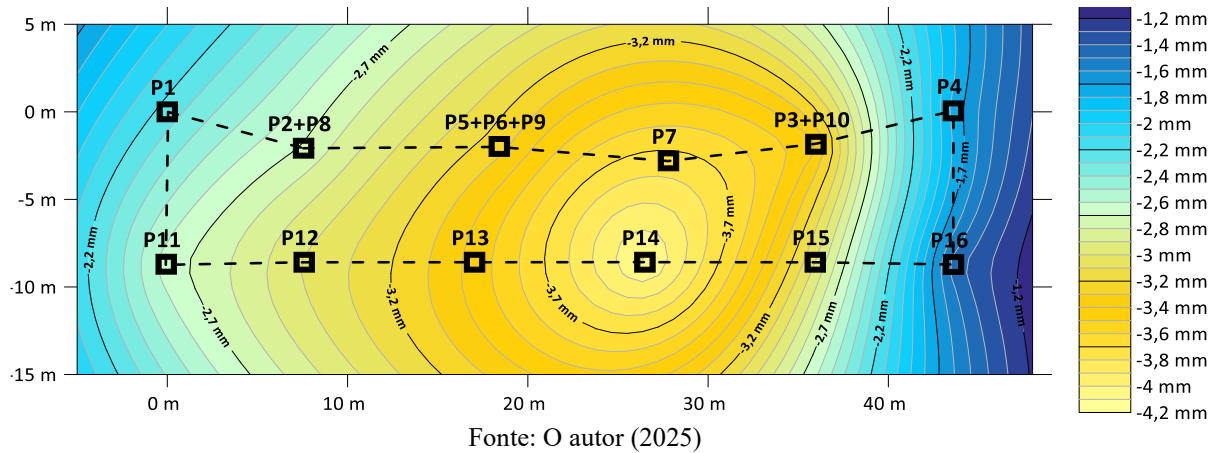
APÊNDICE A – TABELAS DOS RECALQUES

Intervalo (dias)	0	64	44	47	34	29	90	36	56	43	33	43	66	33	41	30	33
DATA	26/12/2022	28/02/2023	13/04/2023	30/05/2023	03/07/2023	01/08/2023	30/10/2023	05/12/2023	30/01/2024	13/03/2024	15/04/2024	28/05/2024	02/08/2024	04/09/2024	15/10/2024	14/11/2024	17/12/2024
Pinos	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17
P2	5,08868	5,08632	5,08597	5,08439	5,08293	5,08002	5,07251	5,07177	5,07021	5,06756	5,06572	5,06372	5,06241	5,06127	5,06005	5,05914	5,05793
P3	5,12505	5,12284	5,12163	5,12097	5,12061	5,11748	5,10930	5,11003	5,10890	5,10632	5,10315	5,10055	5,09934				
P4	5,07293	5,07141	5,07117	5,07117	5,06917	5,06920	5,06538	5,06483	5,06381	5,06106	5,05866	5,05683	5,05592				
P5	5,09864	5,09682	5,09538	5,09393	5,09228	5,08786	5,07936	5,07790	5,07583	5,07357	5,07111	5,06929	5,06779	5,06648	5,06508	5,06441	5,06305
P6	5,01041	5,00879	5,00731	5,00626	5,00563	5,00157	4,99393	4,99210	4,99141	4,98778	4,98629	4,98296	4,97959	4,97881	4,97748	4,97632	4,97520
P9	5,04264	5,04065	5,03901	5,03754	5,03632	5,03235	5,02331	5,02180	5,02036	5,01658	5,01464	5,01221	5,01060	5,00954	5,00868	5,00772	5,00635
P10	5,03320	5,03122	5,02992	5,02887	5,02829	5,02458	5,01657	5,01600	5,01467	5,01144	5,00901	5,00655	5,00549				
P11	5,13783	5,13526	5,13518	5,13436	5,13303	5,12968	5,12193	5,11995	5,11810	5,11602	5,11401	5,11266	5,11145	5,11064	5,10940	5,10802	5,10730
P12	5,08549	5,08408	5,08248	5,07998	5,07821	5,07269	5,06264	5,05962	5,05874	5,05565	5,05351	5,05185	5,05060	5,04991	5,04898	5,04742	5,04641
P13	5,05301	5,05158	5,04957	5,04776	5,04623	5,04088	5,03114	5,02929	5,02761	5,02376	5,02236	5,02040	5,01850	5,01821	5,01716	5,01545	5,01468
P14	5,11632	5,11407	5,11220	5,11009	5,10849	5,10340	5,09260	5,09051	5,08832	5,08465	5,08293	5,08014	5,07863	5,07771	5,07635	5,07528	5,07427
P15	5,03883	5,03740	5,03583	5,03486	5,03404	5,02993	5,02165	5,02003	5,01860	5,01518	5,01288			5,01003	5,00890	5,00779	5,00618
P16	5,11052	5,10907	5,10907	5,10896	5,10895	5,10601	5,09992	5,09846	5,09721	5,09419	5,09186	5,08970	5,08845	5,08728	5,08678	5,08628	5,08539

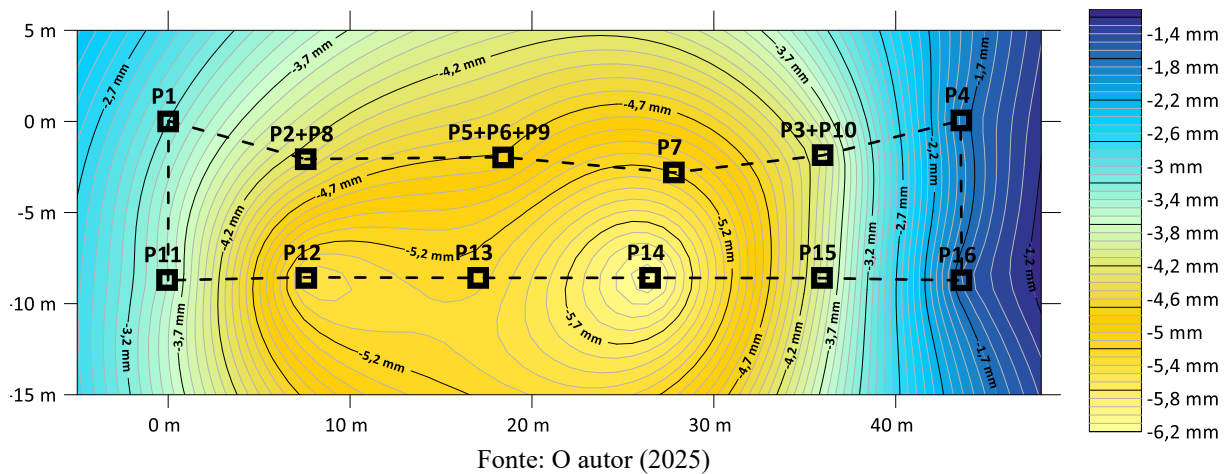
Intervalo (dias)	0	64	44	47	34	29	90	36	56	43	33	43	66	33	41	30	33
DATA	26/12/2022	28/02/2023	13/04/2023	30/05/2023	03/07/2023	01/08/2023	30/10/2023	05/12/2023	30/01/2024	13/03/2024	15/04/2024	28/05/2024	02/08/2024	04/09/2024	15/10/2024	14/11/2024	17/12/2024
Pinos	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17
P2+P8	0,00000	-2,36000	-2,71000	-4,29000	-5,75000	-8,66000	-16,17000	-16,91000	-18,47000	-21,12000	-22,96000	-24,96000	-26,27000	-27,41000	-28,63000	-29,54000	-30,75000
P3+P10	0,00000	-2,21000	-3,42000	-4,08000	-4,44000	-7,57000	-15,75000	-15,02000	-16,15000	-19,73000	-21,90000	-24,50000	-25,71000	-27,10000	-28,49000	-29,88000	-31,27000
P4	0,00000	-1,52000	-1,76000	-1,76000	-3,76000	-3,73000	-7,55000	-8,10000	-9,12000	-11,87000	-14,27000	-16,10000	-17,01000	-17,63750	-18,26500	-18,89250	-19,52000
P5+P6+P9	0,00000	-1,82000	-3,26000	-4,71000	-6,36000	-10,78000	-19,28000	-20,74000	-22,81000	-25,07000	-27,53000	-29,35000	-30,85000	-32,16000	-33,56000	-34,23000	-35,59000
P11	0,00000	-2,57000	-2,65000	-3,47000	-4,80000	-8,15000	-15,90000	-17,88000	-19,73000	-21,81000	-23,82000	-25,17000	-26,38000	-27,19000	-28,43000	-29,81000	-30,53000
P12	0,00000	-1,41000	-3,01000	-5,51000	-7,28000	-12,80000	-22,85000	-25,87000	-26,75000	-29,84000	-31,98000	-33,64000	-34,89000	-35,58000	-36,51000	-38,07000	-39,08000
P13	0,00000	-1,43000	-3,44000	-5,25000	-6,78000	-12,13000	-21,87000	-23,72000	-25,40000	-29,25000	-30,65000	-32,61000	-34,51000	-34,80000	-35,85000	-37,56000	-38,33000
P14	0,00000	-2,25000	-4,12000	-6,23000	-7,83000	-12,92000	-23,72000	-25,81000	-28,00000	-31,67000	-33,39000	-36,18000	-37,69000	-38,61000	-39,97000	-41,04000	-42,05000
P15	0,00000	-1,43000	-3,00000	-3,97000	-4,79000	-8,90000	-17,18000	-18,80000	-20,23000	-23,65000	-25,95000	-27,37500	-28,80000	-29,93000	-31,04000	-31,55000	-32,65000
P16	0,00000	-1,45000	-1,45000	-1,56000	-1,57000	-4,51000	-10,60000	-12,06000	-13,31000	-16,33000	-18,66000	-20,82000	-22,07000	-23,24000	-23,74000	-24,24000	-25,13000

APÊNDICE B – MAPAS DE CONTORNO DO RECALQUE

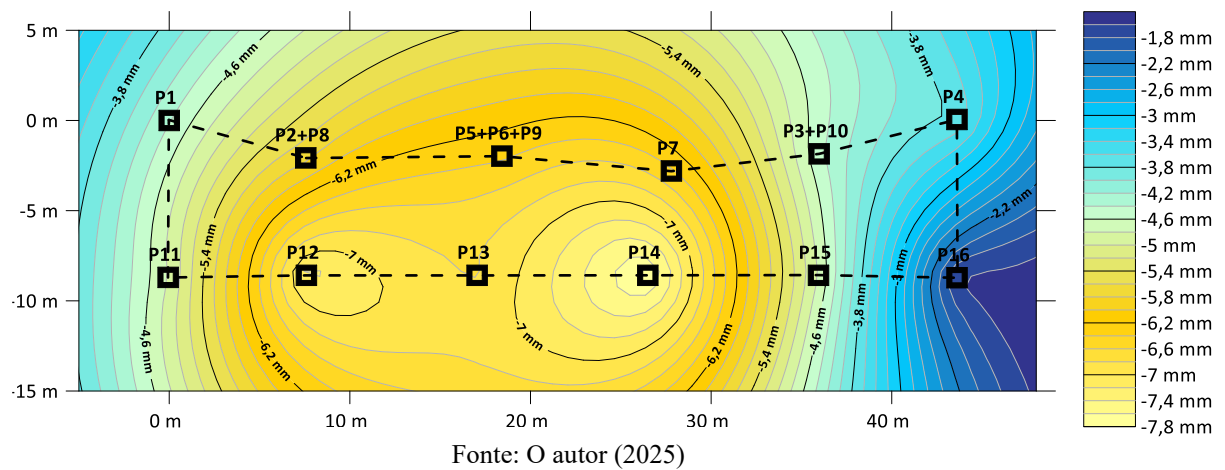
Mapa de contorno do recalque em 13/04/2023 (108 dias) – Leitura L3



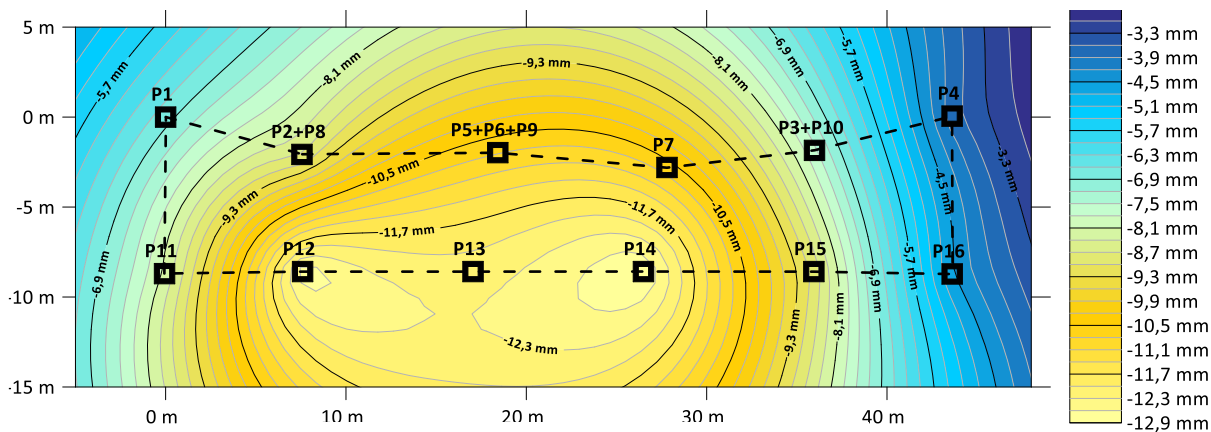
Mapa de contorno do recalque em 30/05/2023 (155 dias) – Leitura L4



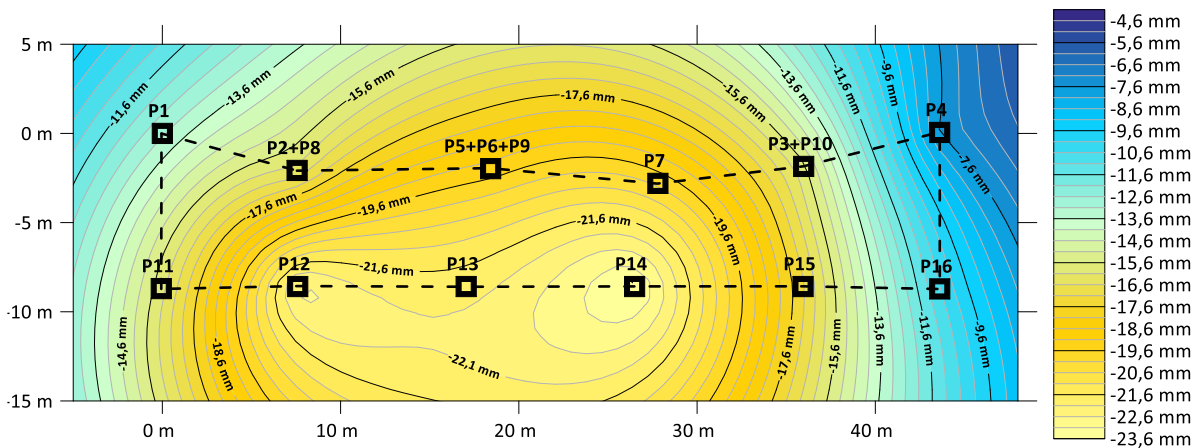
Mapa de contorno do recalque em 03/07/2023 (189 dias) – Leitura L5



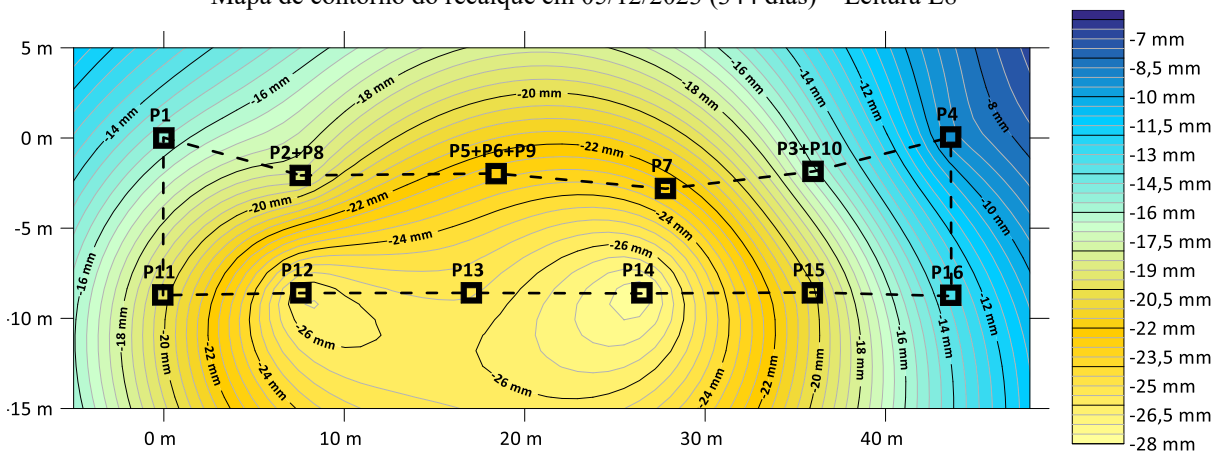
Mapa de contorno do recalque em 01/08/2023 (218 dias) – Leitura L6



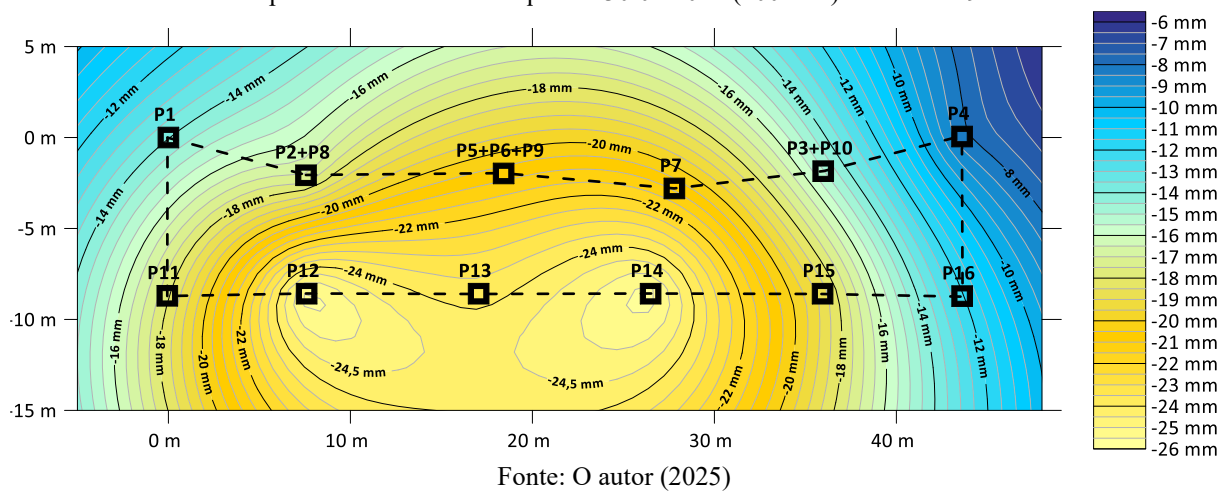
Mapa de contorno do recalque em 30/10/2023 (308 dias) – Leitura L7



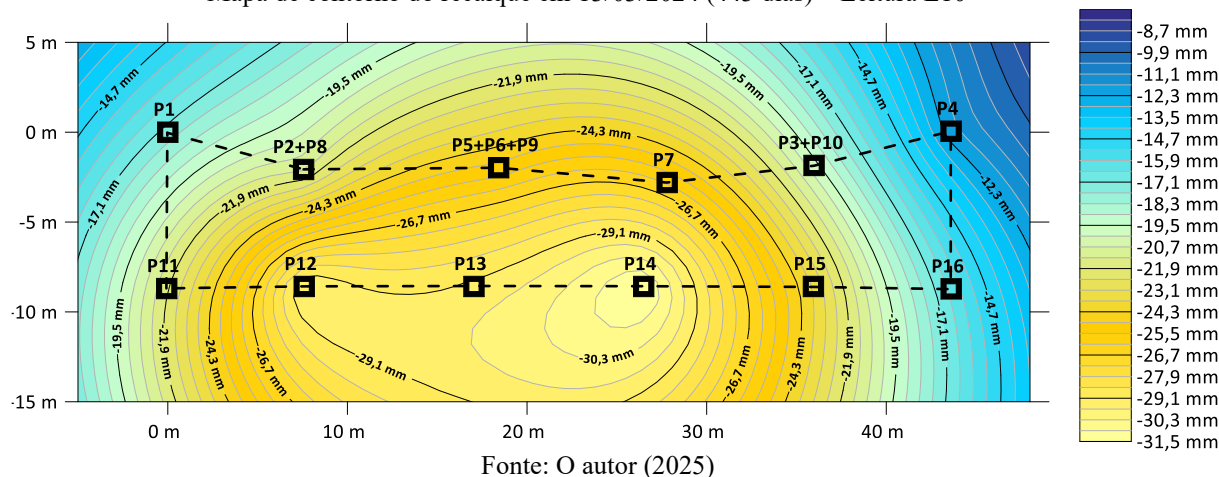
Mapa de contorno do recalque em 05/12/2023 (344 dias) – Leitura L8



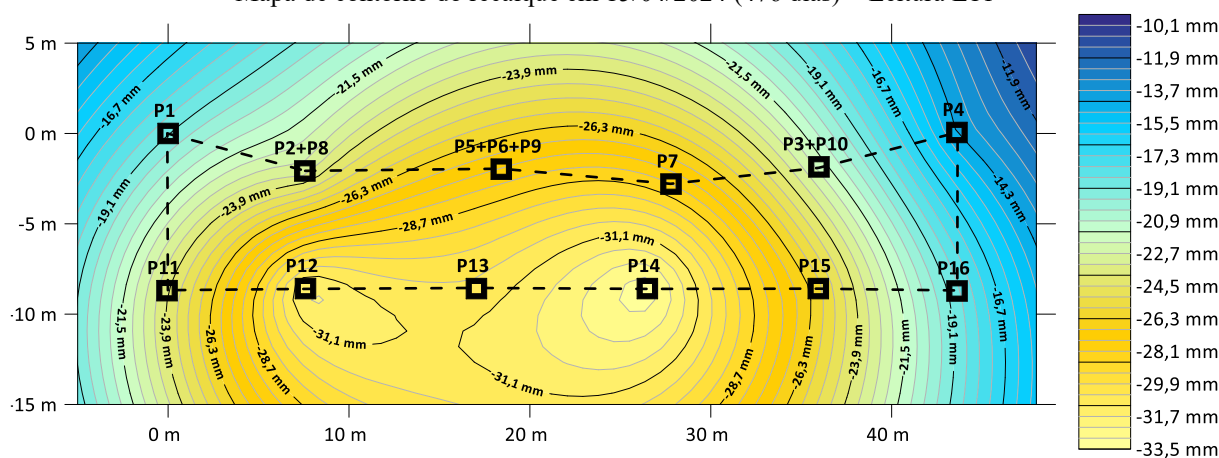
Mapa de contorno do recalque em 30/01/2024 (400 dias) – Leitura L9



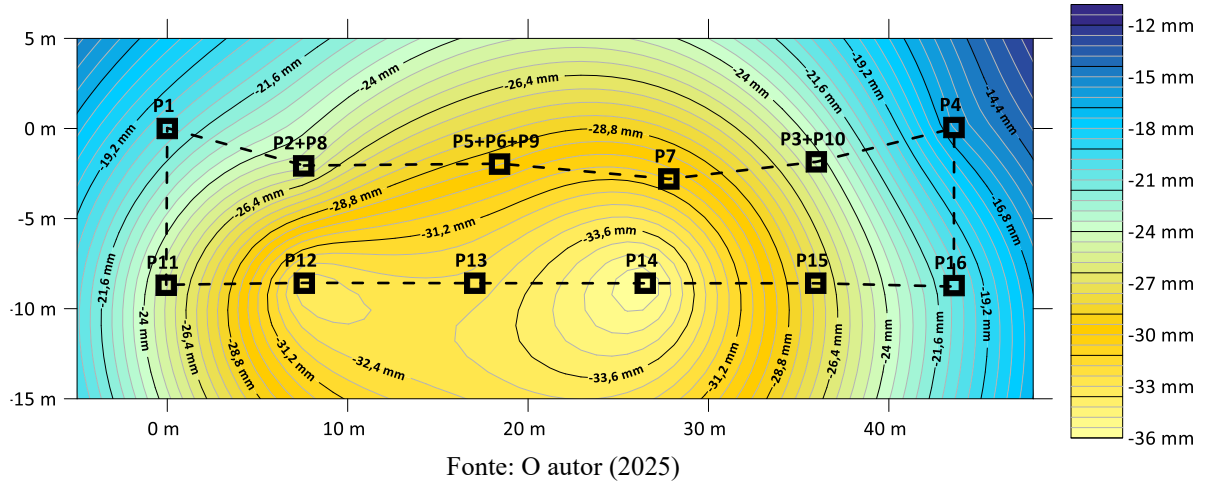
Mapa de contorno do recalque em 13/03/2024 (443 dias) – Leitura L10



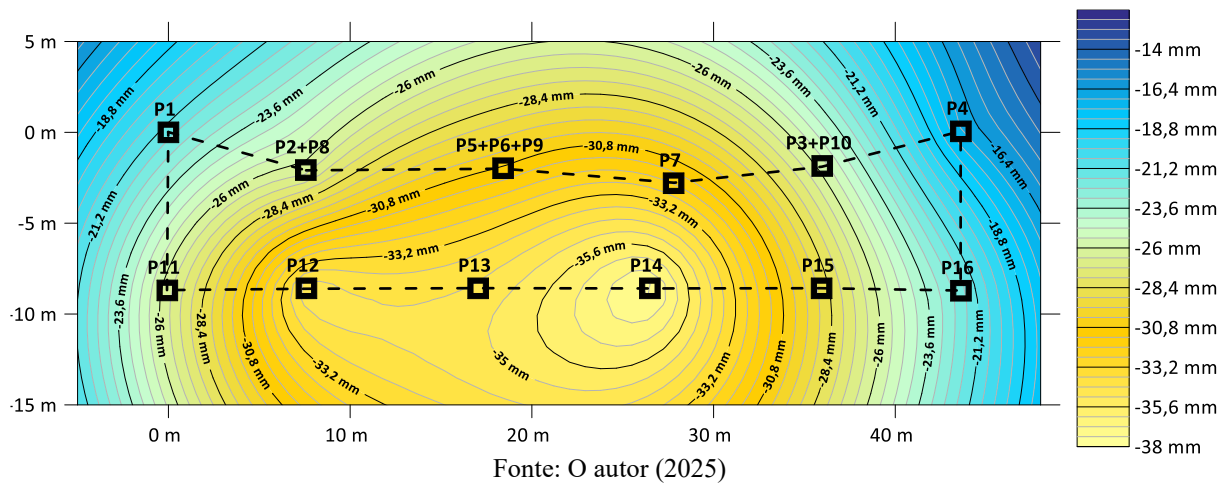
Mapa de contorno do recalque em 15/04/2024 (476 dias) – Leitura L11



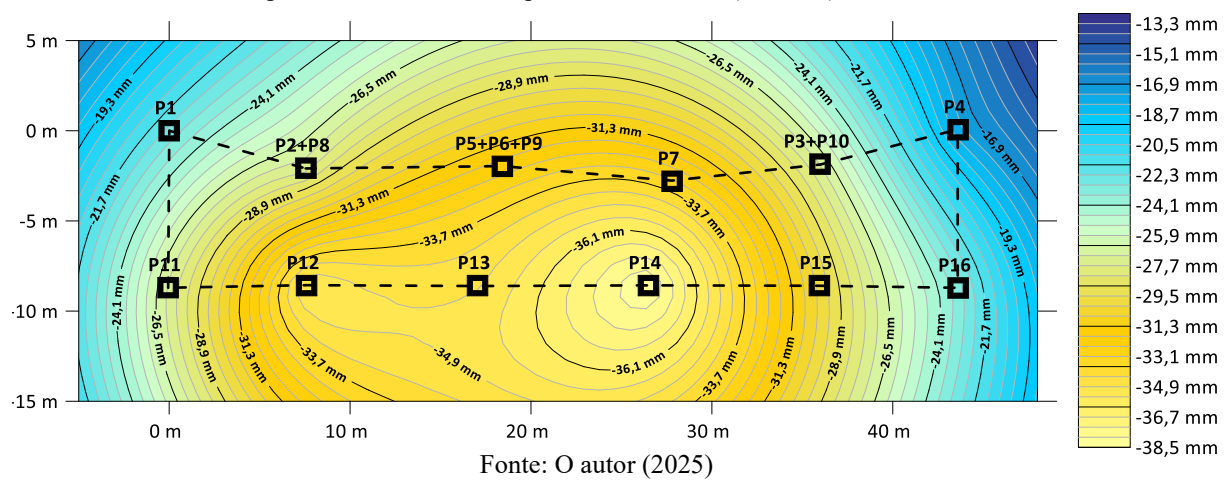
Mapa de contorno do recalque em 28/05/2024 (519 dias) – Leitura L12



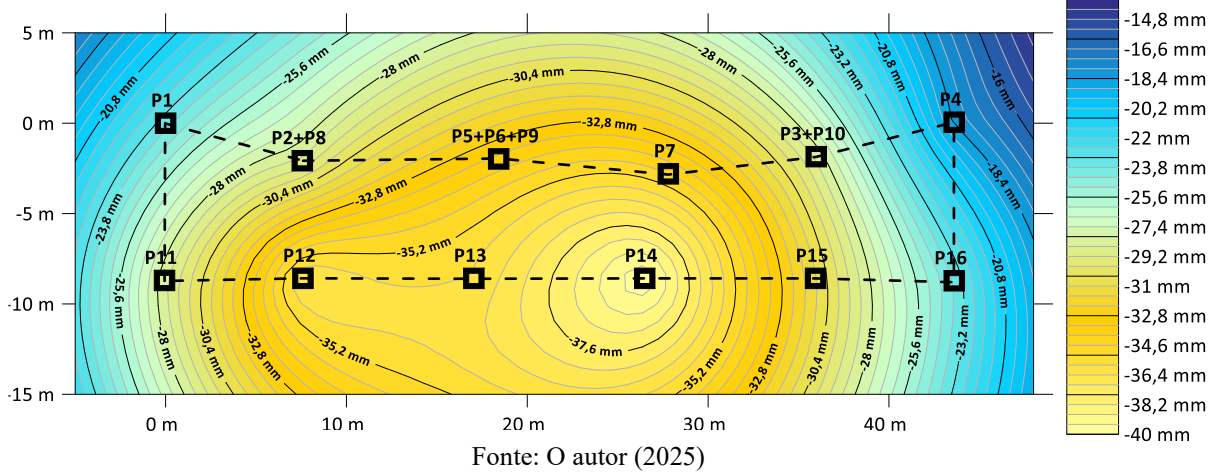
Mapa de contorno do recalque em 02/08/2024 (585 dias) – Leitura L13



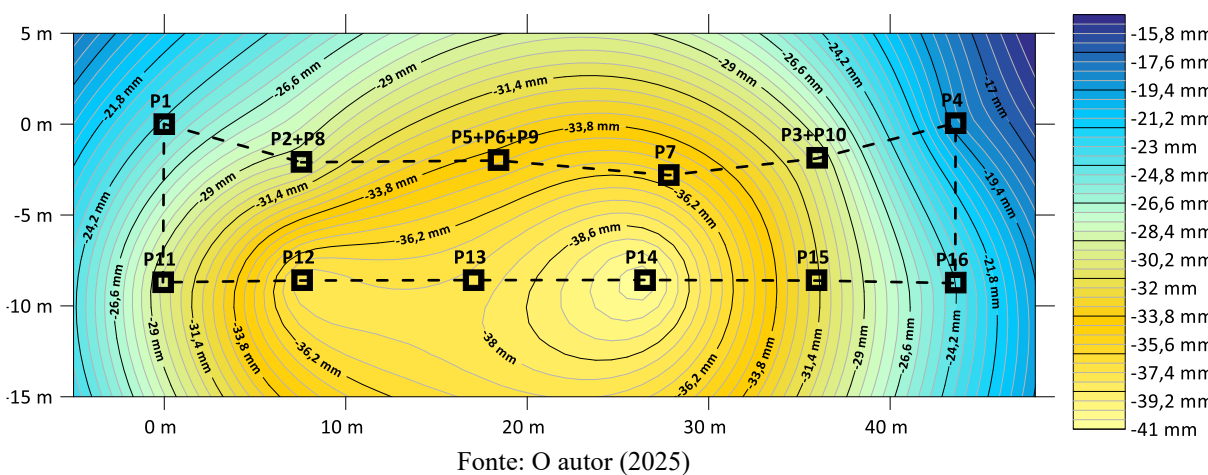
Mapa de contorno do recalque em 04/09/2024 (618 dias) – Leitura L14



Mapa de contorno do recalque em 15/10/2024 (659 dias) – Leitura L15

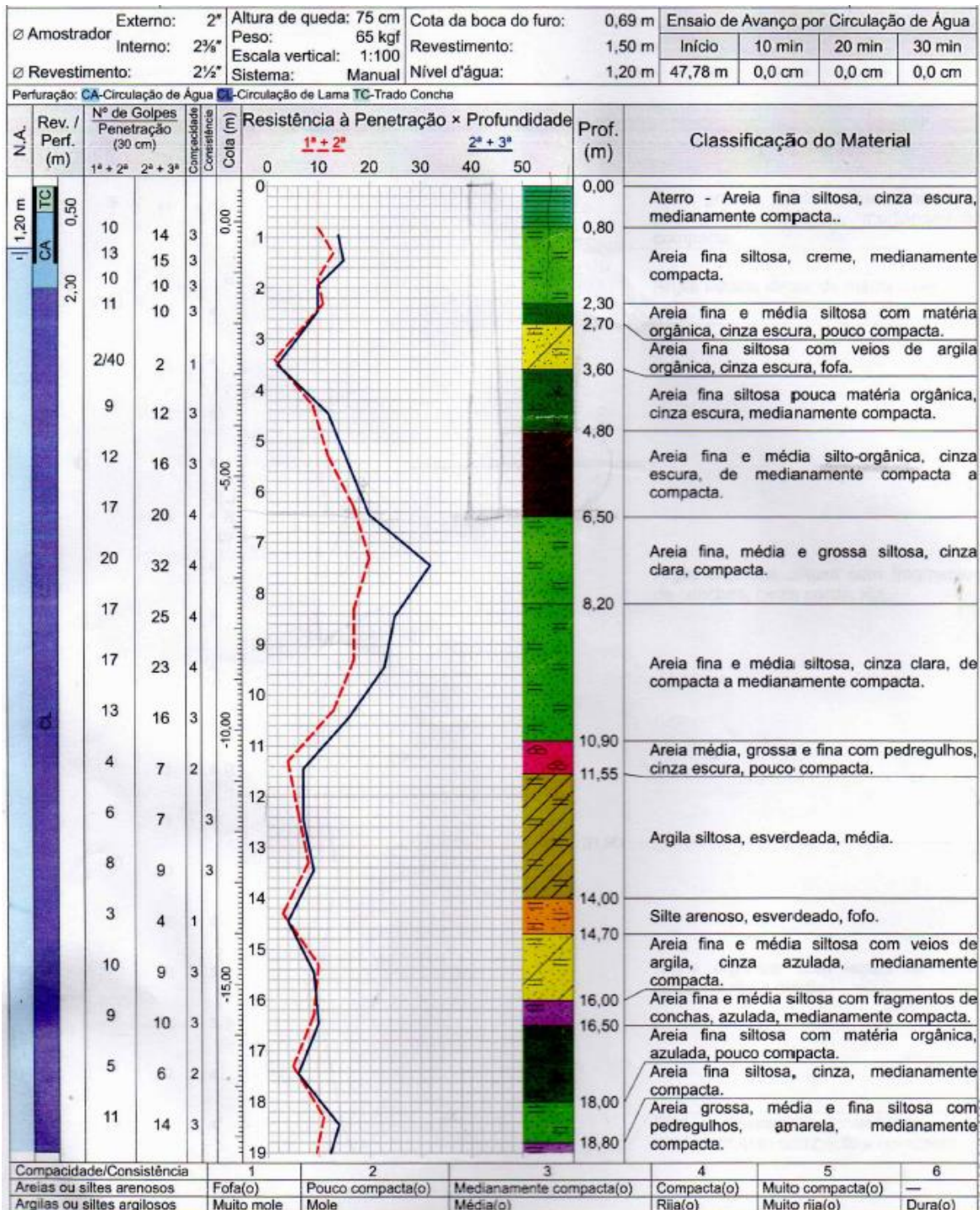


Mapa de contorno do recalque em 14/11/2024 (689 dias) – Leitura L16

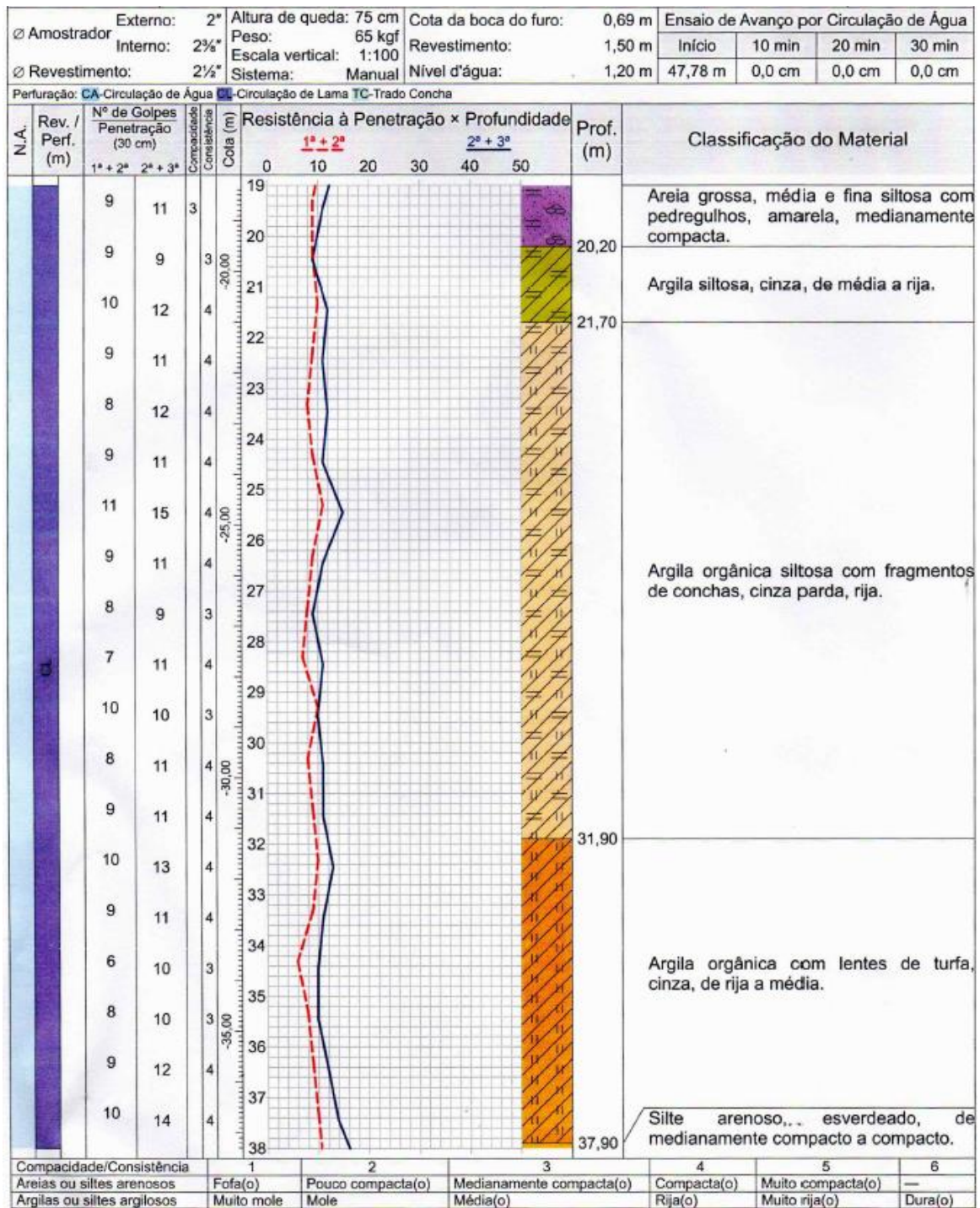


ANEXO A – BOLETIM DAS SONDAGENS ANTES DO MELHORAMENTO

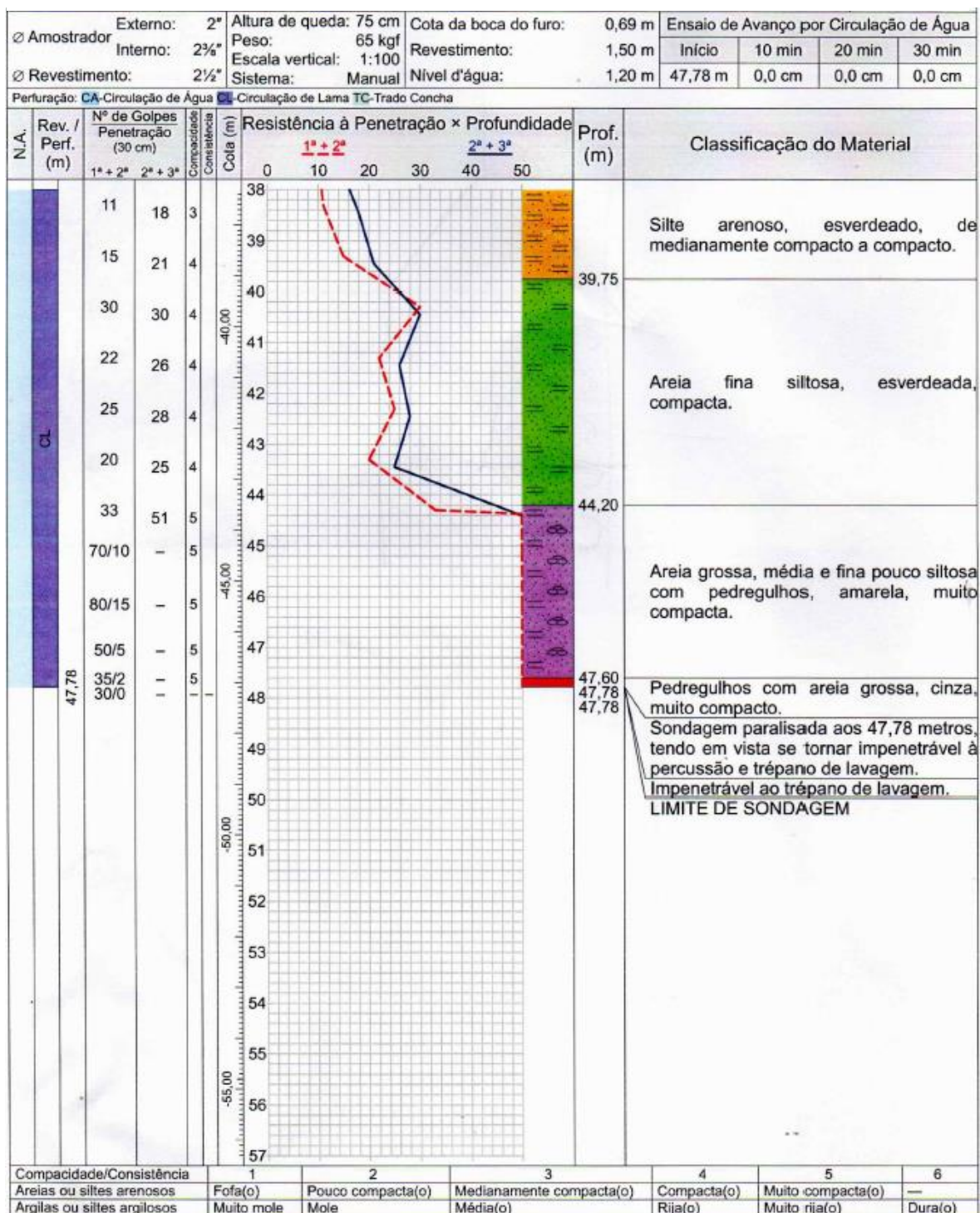
SP002- PARTE01



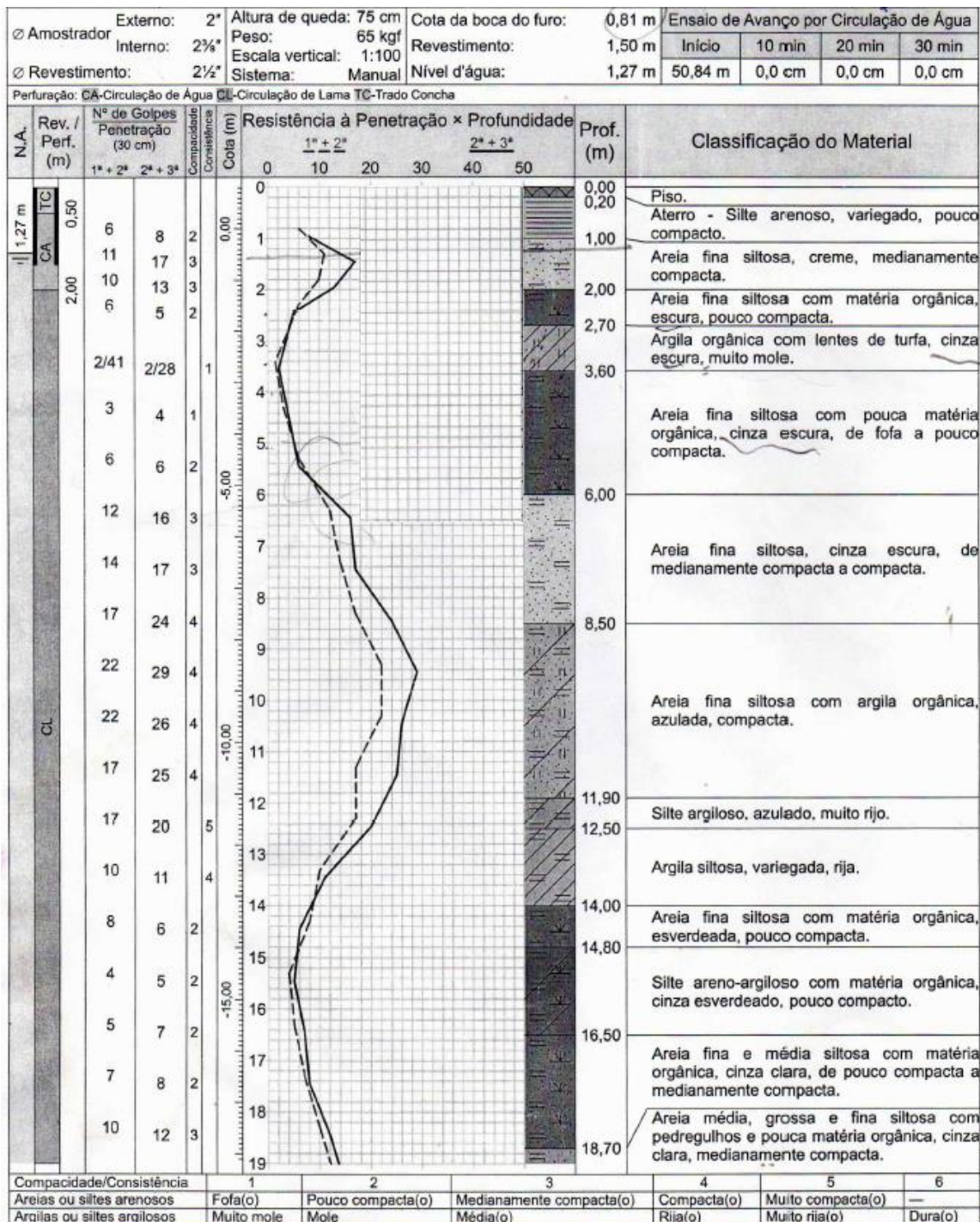
SP002- PARTE 02



SP002- PARTE 03



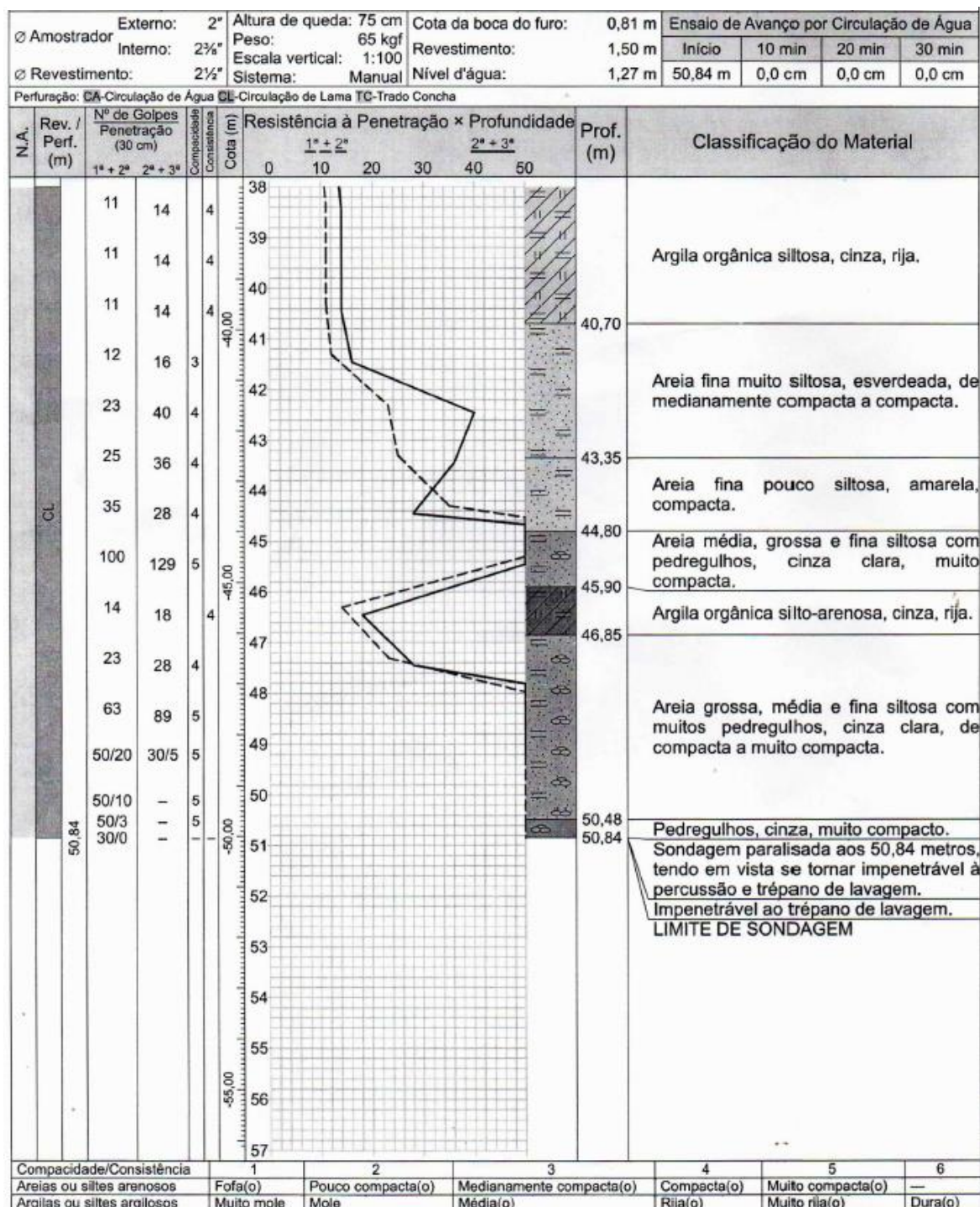
SP003- PARTE 01



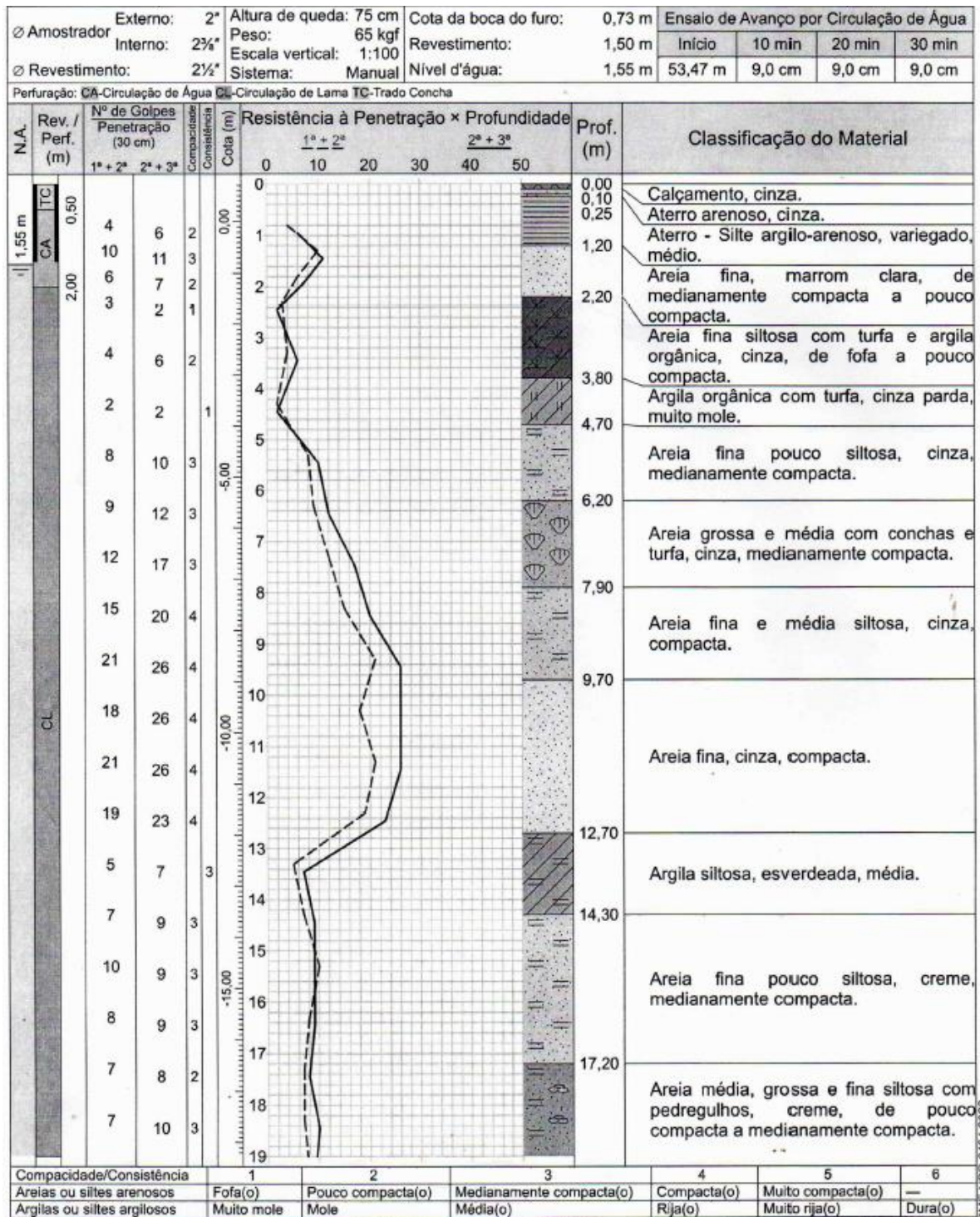
SP003- PARTE 02

Ø Amostrador		Externo: 2"	Altura de queda: 75 cm	Cota da boca do furo: 0,81 m	Ensaio de Avanço por Circulação de Água							
Interno: 2½"		Peso: 65 kgf	Escala vertical: 1:100	Revestimento: 1,50 m	Início	10 min	20 min	30 min				
Ø Revestimento: 2½"		Sistema: Manual	Nível d'água: 1,27 m	1,27 m	50,84 m	0,0 cm	0,0 cm	0,0 cm				
Perfuração: CA-Circulação de Água CL-Circulação de Lama TC-Trado Concha												
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Cota (m)	Resistência à Penetração x Profundidade					Prof. (m)	Classificação do Material	
		1ª + 2ª	2ª + 3ª		1ª + 2ª 2ª + 3ª 0 10 20 30 40 50							
CL		13	15	3	19						20,55	Areia média, grossa e fina siltosa com pedregulhos e pouca matéria orgânica, cinza clara, medianamente compacta.
		12	14	3	20							
		11	11	4	21						23,00	Argila siltosa com matéria orgânica, cinza escura, de rija a média.
		9	10	3	22							
		7	9	3	23	Argila orgânica siltosa com fragmentos de conchas, cinza, rija.					29,90	Argila orgânica com lentes de turfa, cinza escura, rija.
		7	11	4	24							
		8	10	3	25							
		8	11	4	26							
		9	12	4	27							
		9	12	4	28							
		9	11	4	29							
		10	13	4	30	Argila orgânica siltosa, cinza, rija.					32,70	
		9	11	4	31							
		8	12	4	32							
		10	12	4	33							
		11	14	4	34							
		11	14	4	35							
	9	12	4	36								
	10	13	4	37								
				38								
Compacidade/Consistência				1	2	3	4	5	6			
Areias ou siltes arenosos				Fofa(o)	Pouco compacta(o)	Medianamente compacta(o)	Compacta(o)	Muito compacta(o)	—			
Argilas ou siltes argilosos				Muito mole	Mole	Média(o)	Rija(o)	Muito rija(o)	Dura(o)			

SP003- PARTE 03



SP004- PARTE 01



SP004- PARTE 02

Ø Amostrador		Externo: 2"	Altura de queda: 75 cm	Cota da boca do furo: 0,73 m	Ensaio de Avanço por Circulação de Água								
		Interno: 2 3/4"	Peso: 65 kgf	Revestimento: 1,50 m	Início	10 min	20 min	30 min					
Ø Revestimento: 2 1/2"		Escala vertical: 1:100	Sistema: Manual	Nível d'água: 1,55 m	53,47 m	9,0 cm	9,0 cm	9,0 cm					
Perfuração: CA-Circulação de Água CL-Circulação de Lama TC-Trado Concha													
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Compacidade/Consistência	Resistência à Penetração x Profundidade						Prof. (m)	Classificação do Material	
		1ª + 2ª	2ª + 3ª		Cota (m)	0	10	20	30	40			50
CL		8	9	3	19							19,40	Areia média, grossa e fina siltosa com pedregulhos, creme, de pouco compacta a medianamente compacta.
		7	8	3	20								Argila siltosa, cinza, média.
		7	9	3	21							21,90	
		7	10	3	22								Argila orgânica com conchas, cinza, de média a rija.
		8	10	3	23								
		8	11	4	24							24,60	
		8	10	3	25								Argila orgânica siltosa, cinza, de média a rija
		7	9	3	26								
		9	11	4	27								
		8	9	3	28							28,70	
		7	8	3	29								Argila orgânica com lentes de turfa, cinza, de média a rija.
		8	11	4	30								
		8	10	3	31								
		8	9	3	32								
		9	11	4	33								
		8	10	3	34								
		10	10	3	35								
		9	11	4	36								
		8	11	4	37								
					38							37,90	
Compacidade/Consistência					1	2	3	4	5	6			
Areias ou siltes arenosos					Fofa(o)	Pouco compacta(o)	Medianamente compacta(o)	Compacta(o)	Muito compacta(o)	—			
Argilas ou siltes argilosos					Muito mole	Mole	Média(o)	Rija(o)	Muito rija(o)	Dura(o)			

SP004- PARTE 03

Perfuração: CA-Circulação de Água CL-Circulação de Lama TC-Trado Concha		Altura de queda: 75 cm		Cota da boca do furo: 0,73 m		Ensaio de Avanço por Circulação de Água					
Ø Amostrador	Externo: 2"	Peso: 65 kgf	Revestimento: 1,50 m	Início				10 min	20 min	30 min	
Ø Revestimento: 2 1/2"	Interno: 2 3/4"	Escala vertical: 1:100	Sistema: Manual	Nível d'água: 1,55 m				53,47 m	9,0 cm	9,0 cm	9,0 cm

N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Consistência	Cota (m)	Resistência à Penetração x Profundidade						Prof. (m)	Classificação do Material
		1ª + 2ª	2ª + 3ª				0	10	20	30	40		
CL		7	9	3	38								Argila orgânica arenosa, cinza, média.
		7	8	3	39								
		11	14	3	40							39,80	Silte arenoso, cinza, medianamente compacto.
		17	21	4	41							40,90	Areia fina siltosa com matéria orgânica, cinza, compacta.
		7	9	3	42							41,80	
		9	10	3	43								Argila orgânica siltosa, cinza, média.
		25	28	4	44							43,95	Silte arenoso com lentes de turfa, cinza, compacto.
		21	24	4	45							44,40	
		19	35	6	46							46,30	Areia fina siltosa, cinza, compacta,
		28	32	4	47							46,80	Argila orgânica arenosa com pedregulhos, cinza, dura.
		35	33	4	48							47,30	Areia média, grossa e fina siltosa com pedregulhos, cinza, compacta.
		28	26	4	49								
		23	26	4	50								Areia média, grossa e fina pouco siltosa com muitos pedregulhos, cinza, compacta.
		30	30	4	51								
		27	38	4	52								
	30/9	-	5	53							52,95	Pedregulhos com areia grossa e média, cinza, muito compacto.	
	30/0	-	-	54							53,47	Sondagem paralisada aos 53,47 metros, tendo em vista se tornar impenetrável à percussão e trépano de lavagem.	
				55							53,74	Impenetrável ao trépano de lavagem.	
				56								LIMITE DE SONDAGEM	
				57									

Compacidade/Consistência	1	2	3	4	5	6
Arenas ou siltes arenosos	Fofa(o)	Pouco compacta(o)	Medianamente compacta(o)	Compacta(o)	Muito compacta(o)	—
Argilas ou siltes argilosos	Muito mole	Mole	Média(o)	Rija(o)	Muito rija(o)	Dura(o)

SP005- PARTE 01

[illegible]

SP005- PARTE 02

Ø Amostrador		Externo: 2"	Altura de queda: 75 cm	Cota da boca do furo: 0,70 m	Ensaio de Avanço por Circulação de Água										
		Interno: 2½"	Peso: 65 kgf	Revestimento: 1,50 m	Início	10 min	20 min	30 min							
Ø Revestimento: 2½"			Escala vertical: 1:100	Nível d'água: 1,55 m	46,77 m	0,0 cm	0,0 cm	0,0 cm							
			Sistema: Manual												
Perfuração: CA-Circulação de Água CL-Circulação de Lama TC-Trado Concha															
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Compacidade Consistência	Cota (m)	Resistência à Penetração × Profundidade					Prof. (m)	Classificação do Material			
		1ª + 2ª	2ª + 3ª			$\frac{1^a + 2^a}{2}$ $\frac{2^a + 3^a}{2}$									
						0	10	20	30	40			50		
CL		7	11	3	19								20,30	Areia fina siltosa, azulada, de medianamente compacta a pouco compacta.	
		7	9	3	20										
		11	14	4	21								22,00	Argila siltosa, azulada, de média a rija.	
		12	13	4	22										
		10	13	4	23								23,50	Argila orgânica siltosa, cinza escura, rija.	
		8	10	3	24										
		8	11	4	25									Argila orgânica, cinza escura, de média a rija.	
		9	12	4	26										
		8	11	4	27										
		6	8	3	28										
		7	8	3	29										
		9	9	3	30										
		10	12	4	31										
		8	8	3	32										
		7	9	3	33										
		8	10	3	34										
		6	8	3	35										
		8	10	3	36										
		7	9	3	37										
					38									37,90	Argila orgânica com turfa, cinza escura, média.
															Argila orgânica siltosa com turfa, cinza, rija.
Compacidade/Consistência					1	2	3	4	5	6					
Areias ou siltes arenosos					Fofa(o)	Pouco compacta(o)	Medianamente compacta(o)	Compacta(o)	Muito compacta(o)	—					
Argilas ou siltes argilosos					Muito mole	Mole	Média(o)	Rija(o)	Muito rija(o)	Dura(o)					

SP005- PARTE 03

Ø Amostrador		Externo: 2"	Altura de queda: 75 cm	Cota da boca do furo: 0,70 m	Ensaio de Avanço por Circulação de Água						
		Interno: 2 3/4"	Peso: 65 kgf	Revestimento: 1,50 m	Início	10 min	20 min	30 min			
Ø Revestimento: 2 1/2"		Sistema: Manual	Escala vertical: 1:100	Nível d'água: 1,55 m	46,77 m	0,0 cm	0,0 cm	0,0 cm			
Perfuração: CA-Circulação de Água CL-Circulação de Lama TC-Trado Concha											
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Compacidade/Consistência	Resistência à Penetração x Profundidade					Prof. (m)	Classificação do Material
		1ª + 2ª	2ª + 3ª		0 10 20 30 40 50 1ª + 2ª 2ª + 3ª						
CL	8	11	4	38						38,80	Argila orgânica siltosa com turfa, cinza, rija.
	14	18	3	39						39,75	Silte arenoso, cinza, medianamente compacto.
	67/23	50/8	5	40						40,70	Areia fina siltosa, cinza, muito compacta.
	11	13	4	41						42,25	Argila orgânica siltosa com turfa, cinza escura, rija.
	21	44	5	42						44,35	Areia fina muito siltosa, esverdeada, de muito compacta a compacta.
	15	24	4	43						44,80	Areia fina siltosa, amarela, compacta.
	19	27	4	44						46,77	Pedregulhos com areia grossa e média, amarelo, muito compacto.
	139	79/15	5	45							Sondagem paralisada aos 46,77 metros, tendo em vista se tornar impenetrável à percussão e trépano de lavagem. Impenetrável ao trépano de lavagem. LIMITE DE SONDAGEM
	60/11	-	5	46							
	30/0	-	-	47							
46,77											

DUE NED 6484-0700

SP006- PARTE 01

Externo: 2"		Altura de queda: 75 cm		Cota da boca do furo: 0,62 m		Ensaio de Avanço por Circulação de Água							
Amostrador Interno: 2 3/4"		Peso: 65 kgf		Revestimento: 1,50 m		Início		10 min	20 min	30 min			
Revestimento: 2 1/2"		Escala vertical: 1:100		Sistema: Manual		Nível d'água: 1,33 m		45,27 m	0,0 cm	0,0 cm	0,0 cm		
Perfuração: CA-Circulação de Água CL-Circulação de Lama TC-Trado Concha													
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Compacidade Consistência	Resistência à Penetração x Profundidade						Prof. (m)	Classificação do Material	
					Cota (m)		1ª + 2ª		2ª + 3ª				
		1ª + 2ª	2ª + 3ª			0	10	20	30	40	50		
1,33 m	TC					0,00						0,00	Piso cimentado.
	CA					0,50						0,15	Aterro - Areia fina siltosa, cinza escura medianamente compacta.
		13	12	3								1,00	Areia fina siltosa, creme, de compacta a medianamente compacta.
		17	23	4									
		14	17	3								2,65	Argila orgânica com veios de turfa, cinza escura, muito mole.
		15	18	3								3,75	Areia fina e média siltosa com matéria orgânica, cinza escura, medianamente compacta.
		2/46	1/15	1								5,50	
		13	14	3									
		14	17	3									
		5	7	2									
		12	13	3									
		12	16	3									
		12	15	3									
		14	18	3								9,80	
		19	27	4									
		20	26	4									
		17	20	4								13,80	Areia fina e média siltosa, cinza clara, de medianamente compacta a compacta.
		5	7	2									
		8	9	3									
		13	15	3									
		12	14	3								15,50	Silte arenoso, esverdeado, de pouco compacto a medianamente compacto.
		9	10	3									

SP006- PARTE 02

Ø Amostrador		Externo: 2"	Altura de queda: 75 cm	Cota da boca do furo: 0,62 m	Ensaio de Avanço por Circulação de Água								
		Interno: 2 3/4"	Peso: 65 kgf	Revestimento: 1,50 m	Início	10 min	20 min	30 min					
Ø Revestimento: 2 1/2"			Escala vertical: 1:100	Nível d'água: 1,33 m	45,27 m	0,0 cm	0,0 cm	0,0 cm					
			Sistema: Manual										
Perfuração: CA-Circulação de Água CL-Circulação de Lama TC-Trado Concha													
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Compacidade / Consistência	Cota (m)	Resistência à Penetração × Profundidade					Prof. (m)	Classificação do Material	
		1ª + 2ª	2ª + 3ª			1ª + 2ª		2ª + 3ª					
						0	10	20	30	40			50
CL		9	11	3	19								Areia fina e média siltosa, cinza clara, medianamente compacta.
		9	9	3	20,00								Argila siltosa, azulada, média.
		4	4	2	21								Argila orgânica com conchas, cinza escura, de mole a média.
		5	5	2	22								
		6	7	3	23								
		7	8	3	24								
		5	7	3	25,00								
		3	5	2	26								Argila orgânica, cinza escura, mole.
		6	7	3	27								Argila silto-orgânica com veios de areia, cinza escura, mole.
		8	11	4	28								Argila orgânica siltosa com conchas, cinza parda, de média a rija.
		9	10	3	29								
		10	13	4	30								
		9	11	4	31								
		12	10	3	32								
		13	11	4	33								Argila orgânica com lentes de turfa, cinza parda.
		9	9	3	34								
		8	12	4	35								
		9	11	4	36								
	9	13	4	37									
					38								
Compacidade/Consistência					1	2	3	4	5	6			
Areias ou siltes arenosos					Fofa(o)	Pouco compacta(o)	Medianamente compacta(o)	Compacta(o)	Muito compacta(o)	—			
Argilas ou siltes argilosos					Muito mole	Mole	Média(o)	Rija(o)	Muito rija(o)	Dura(o)			

SP006- PARTE 03

Ø Amostrador		Externo: 2"	Altura de queda: 75 cm	Cota da boca do furo: 0,62 m	Ensaio de Avanço por Circulação de Água									
		Interno: 2½"	Peso: 65 kgf	Revestimento: 1,50 m	Início	10 min	20 min	30 min						
Ø Revestimento: 2½"		Sistema: Manual	Escala vertical: 1:100	Nível d'água: 1,33 m	45,27 m	0,0 cm	0,0 cm	0,0 cm						
Perfuração: CA-Circulação de Água CB-Circulação de Lama TC-Trado Concha														
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Compacidade / Consistência	Cota (m)	Resistência à Penetração x Profundidade					Prof. (m)	Classificação do Material		
		1ª + 2ª	2ª + 3ª			1ª + 2ª		2ª + 3ª						
		1ª + 2ª	2ª + 3ª			0	10	20	30	40	50			
CL	45,27	9	13	4	38								Argila orgânica com lentes de turfa, cinza parda.	
		9	35	4	39								Silte arenoso, esverdeado, medianamente compacto.	
		27	28	4	40								Areia fina, esverdeada, compacta.	
		27	34	4	41									
		25	32	4	42								Areia fina siltosa, cinza, compacta.	
		19	25	4	43									
		98/15	-	5	44								Pedregulhos com areia grossa, amarelo, muito compacto.	
		80/7	-	5	45								Sondagem paralisada aos 45,27 metros, tendo em vista se tornar impenetrável à percussão e trépano de lavagem.	
		40/0	-	-	46								Impenetrável ao trépano de lavagem.	
					47								LIMITE DE SONDAGEM	
					48									
					49									
					50									
					51									
					52									
					53									
					54									
					55									
					56									
					57									
Compacidade/Consistência					1	2		3			4	5		6
Areias ou siltes arenosos					Fofa(o)	Pouco compacta(o)		Medianamente compacta(o)			Compacta(o)	Muito compacta(o)		—
Argilas ou siltes argilosos					Muito mole	Mole		Média(o)			Rija(o)	Muito rija(o)		Dura(o)