

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO ALMEIDA BRANCO

POSSÍVEL RELAÇÃO ENTRE O ASPECTO DO LEITO ESTRADAL DA PR 412 E O
TIPO DE SOLO PREDOMINANTE

PONTAL DO PARANÁ

2023

MARCELO ALMEIDA BRANCO

POSSÍVEL RELAÇÃO ENTRE O ASPECTO DO LEITO ESTRADAL DA PR 412 E O
TIPO DE SOLO PREDOMINANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil, Campus Pontal do Paraná - Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Elisangela do Prado Oliveira

PONTAL DO PARANÁ

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

Marcelo Almeida Branco

“POSSÍVEL RELAÇÃO ENTRE O ASPECTO DO LEITO ESTRATAL DA PR 412 E O TIPO DE SOLO PREDOMINANTE”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Prof^ª. Dr^ª. Elisangela do Prado Oliveira

Prof^ª. Orientadora - CPP-CEM/UFPR

Prof. Dr. Alexandre Bernardino Lopes

CPP-CEM/UFPR

Prof. Dr. Gustavo Pacheco Tomas

CPP-CEM/UFPR

Pontal do Paraná, 01 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **ELISANGELA DO PRADO OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2023, às 12:15, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE BERNARDINO LOPES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2023, às 12:31, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **GUSTAVO PACHECO TOMAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2023, às 16:24, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **6214559** e o código CRC **CE5AFD0B**.

Referência: Processo nº 23075.074630/2023-47

SEI nº 6214559

Dedicatória – Dedico a conclusão da minha graduação ao meu pai, Carlos Branco, que já não está mais entre nós, sendo impossível comemorar comigo essa enorme conquista. Pai, a saudade é grande!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, seguido da minha família, por todos os esforços que foram prestados ao longo da minha vida, me tornando capaz e possível para esse título, em especial aos meus pais, Carlos e Maridalva, que mexeram todos os pauzinhos e me acompanharam sempre que houve necessidade.

Por segundo, gostaria de agradecer aos amigos que fiz dentro da Universidade, que com certeza, serão levados para vida toda. Em especial, ao meu principal grupo para os trabalhos acadêmicos, sendo: Igor, João, Sandro e Vinicius. Valeu piada, sem vocês isso também não seria possível.

Por último, gostaria de agradecer a todos os professores e técnicos da UFPR, bem como aos serviços disponibilizados e por todo o suporte que me foi ofertado. Em especial: a Prof.^a Juliana, que me orientou em minha IC e tornou mais fácil o desenvolvimento do presente trabalho; a Prof.^a Elisângela, minha orientadora do presente trabalho e dona de cadeiras do curso em que mais me interessei, a parte dos solos; o Prof.^o Rossigali, com certeza o “boss” do curso, mas sem a aprovação em suas disciplinas, sentiria que não estaria apto a ser um engenheiro; Por fim e não menos importante, ao técnico Jonas por todo o auxílio prestado na parte prática deste estudo.

Quando o objetivo parecer difícil para você, não mude seu objetivo, procure uma
nova maneira de alcançar.
(Confúcio)

RESUMO

Um dos materiais fundamentais e insubstituíveis em uma obra é o solo. O princípio fundamental nos projetos de engenharia é que os esforços provenientes dos elementos estruturais são descarregados por último no solo. Portanto, é de suma importância compreender, de maneira preliminar, as propriedades físicas do solo, a fim de antecipar seu comportamento em situações específicas. O comportamento dos solos moles, objeto de análise neste estudo, é considerado desafiador no campo da geotecnia devido à sua alta compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento. Esses solos podem resultar em recalques significativos ao suportar cargas consideráveis ao longo do tempo. A área de interesse, a rodovia PR 412, que conecta praticamente todo o litoral do estado do Paraná, apresenta predominantemente solos moles em sua extensão. Um ponto crucial para a análise refere-se ao estado da rodovia, evidenciando ondulações perceptíveis em alguns de seus trechos. O autor busca justificar esse aspecto por meio de amostras coletadas em campo e ensaios de caracterização e adensamento, destacando o tipo de solo predominante na região. Em última análise, enfatiza-se a importância de empregar técnicas de aterro diferente das convencionais quando os estudos geotécnicos indicam a predominância de solos moles na região de interesse.

Palavras-chave: Solos moles; Recalque; Adensamento; Compressibilidade; PR 412.

ABSTRACT

One of the fundamental and irreplaceable materials in construction is soil. The fundamental principle in engineering projects is that the loads originating from structural elements are ultimately transferred to the soil. Therefore, it is of utmost importance to preliminarily understand the physical properties of the soil in order to anticipate its behavior in specific situations. The behavior of soft soils, the subject of analysis in this study, is considered challenging in the field of geotechnics due to their high compressibility and low shear strength. These soils can result in significant settlements when subjected to considerable loads over time. The area of interest, the PR 412 highway, which connects virtually the entire coastline of the state of Paraná, predominantly features soft soils throughout its extension. A crucial point for analysis pertains to the state of the highway, highlighting noticeable undulations in some of its sections. The author seeks to justify this aspect through field-collected samples and characterization and consolidation tests, emphasizing the prevalent soil type in the region. Ultimately, the importance of employing unconventional fill techniques is underscored when geotechnical studies indicate the predominance of soft soils in the area of interest.

Keywords: Soft soils; Settlements; Consolidation; Compressibility; PR 412.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização PR 412	18
Figura 2 - Constituição do solo	19
Figura 3 - Prédio inclinado na orla de Santos	21
Figura 4 - Analogia mecânica de Terzaghi	23
Figura 5 - Principais métodos de melhoria e estabilização utilizados em solos moles	24
Figura 6 – Soluções para aterros sobre solos moles	25
Figura 7 – Aterro estruturado com reforço geossintético	27
Figura 8 – Pontos de coleta.....	28
Figura 9 – Características do amostrador	30
Figura 10 – Amostrador montado em campo	30
Figura 11 - Escavação ao redor do amostrador	31
Figura 12 - Amostras para determinação da umidade do solo	32
Figuras 13 – Medição das dimensões do anel de adensamento.....	34
Figura 14 - Amostras imersas na água destilada	34
Figura 15 - Retirando o ar do solo com uma bomba de vácuo	35
Figura 16 - Picnômetro em banho maria	36
Figura 17 - Conjunto para a granulometria fina	38
Figura 18 - Graduação dos grãos do solo	40
Figura 19 - Prensa de adensamento	41
Figura 20 - Amostra de solo contida no anel de adensamento	42
Figura 21 - Montagem da célula de adensamento	42
Figura 22 - Conjunto preparado para o ensaio.....	43
Figura 23 - Aparência das amostras	46
Figura 24 – Precipitação acumulada em 5 dias antes da coleta	56
Figura 25 – Modelo de solo esperado com o ensaio de adensamento	58
Figura 26 - Curva de compressão edométrica	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de Granulometria de solo da amostra N1	50
Gráfico 2 - Curva de Granulometria de solo da amostra N2	50
Gráfico 3 - Curva de Granulometria de solo da amostra N3	51
Gráfico 4 - Curva de Granulometria de solo da amostra N4	51
Gráfico 5 – Curva de adensamento da amostra N1 – 500 kPa	53
Gráfico 6 - Curva de adensamento da amostra N2 – 500 kPa	53
Gráfico 7 - Curva de adensamento da amostra N3 – 500 kPa	54
Gráfico 8 - Curva de adensamento da amostra N4 – 500 kPa	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos de coleta.....	29
Tabela 2 - Porção de amostra utilizada em função da dimensão dos grãos maiores.....	32
Tabela 3 – Teor de umidade – Amostra N1	47
Tabela 4 – Teor de umidade – Amostra N2	47
Tabela 5 – Teor de umidade – Amostra N3	47
Tabela 6 – Teor de umidade – Amostra N4	48
Tabela 7 – Massa específica e peso específico das amostras	48
Tabela 8 – Massa específica dos grãos para cada amostra	49
Tabela 9 – Dados resultantes do ensaio de granulometria	49
Tabela 10 – Índice de vazios e altura dos sólidos das amostras.....	52
Tabela 11 – Pressões e deformações para cada incremento de carga	52
Tabela 12 - Valores de referência para índice de vazios, teor de umidade saturado e peso específico de diferentes solos	55

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

SiBCS	- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
CPP-CEM	- Campus Pontal do Paraná - Centro de Estudos do Mar
DER	- Departamento de Estradas de Rodagem
NBR	- Norma Brasileira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 RODOVIA PR-412.....	17
2.2 SOLOS	19
2.3 SOLOS MOLES	19
2.3.1 Compressibilidade	21
2.3.2 Recalque	22
2.3.3 Teoria de adensamento de Terzaghi.....	23
2.4 MÉTODOS DE MELHORIA DE SOLO E ESTABILIZAÇÃO DE ATERROS	24
2.4.1 Substituição de solo	25
2.4.2 Adensamento acelerado.....	26
2.4.3 Aterros estruturados.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 COLETA DE AMOSTRAS	27
3.1.1 Pontos de coleta.....	28
3.1.2 Dispositivo de coleta.....	29
3.1.3 Coleta das amostras indeformadas	30
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	31
3.2.1 Determinação do teor de umidade	32
3.2.2 Massa específica natural.....	33
3.2.3 Massa específica dos grãos	34
3.2.4 Granulometria.....	37
3.3 ENSAIO DE ADENSAMENTO	40
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	45
4.1 CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS	46
4.2 UMIDADE DAS AMOSTRAS	46
4.3 MASSA ESPECÍFICA NATURAL E SECA DAS AMOSTRAS	48
4.4 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	48
4.5 GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO	49

4.6 ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL	51
5 DISCUSSÃO	54
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
7 REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A primeira etapa de uma construção consiste em um projeto preliminar onde devem constar os estudos de viabilidade da obra, que incluem avaliações de impacto ambiental, análise de risco e demais estudos que venham a ser necessários, incluindo o estudo e a análise do solo da região de interesse por meio de sondagens e de ensaios de amostra *in situ* e/ou *in loco* (Moraes, 2019).

Os solos tem um papel insubstituível para as obras de Engenharia Civil. Desse modo, conhecer suas características/comportamentos em diversas situações é indispensável. Como são materiais naturais, originados de ações do intemperismo e degradação das rochas, apresentam grande heterogeneidades em relação à estrutura, textura, tamanho, forma e constituição mineralógica (Zorzan et al., 2019).

Em projetos de grande porte, como a construção de rodovias, são realizados diversos ensaios em toda sua extensão para a caracterização dos solos em questão, a fim de avaliar seu comportamento e prever sua reação submetido a eventuais carregamentos. Essa etapa é essencial para evitar imprevistos durante a obra e durante a vida útil do pavimento (JUNIOR et al, 2021).

Baseado no mapa de solos do estado do Paraná, disponibilizado pela Embrapa Solos, sabe-se que a rodovia de estudo PR 412, que faz a ligação entre praticamente todo o litoral do estado do Paraná, tem em sua extensão solos moles como predominantes. Segundo Han (2002), este tipo de solo é considerado desafiador pelos engenheiros geotécnicos pois sofrem deformações consideráveis quando submetido a eventuais carregamentos, como no tráfego de veículos. Além disso, são propensos a instabilidades, sejam locais, manifestando-se através de deslizamentos e rupturas em áreas específicas, bem como globais, com afundamentos graduais em toda a área construída devido ao adensamento do solo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Justificar o aspecto ondulado do leito estradal da PR-412 – no trecho entre o balneário Vila Nova e o balneário Pontal do Sul, em Pontal do Paraná – através do estudo do solo predominante na região.

1.1.2 Objetivos específicos

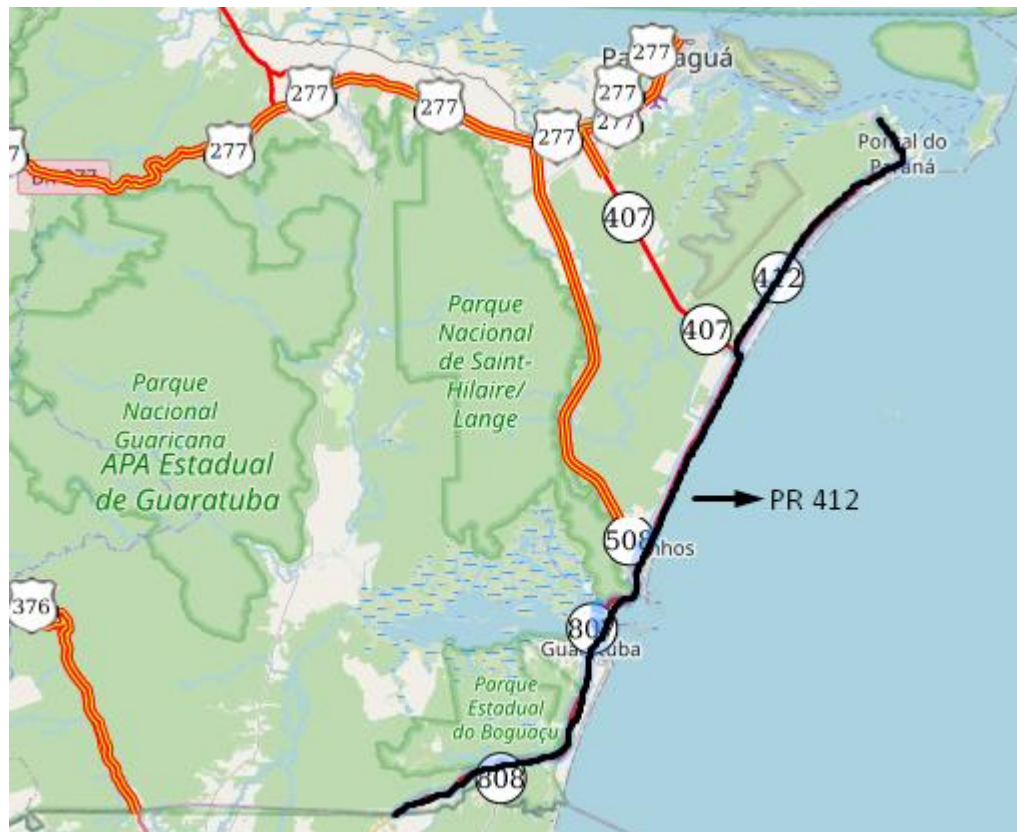
- Caracterizar o solo da PR 412 no trecho de análise;
- Desenhar a curva de adensamento através do ensaio de adensamento unidimensional;
- Interligar os resultados obtidos com o aspecto da rodovia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RODOVIA PR-412

A rodovia PR-412 é uma estrada estadual, do governo do Paraná, com extensão de 67,4 km. Tem seu início na divisa com Santa Catarina, em Garuva e cruza praticamente todo o litoral paranaense, terminando na Ponta do Poço, em Pontal do Paraná (DER, 2022). O trecho de análise compreende o trecho entre os balneários Pontal do Sul e Vila Nova, com extensão de aproximadamente 1 km. A extensão da rodovia é apresentada na figura abaixo.

Figura 1 - Localização PR 412



Fonte: DER (2020)

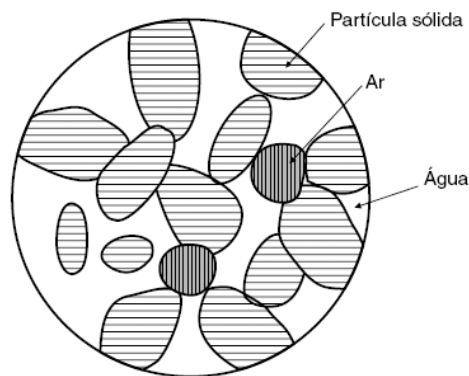
De acordo com Galvão (2002), que analisou dois pontos próximos a rodovia, um sendo próximo ao trecho de análise (no balneário Atami) e após a caracterização do solo concluiu que se trata de um Organossolo Háplico Fíbrico típico distrófico, com profundidade menor que 1 metro, apresentando um substrato arenoso eutrófico, com um ambiente de restinga.

Segundo Ebeling (2013), esse tipo de solo possui uma grande quantidade de matéria orgânica em sua composição devido a condições de excesso de água ou de drenagem livre. É caracterizado como um solo que fornece um ótimo suporte para a área agrícola, mas que deve ser tratado com atenção quando o assunto é geotecnia devido sua baixa capacidade de suporte, com uma permeabilidade baixa e uma alta compressibilidade.

2.2 SOLOS

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos SiBCS, criado pela Embrapa (2018), o solo é uma junção de corpos naturais que apresenta parte sólida (estrutura), parte líquida (água) e parte gasosa (vazio ou ar), conforme mostrado na figura abaixo.

Figura 2 - Constituição do solo



Fonte: Caputo (2022).

Já do ponto de vista geotécnico, Pelaquim (2021) descreve o solo como um material estruturado, que apresenta características relacionadas ao local onde está inserido, com função de suporte, através de escavação, para obras civis.

Ao examinar um solo, a primeira observação diz respeito ao tamanho de cada partícula que o compõe. Devido à sua formação, originada da decomposição das rochas devido processos químicos, físicos e ações do intemperismo, o solo apresenta uma composição bastante diversificada e heterogênea. Além disso, a gama de dimensões das partículas são vastas, podendo incluir grãos de areia, variando de $1mm$ a $2mm$, juntamente com partículas de argila, que apresentam uma espessura bem menor, na casa dos $10^{-6}mm$ (Pinto, 2006).

2.3 SOLOS MOLES

Segundo Motta et al. (2022), com o passar do tempo e a ocupação de terras se torna cada vez mais difícil encontrar um solo adequado para uma construção. Com

isso, é necessário enfrentar o desafio de executar obras onde a predominância do solo não é de “boa qualidade”, isto é, solos com pouca capacidade de suporte.

Motta et al. (2022) define os solos moles como:

Esses, geralmente com uma composição heterogênea, com vasta variação de parâmetros, presença de matéria orgânica expressiva e muito molhados, em função da baixa permeabilidade, não oferecem características favoráveis, apresentando baixa resistência ao cisalhamento, alta compressibilidade, percebida em recalques elevados, que demoram longo período para terminar, Tratando-se, portanto, de material que exige grandes esforços de engenharia para possibilitar o suporte adequado de cargas provenientes da superestrutura.

Para os solos ditos moles, Marangon (2009) afirma que são solos com alta predominância de argila e que apresentam baixa resistência ou então, no pior dos casos, resistência nula, sendo praticamente impossível executar uma obra utilizando este tipo de solo como suporte sem um tratamento adequado.

Já para Massad (2010), entende que solos moles são solos sedimentares com baixa resistência à penetração e geralmente, são compostos de areias argilosas fofas ou de argilas moles, com deposição recente.

Esses depósitos de solos moles estão bastante presentes no litoral brasileiro, acredita-se que sua deposição ocorreu quando o nível do mar foi bastante elevado, fazendo com que esses sedimentos fossem depositados em ambientes próximos a costa. Do ponto de vista geológico, os solos moles são ainda muito recentes, com uma granulometria fina e sua origem se deu há aproximadamente 120 mil anos atrás (MOTTA et al., 2022).

Exemplos de obras sobre solos moles são muito encontrados no litoral brasileiro, em que em sua maioria não receberam o devido tratamento na fase de aterro e sofrem atualmente com recalques excessivos, como os prédios situados na orla de Santos, em São Paulo, como mostrado na figura a seguir.

Figura 3 - Prédio inclinado na orla de Santos



Fonte: Vampeta (2021).

2.3.1 Compressibilidade

Independente da obra, se faz necessário o uso de procedimentos de sondagem no solo, para conhecer suas propriedades e então realizar a técnica adequada para garantir a segurança da fundação. Sabendo que para cada construção, é prevista uma carga a qual o terreno necessita suportar, a técnica adequada deve ser aplicada para minimizar ao máximo as deformações do solo, que são causadas por cargas variáveis. A combinação dessas cargas, também chamadas de tensões, com as respectivas deformações, definem a compressibilidade: uma característica do solo que define o quanto este é suscetível a compressão (Rocha, 2018).

Já para Caputo (2022), a compressibilidade é entendida como a diminuição de um volume de solo a partir da aplicação de uma carga. A publicação ainda se refere a uma situação de grande importância prática, a compressibilidade de um solo que se encontra saturado e confinado lateralmente. Este caso resulta no chamado recalque por adensamento, explanado posteriormente.

De acordo com Rocha (2018), existem diversos fatores que afetam a compressibilidade dos solos, como: tipo de solo, grau de saturação e estrutura. O tipo de solo está ligado à compressibilidade devido a facilidade com que suas partículas se deslocam entre si, já o grau de saturação está ligado com a quantidade de água presente nos solos, por último, a sua estrutura está relacionada com o índice de vazios do solo em questão.

2.3.2 Recalque

O recalque é a própria deformação do solo quando submetido a uma carga, provocando uma movimentação que conseqüentemente pode gerar grandes danos na estrutura, dependendo da magnitude do recalque (Rebello, apud ROCHA, 2018).

De acordo com Floriano (2016), o ato de estimar recalques é uma prática que acontece frequentemente na engenharia geotécnica. Em determinadas obras, apenas a estimativa não é suficiente e as investigações devem ser feitas mais a fundo, necessitando até mesmo de experimentos em campo para prever o comportamento do solo quando submetido a grandes tensões. Quando se trata de fundações, a possibilidade de deformações excessivas deve ser nula.

Conforme apresentado por Rocha (2018), o recalque pode ser classificado em três tipos, sendo recalques por: deformação elástica, escoamento lateral e adensamento.

No recalque por deformação elástica, este acontece logo após a aplicação de uma determinada carga, sendo de maior magnitude em solos coesivos não argilosos, estes são solos com características semelhantes à da argila, que retêm água e apresentam boa coesão, mas na sua composição não apresentam uma quantidade significativa de argila. Na grande maioria das vezes esses tipos de solos são compostos por areia fina ou silte, ou ainda, a junção de ambos (Rebello, apud Rocha, 2018).

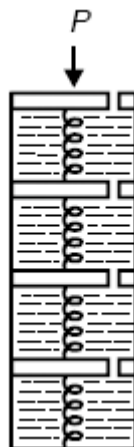
O recalque por escoamento lateral é resultado da migração de solo quando submetido a um carregamento para regiões menos solicitadas, acontecendo a migração do centro para as laterais. Acontece, geralmente, em solos não coesivos, de forma ainda mais acentuada, quando se tratam de fundações superficiais (Santos, 2014).

O recalque por adensamento, é explicado por Caputo (2022) como a diminuição do volume de vazios de um solo confinado lateralmente, quando submetido a esforços por determinado tempo, conseqüentemente, diminuindo a altura do volume de solo, sendo que essa altura que foi diminuída, do próprio recalque. Das (2016) entende que quando a tensão em cima de uma camada de solo argiloso saturado aumenta, a poropressão também aumenta. Devido a condutividade hidráulica desse solo ser pequena, a poropressão em excesso leva um instante de tempo para ser dissipada e conseqüentemente, a tensão aplicada leva um determinado tempo pra ser transferida pro conjunto todo de solo. Esse aumento gradual que ocorre na tensão efetiva do solo pode proporcionar um recalque ao longo do tempo sendo denominado adensamento.

2.3.3 Teoria de adensamento de Terzaghi

A teoria do adensamento unidimensional proposta por Terzaghi (1925) e Frolich (1936), descreve a consequência de um processo de drenagem de água que percola através dos vazios do solo, resultando em um aumento gradativo da tensão efetiva no esqueleto sólido do solo, de forma que o solo vá se comprimindo gradualmente com o passar do tempo e com a expulsão da água, comportamento muito comum em solos argilosos. Para entender melhor este processo, Terzaghi utilizou a analogia mecânica, em que as molas representam a parte sólida do solo, e os furos nos êmbolos, os seus respectivos vazios, como mostrado na figura 4.

Figura 4 - Analogia mecânica de Terzaghi



Fonte: Caputo (2022).

Conforme a pressão P aumenta, a água é drenada, os vazios diminuem e consequentemente, a mola é comprimida. Da mesma forma acontece o adensamento do solo onde a altura que a mola comprime, representando o recalque por adensamento.

2.4 MÉTODOS DE MELHORIA DE SOLO E ESTABILIZAÇÃO DE ATERROS

Segundo Oliveira (2021) os maiores problemas que surgem na execução de aterros sobre solos moles são a estabilidade pós-construção e os recalques ao passar do tempo. Já sob o olhar construtivo os problemas são provenientes do tráfego dos equipamentos necessários, rebaixamento do terreno e risco de ruptura durante a fase de execução. Dependendo do tipo de obra, os recalques podem ser admitidos ou não (Massad, 2010). A fim de solucionar ou reduzir ao mínimo os problemas de estabilidade e de recalque, há diversas técnicas construtivas utilizadas na construção de obras sobre solos moles, ilustradas na Figura 5.

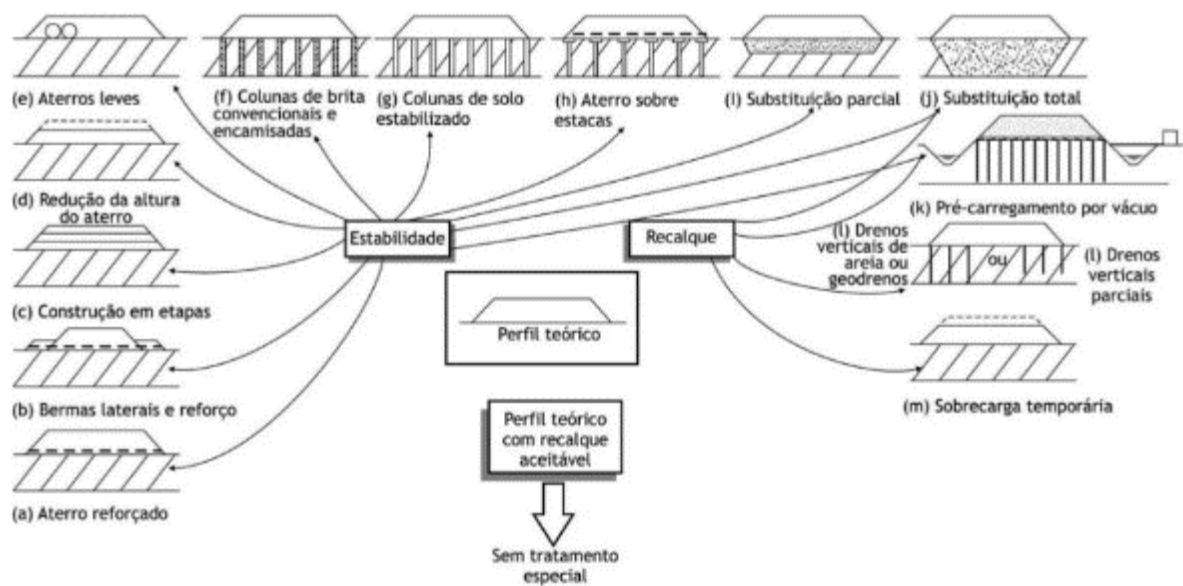
Figura 5 - Principais métodos de melhoria e estabilização utilizados em solos moles



Fonte: adaptado de Oliveira (2021).

Segundo Almeida e Marques (2014) há dois tipos de perfis de construção para solos moles, aqueles em que é permitido um pequeno recalque sem que comprometa o uso, sendo um perfil teórico com recalque aceitável e um perfil teórico sem tolerância para recalque, em que são necessárias tomar as devidas providências relacionadas: à estabilidade ou à um recalque induzido. Os tratamentos são mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Soluções para aterros sobre solos moles



Fonte: Adaptado de LEUROUIEL (1997 apud FUTAI, 2010).

Na seção abaixo, explica sucintamente um dos métodos de melhoria mais comum a serem utilizados em aterros para cada classificação que foi mostrada na Figura 5.

2.4.1 Substituição de solo

A substituição de solo consiste em retirar parcialmente ou totalmente o solo mole, através de escaveiras e/ou dragas, e então aterrar imediatamente o terreno com um solo que apresente propriedades requeridas pela obra. Essa técnica é utilizada quando os depósitos de solos moles apresentam até no máximo 4 m de altura. A substituição visa a diminuição ou até mesmo eliminar os recalques, como também aumentar o fator de segurança relacionado à ruptura (Almeida & Marques, 2014).

2.4.2 Adensamento acelerado

Uma das técnicas de adensamento acelerado que podem ser utilizadas é a de sobrecarga temporária, buscando-se aumentar a velocidade do recalque primário e consequentemente, compensar os impactos de recalques secundários. Para isso, é utilizado um empréstimo de solo de outra área para realizar a sobrecarga, com o intuito de comprimir o solo mole. O problema principal do emprego deste método é o tempo, pois se tratando de solos com baixa permeabilidade, onde a estabilização dos recalques acontece lentamente. Deste modo, o terreno deve ser supervisionado em relação a futuros recalques, para que sejam realizadas manutenções no aterro (Almeida e Marques, 2014).

2.4.3 Aterros estruturados

De acordo com Almeida e Marques (2014) estes tipos de aterros são suportados por estacas, ou seja, os esforços do aterro são transmitidos em grande parte ou na totalidade, para um solo de fundação mais profundo onde apresente um suporte mais adequado que o situado na superfície. Um dos exemplos desse tipo de aterro são os aterros estaqueados reforçados com tecidos geossintéticos, Simões e Correia (2018) declaram que a estrutura destes aterros é formada por estacas e capitéis e o vão entre cada um dos capitéis é preenchido com um reforço geossintético, auxiliando na distribuição das cargas para as estacas. Na Figura 7 é mostrado um aterro estruturado com cerca de 1900 estacas, na sua fase de construção.

Figura 7 – Aterro estruturado com reforço geossintético



Fonte: Simões e Correia (2018).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia foi dividida da seguinte forma:

- Definição dos pontos de coleta e respectivas localizações;
- Montagem do amostrador;
- Coleta das amostras indeformadas em campo;
- Ensaio de caracterização do solo;
- Ensaio de adensamento unidimensional.

3.1 COLETA DE AMOSTRAS

Antes da coleta das amostras em si, foi necessário definir a quantidade de pontos distintos, bem como suas respectivas localizações.

3.1.1 Pontos de coleta

Para o estudo em questão, foram coletadas amostras de 4 pontos distintos. A sua posição foi definida baseado pelo mapa de solos do estado do Paraná (Embrapa solos, 2020); pela acessibilidade para a coleta e por uma distribuição que abrangesse todo o trecho de análise. Os pontos são mostrados na figura abaixo.

Figura 8 – Pontos de coleta



Fonte: Adaptado de Google Maps.

O trecho de análise é de aproximadamente 1 km, sendo o trecho que interliga os dois últimos balneários de Pontal do Paraná. Segundo o mapa da Embrapa o solo predominante é o Espodossolo Humiluvico Hidromórfico.

Para referenciar os pontos foi utilizado o GPS Garmin, utilizando o Datum SIRGAS2000, o qual forneceu as seguintes coordenadas:

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos de coleta

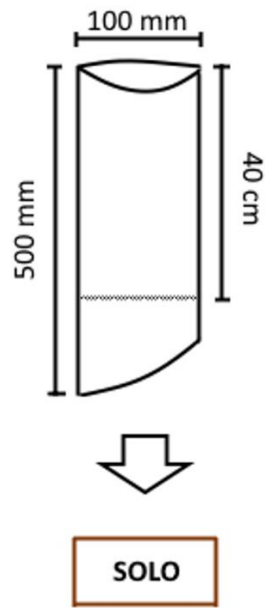
ID	Longitude		Latitude	
	GMS	GD	GMS	GD
N1	O 48 22 06.2	-48,368389	S 25 35 03.8	-25,584389
N2	O 48 22 18.6	-48,371833	S 25 35 05.1	-25,58475
N3	O 48 22 28.1	-48,374472	S 25 35 09.5	-25,585972
N4	O 48 22 35.3	-48,376472	S 25 35 12	-25,586667

Fonte: o autor (2023).

3.1.2 Dispositivo de coleta

Para coletar as amostras indeformadas foi criado um dispositivo de coleta pelo autor, seguindo os devidos cuidados recomendados pela NBR 9820 para que sua estrutura fosse mantida indeformada. O amostrador foi composto por um tubo de PVC, dois tampões, estrutura de apoio de concreto e uma chapa de madeira. Seguindo o diâmetro mínimo imposto na NBR 9820, foi utilizado o diâmetro nominal de 100mm. O comprimento do tubo foi de 5 vezes o diâmetro, respeitando o valor mínimo citado na norma. A extremidade do tubo que foi cravada no solo teve um ângulo de aproximadamente 30° e suas paredes lixadas, de forma que facilitasse a cravação. Por último, foi feita uma marcação na altura de 40 cm do amostrador, para que fosse essa a profundidade de solo utilizada nos posteriores ensaios. Para coletar a amostra referente a 40 cm de profundidade, foi serrado o tubo de PVC na marcação de 40 cm. O projeto do amostrador é mostrado na figura abaixo. Os tampões são utilizados após a coleta da amostra, para garantir que a amostra mantenha sua umidade.

Figura 9 – Características do amostrador



Fonte: o autor (2023).

3.1.3 Coleta das amostras indeformadas

Utilizando a estrutura de apoio para estabilizar o tubo, a chapa de madeira foi posicionada em cima do PVC, conforme Figura 10:

Figura 10 – Amostrador montado em campo



Fonte: o autor (2023).

O operador então aplicou diversos golpes com uma marreta no centro da chapa de madeira para que o amostrador penetrasse no solo. Após a cravação completa, o volume de solo ao redor do tubo foi escavado, de forma que o tubo pudesse ser retirado com facilidade, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Escavação ao redor do amostrador



Fonte: o autor (2023).

Após a retirada do amostrador e arrasamento das pontas de ambas as extremidades, o mesmo foi fechado com os tampões, para que o solo mantivesse suas características *in situ*.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Em um estudo de caso de solos, é necessário o emprego de ensaios para sua caracterização, com intuito de obter maiores informações sobre suas propriedades e prever seu comportamento. No presente trabalho, foram feitos ensaios nas amostras para determinação do teor de umidade, peso específico natural do solo, peso específico dos grãos e granulometria, para a caracterização do solo de estudo. Em relação a quantidade de massa que foi tomada para os ensaios a seguir, foi seguido o imposto pela NBR 6457, apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Porção de amostra utilizada em função da dimensão dos grãos maiores

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada visualmente mm	Quantidade de material (em massa seca) a tomar g
< 2	30
2 a 20	30 a 300
20 a 76	300 a 3000

Fonte: adaptado de ABNT NBR 6457:2016.

3.2.1 Determinação do teor de umidade

Foi retirada uma porção da amostra previamente coletada em campo, de acordo com os grãos, conforme a tabela 2 e então, foi destorroada a porção e deixado o solo em seu estado solto, o solo foi então colocado dentro de uma cápsula metálica. Determinou-se a massa do conjunto, denominada M_1 . As porções são mostradas na figura a seguir.

Figura 12 - Amostras para determinação da umidade do solo



Fonte: o autor (2023).

Após determinação da massa do conjunto, a cápsula foi introduzida na estufa, com temperatura de 105°C até que apresentasse constância de massa. Após este intervalo a cápsula foi transferida para o dessecador para atingir a temperatura ambiente e então, determinou-se a massa do conjunto, anotada como M_2 . Foram feitas três determinações do teor de umidade para cada amostra coletada.

Por fim, foi determinada a massa da cápsula vazia M_3 , para determinação do teor de umidade, através da equação a seguir:

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (1)$$

sendo w o teor de umidade, expresso em porcentagem.

Por fim, determinou-se a umidade média através das 3 determinações de teor de umidade distintas.

3.2.2 Massa específica natural

Para determinar a massa específica inicial do solo, foi necessário determinar a massa da amostra com o anel de adensamento, depois, subtraiu-se a massa do anel de adensamento. Sabendo o volume do anel de adensamento, encontrado através das suas respectivas dimensões conforme Figura 13, calculou-se a massa específica natural, conforme a equação a seguir:

$$\rho_n = \frac{M_4 - M_5}{V_a} \quad (2)$$

Sendo:

M_4 – Massa da amostra no anel de adensamento, em g;

M_5 – Massa do anel de adensamento, em g;

V_a – Volume do anel de adensamento, em cm^3 ;

Figuras 13 – Medição das dimensões do anel de adensamento

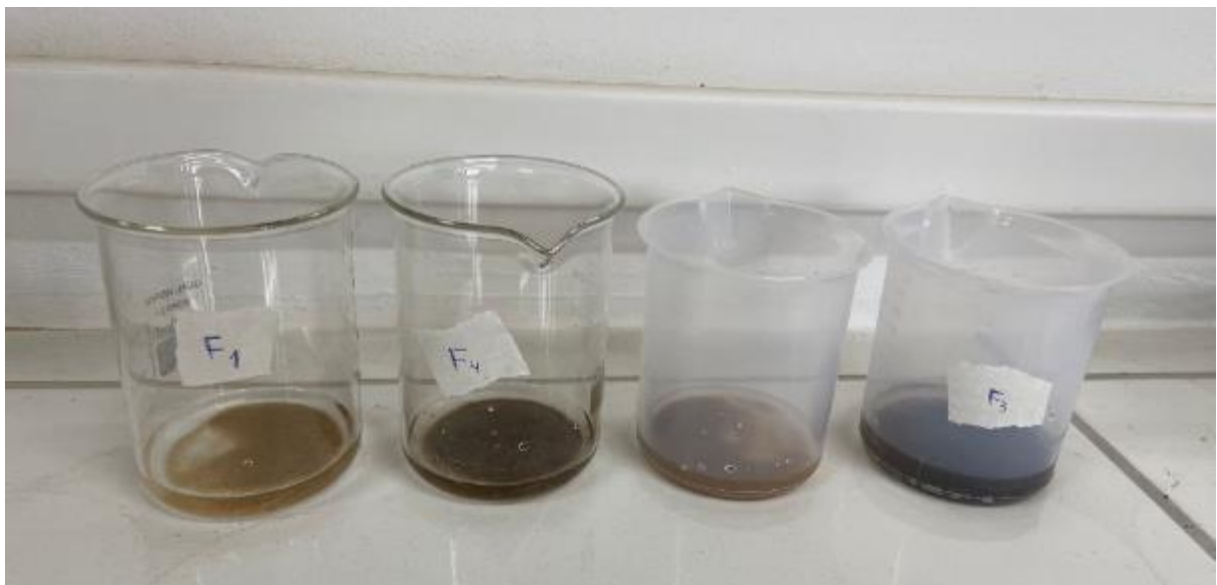


Fonte: o autor (2023).

3.2.3 Massa específica dos grãos

Conforme descrito na NBR 6458:2016, para o picnômetro de 50 ml, separou-se amostras já homogeneizadas em torno de 5g de massa seca, anotada como M_1 . Essa amostra foi deixada em imersão em um béquer de vidro com água destilada por 24 horas, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Amostras imersas na água destilada



Fonte: o autor (2023).

Após as 24 horas, a amostra foi transferida para o picnômetro com o auxílio de um funil de vidro e adicionou-se água destilada até a marca de referência, em seguida foi aplicado um vácuo de aproximadamente 100 kPa por 15 minutos, para que fosse retirado o ar aderente às partículas de solo, conforme mostrado na figura a seguir.

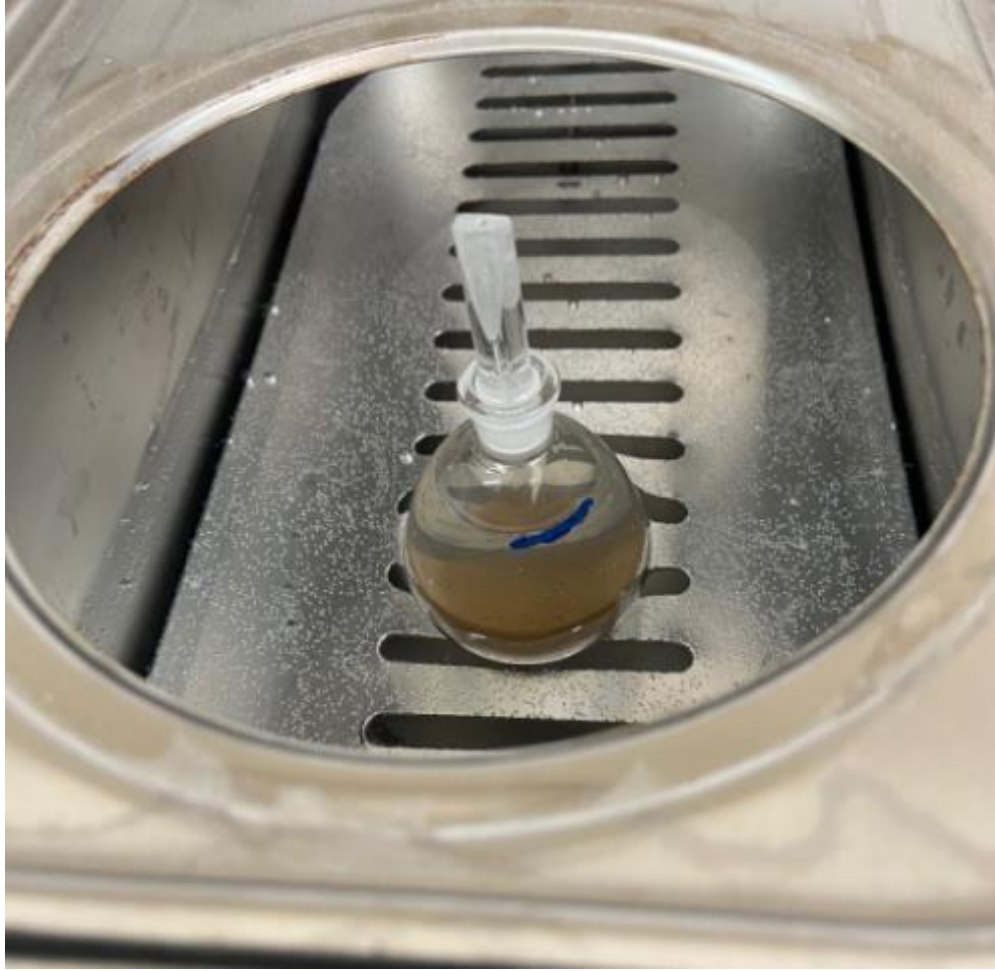
Figura 15 - Retirando o ar do solo com uma bomba de vácuo



Fonte: o autor (2023).

Logo após, utilizou-se a máquina de banho maria para aumentar a temperatura do conjunto de forma que essa temperatura fosse a mesma para as três pesagens. Como a temperatura ambiente estava em torno de 31°C, foi arbitrada uma temperatura para a medição das massas de 39°C. Para atingir o equilíbrio térmico, o picnômetro foi deixado em banho maria por cerca de 8 minutos, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Picnômetro em banho maria



Fonte: o autor (2023).

Aferida a temperatura, enxugou-se a parte externa do picnômetro e logo após pesou o conjunto (picnômetro + solo + água), anotado como M_2 . Pesado o conjunto, a amostra de solo e água foi retirada do picnômetro e adicionada água destilada até a marca de referência, foram feitos os mesmos processos descritos anteriormente para M_2 , garantindo que a temperatura fosse a mesma de antes. Após aferida e confirmada a mesma temperatura da primeira medida, pesou-se o picnômetro cheio de água, denominado M_3 .

Anotada todas as massas, prosseguiu-se para o cálculo da massa específica dos grãos do solo, com a equação abaixo.

$$\rho_s = \frac{M_1}{M_1 + M_3 - M_2} \times \rho_{w(T)} \quad (3)$$

Sendo $\rho_{w(T)}$ a massa específica da água, na temperatura T do ensaio, obtida através da tabela A.1 da NBR 6458:2016.

3.2.4 Granulometria

O ensaio para determinação da curva granulométrica foi baseado na norma NBR 7181:2016. Primeiramente, selecionou-se a porção a ser utilizada no ensaio, cerca de 250g. Pesou-se então a respectiva amostra, anotada como M_T e prosseguiu-se desfazendo os torrões, de modo que assegurasse a retenção apenas dos grãos maiores que o tamanho da malha. Logo após, a amostra foi passada na peneira de 0,075mm, os grãos que ficaram retidos nesta foram lavados com o intuito de remover eventuais materiais finos aderentes, depois, essa porção remanescente foi levada a estufa em 105°C, até que atingisse constância de massa.

Dessa amostra já seca foi tomado aproximadamente 70g. A massa dessa porção foi devidamente anotada como M_S . Com a falta do agitador mecânico, foi agitado as peneiras manualmente por cerca de 3 minutos, passando pelas seguintes peneiras: 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,25mm, 0,15mm e 0,075mm. As respectivas peneiras e o fundo são mostrados na figura abaixo.

Figura 17 - Conjunto para a granulometria fina



Fonte: o autor (2023).

Terminado o ensaio, partiu-se para o cálculo necessário para análise de resultados, sendo a porcentagem de material passado em cada peneira Q_f , retornado através da seguinte equação:

$$Q_f = \frac{(M_s - M_r)}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

Sendo M_r , o material retido acumulado.

O cálculo acima foi feito para cada peneira.

Com a curva granulométrica representada graficamente, foi possível definir o coeficiente de Uniformidade C_u , que fornece um indicativo da uniformidade dos grãos. Segundo Floriano (2016), um coeficiente menor que 5 indica solos uniformes, se for maior que 15 indica solos desuniformes e se o coeficiente retorna um valor equivalente entre 5 e 15, indica um solo medianamente uniforme. O coeficiente é calculado através da equação abaixo.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5)$$

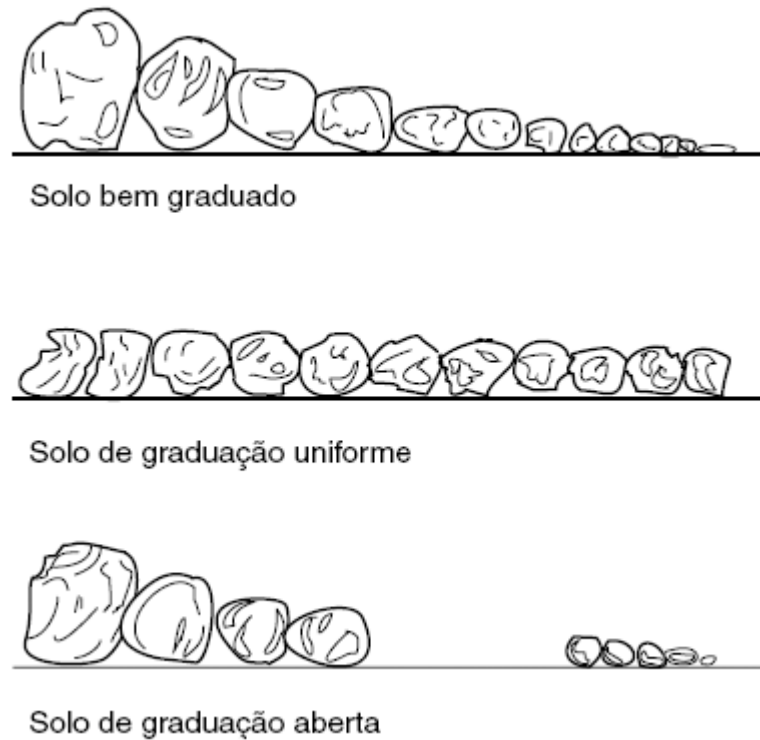
Sendo D_{60} e D_{10} o diâmetro da peneira em que passa 60% dos grãos e 10%, respectivamente.

Outro parâmetro importante para a análise foi o Coeficiente de Curvatura C_c , que indica o formato e a simetria da curva. Se o coeficiente for menor que 1, a curva é dita descontínua, com ausência de certos diâmetros de grãos em sua composição; se o coeficiente é maior que 3, a curva é dita uniforme, com predominância de grãos de tamanhos iguais ou muito parecidos; por fim, se o coeficiente estiver entre os dois valores anteriores, representa um solo bem graduado, com diferentes tamanhos de grãos, de forma que a diferença de grãos preencha eventuais vazios, vide figura 18. O coeficiente foi determinado através da seguinte equação:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}} \quad (6)$$

Sendo D_{30} o diâmetro da peneira em que passa 30% dos grãos.

Figura 18 - Graduação dos grãos do solo



Fonte: Caputo (2022).

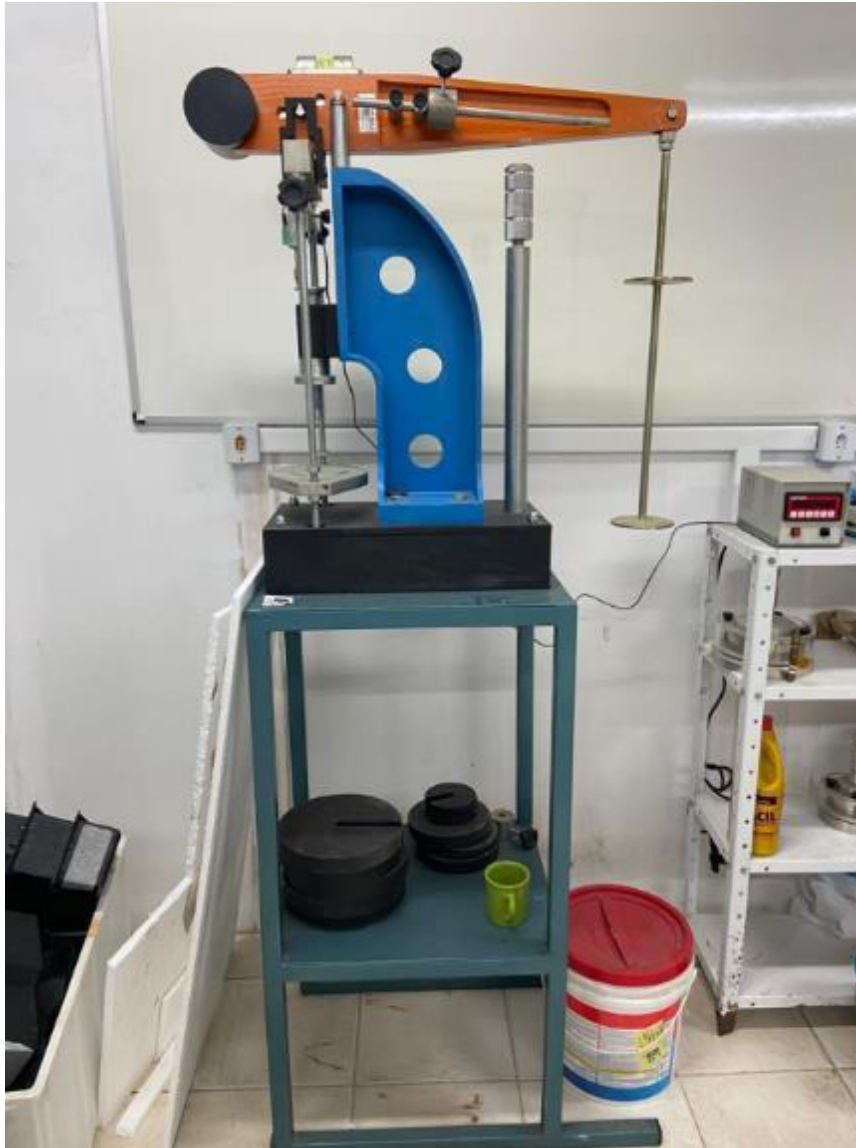
3.3 ENSAIO DE ADENSAMENTO

Para esta etapa, foi utilizada a Prensa de Adensamento da SOLOTEST tipo Bishop disponibilizada pelo laboratório de Mecânica dos Solos e Materiais de Construção do CPP-CEM. O equipamento completo é composto de:

- Mesa;
- Prensa;
- Suporte para pesos;
- Jogo de pesos;
- Relógio comparador;
- Células de adensamento.

O conjunto da Prensa é mostrado na Figura 19:

Figura 19 - Prensa de adensamento



Fonte: o autor (2023).

Os procedimentos do ensaio foram os presentes na norma NBR 16853:2020, sendo eles apresentados a seguir.

Primeiro foi escolhido qual célula de adensamento iria ser utilizada. Como nosso amostrador tem um diâmetro nominal de 100mm, foi utilizada a célula de adensamento de 50mm, para que houvesse folga para talhar o solo.

Definida a célula utilizada, foi retirado o seu respectivo anel de adensamento para introduzi-lo na amostra previamente coletada. A talhagem do solo foi feita de forma que a amostra ficasse confinada lateralmente dentro do anel e foi removido o excesso do topo e da base, conforme a figura abaixo.

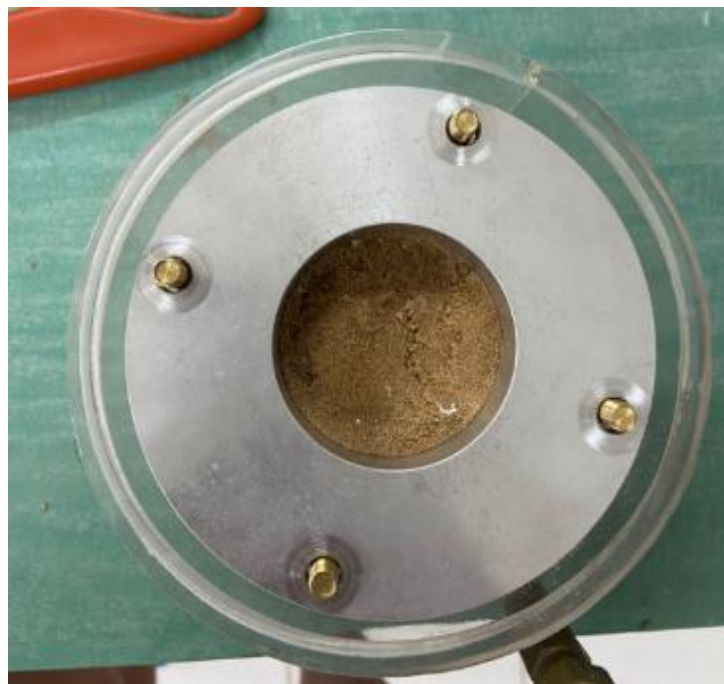
Figura 20 - Amostra de solo contida no anel de adensamento



Fonte: o autor (2023).

Logo após, o anel foi colocado novamente no conjunto célula, que foi retornado à base rígida, depois do disco poroso inferior. Posicionou-se então a base aos pinos roscados como mostra a figura 21 e então foi realizado o aperto das porcas. Após estes passos, verificou-se todas as vedações da célula.

Figura 21 - Montagem da célula de adensamento



Fonte: o autor (2023).

Verificadas as vedações, foi colocado o disco poroso superior seguido do cabeçote de carregamento. Então, foi posicionado o conjunto no suporte da prensa para que recebesse os carregamentos conforme mostrado na figura 22 e em seguida foi realizado os ajustes finos do conjunto para garantir o nível.

Figura 22 - Conjunto preparado para o ensaio



Fonte: o autor (2023).

Procedeu-se então ligando o deflectômetro e aplicando a primeira carga, referente a uma pressão de aproximadamente 12,5 kPa. Eram anotadas as deformações do corpo de prova para cada instante de tempo, sendo 1/8 min, 1/4 min, 1/2 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas, combinando com os horários em que o laboratório ficava aberto. Após as 24 horas, era incrementada uma nova carga e repetido o processo anterior. As pressões empregadas no ensaio foram de 12,5 kPa, 500 kPa e por fim, 1000 kPa.

Após a anotação das leituras referentes ao máximo carregamento empregado, começou o descarregamento do corpo de prova. Retiradas todas as anilhas, o anel de adensamento foi imediatamente retirado da célula e determinado sua massa. Após determinar a massa, foi retirado uma porção do solo ensaiado para determinar o teor de umidade final.

Para os cálculos, foi necessário determinar a massa específica aparente seca inicial ρ_d , dada por:

$$\rho_d = \frac{100 \rho_n}{100 + w} \quad (7)$$

Sendo ρ_n a massa específica aparente úmida inicial e w_i o teor de umidade inicial.

Outro dado necessário, foi o índice de vazios inicial e_i , obtido através da seguinte equação:

$$e_i = \frac{\rho_s}{\rho_n} - 1 \quad (8)$$

Sendo ρ_s a massa específica dos grãos, obtida através do item 3.2.3.

Com o índice de vazios calculado, foi possível encontrar o grau de saturação das amostras, através da seguinte equação:

$$S = \frac{w \rho_s}{e_i \rho_w} \quad (9)$$

Sendo ρ_w a massa específica da água (considerada 1,00 g/cm³)

A altura dos sólidos também foi encontrada relacionando o índice de vazios, através da equação abaixo:

$$H_s = \frac{H_i}{1 + e_i} \quad (10)$$

H_i diz respeito a altura inicial do corpo de prova, sendo a própria altura do anel de adensamento.

A altura do corpo de prova correspondente a 0% do adensamento primário é dada pela equação abaixo:

$$H_0 = H_1 + (H_1 - H_2) \quad (9)$$

H_1 e H_2 são alturas correspondentes aos tempos t_1 e t_2 do ensaio, cuja relação $\frac{t_2}{t_1}$ seja igual a 4.

A altura H_{100} é a própria coordenada do eixo das ordenadas da curva de adensamento referente a interseção das tangentes do ramo de compressão primária (também chamada de compressão virgem) e do ramo de compressão secundária. Esses ramos compreendem a fase de rápida compressão (ramo íngreme) e lenta compressão, respectivamente.

A altura H_{50} foi obtida através da média da altura inicial e final do adensamento primário, expressada a seguir:

$$H_{50} = \frac{H_0 + H_{100}}{2} \quad (10)$$

Com as equações acima, foi possível determinar o coeficiente de adensamento. Dentre os diferentes métodos para se determinar o coeficiente de adensamento, optou-se por utilizar o processo de Casagrande, em que o coeficiente de adensamento foi determinado através da equação a seguir:

$$c_v = \frac{0,197(0,5H_{50})^2}{t_{50}} \quad (11)$$

Sendo t_{50} o respectivo tempo de ocorrência para a altura de 50% do adensamento primário.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os dados resultantes dos ensaios realizados no presente estudo.

4.1 CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS

O primeiro resultado que podemos obter é das características visuais dos solos, que nos fornece informações preliminares sobre o tipo de solo. As amostras estão apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Aparência das amostras



Fonte: o autor (2023).

4.2 UMIDADE DAS AMOSTRAS

Depois de pesadas as amostras já secas, calculou-se através da eq. (1) o teor de umidade de cada amostra, os resultados são apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 3 – Teor de Umidade – Amostra N1

ID	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	w	$\bar{x}$
1	40,39	35,89	7,31	15,74%	14,79%
2	37,89	34,37	7,15	12,93%	
3	38,65	34,40	7,30	15,68%	
Pós ensaio					
4	40,71	37,01	7,24	12,42%	12,56%
5	38,06	34,53	7,25	12,94%	
6	39,51	35,98	7,25	12,32%	

Fonte: o autor (2023).

Tabela 4 – Teor de Umidade – Amostra N2

ID	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	w	$\bar{x}$
1	34,85	34,13	7,58	2,70%	3,46%
2	39,16	38,01	7,68	3,79%	
3	41,96	40,67	7,58	3,88%	
Pós ensaio					
4	39,66	38,86	7,64	2,55%	2,59%
5	37,85	37,12	7,53	2,44%	
6	39,75	38,89	7,66	2,76%	

Fonte: o autor (2023).

Tabela 5 – Teor de Umidade – Amostra N3

ID	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	w	$\bar{x}$
1	38,49	37,08	7,58	4,77%	5,06%
2	39,90	38,33	7,68	5,13%	
3	38,15	36,61	7,58	5,29%	
Pós ensaio					
4	40,05	38,76	7,64	4,15%	4,42%
5	38,93	37,55	7,53	4,58%	
6	35,51	34,31	7,66	4,52%	

Fonte: o autor (2023).

Tabela 6 – Teor de Umidade – Amostra N4

ID	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	w	$\bar{x}$
1	35,94	34,98	7,58	3,52%	3,56%
2	37,02	35,95	7,68	3,80%	
3	37,37	36,40	7,58	3,37%	
Pós ensaio					
4	36,01	35,26	7,64	2,73%	2,88%
5	36,80	35,95	7,53	2,98%	
6	39,52	38,62	7,66	2,92%	

Fonte: o autor (2023).

4.3 MASSA ESPECÍFICA NATURAL E SECA DAS AMOSTRAS

Depois de pesada as amostras já contidas no anel de adensamento, foi calculada a massa específica do solo em seu estado natural, através da eq. (2), já para o cálculo da massa específica seca ρ_d , foi utilizada a eq. (5). Para encontrar o peso específico dessas massas, bastou multiplicar as massas específicas pela aceleração da gravidade. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Massa específica e peso específico das amostras

ID	M4 (g)	ρ_n (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Anel de adensamento		w (%)	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
N1	215,83	1,805	1,573	H (cm)	2,66	14,79%	17,71	15,43
N2	202,15	1,546	1,495	Ø (cm)	5,03	3,46%	15,17	14,66
N3	193,52	1,383	1,317	V (cm ³)	52,86	5,06%	13,57	12,92
N4	201,02	1,525	1,473	M5 (g)	120,41	3,56%	14,96	14,45

Fonte: o autor (2023).

4.4 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

O processamento dos dados deste ensaio foi realizado através da eq. (3), resultando nos valores apresentados na tabela abaixo.

Tabela 8 – Massa específica dos grãos para cada amostra

ID	M1 (g)	M2 (g)	ρ_s (g/cm ³)	Dados constantes	
N1	5,04	73,66	2,25	ρ_w (g/cm ³)	0,9926
N2	5,06	73,61	2,19	M3 (g)	70,84
N3	5,04	73,51	2,11	T (°C)	39
N4	5,2	73,68	2,19	-	-

Fonte: o autor (2023).

4.5 GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO

O ensaio de peneiramento retornou os valores apresentados na tabela 9, mostrada abaixo.

Tabela 9 – Dados resultantes do ensaio de Granulometria

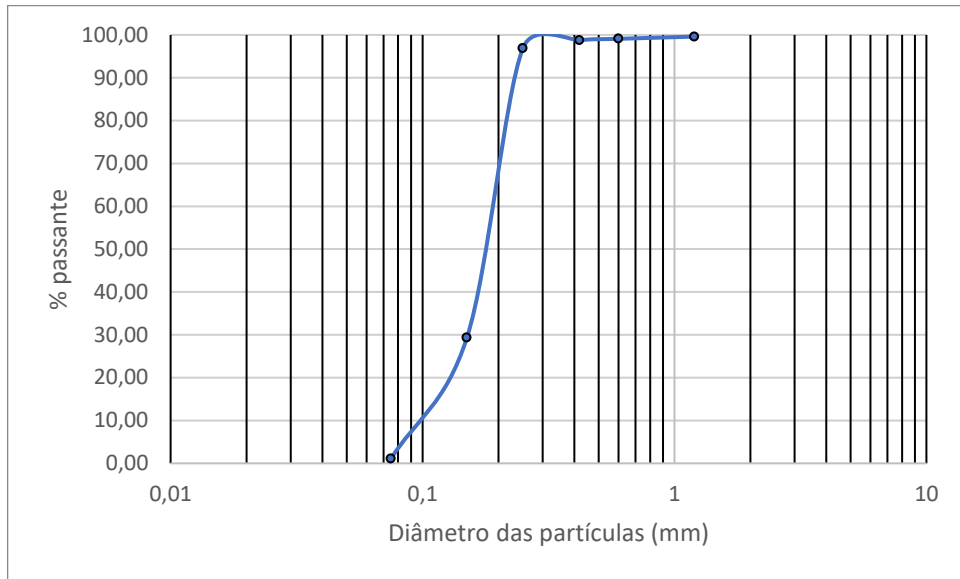
Peneiras (mm)	AMOSTRA N1			AMOSTRA N2			AMOSTRA N3			AMOSTRA N4		
	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
1,2	0,30	0,40	0,40	0,00	0,00	0,00	4,3	6,13	6,13	0,01	0,01	0,01
0,6	0,39	0,51	0,91	0,02	0,03	0,03	2,46	3,50	9,63	0,03	0,04	0,06
0,42	0,25	0,33	1,24	0,01	0,01	0,04	0,9	1,28	10,91	0,07	0,10	0,16
0,25	1,43	1,89	3,13	0,17	0,24	0,29	1,89	2,69	13,60	0,45	0,64	0,80
0,15	51,18	67,55	70,67	20,18	28,91	29,19	19,59	27,91	41,51	24,18	34,58	35,38
0,075	21,38	28,22	98,89	49,15	70,41	99,60	39,54	56,32	97,83	45,12	64,53	99,91
Fundo	0,84	1,11	100,00	0,28	0,40	100,00	1,52	2,17	100,00	0,06	0,09	100,00
DMC	0,25 mm			0,25mm			2,4mm			0,25mm		
MF	1,75			1,29			1,80			1,36		
Cu	1,67			1			1,67			1		
Cc	1,67			1			0,60			1		

Fonte: o autor (2023).

A porcentagem de material perdido nos ensaios foi: 0,2764%; 0,2714%; 0,2841% e 0,2568%, respectivos às amostras N1; N2; N3 e N4, condizente com a tolerância de 0,30% presente em norma.

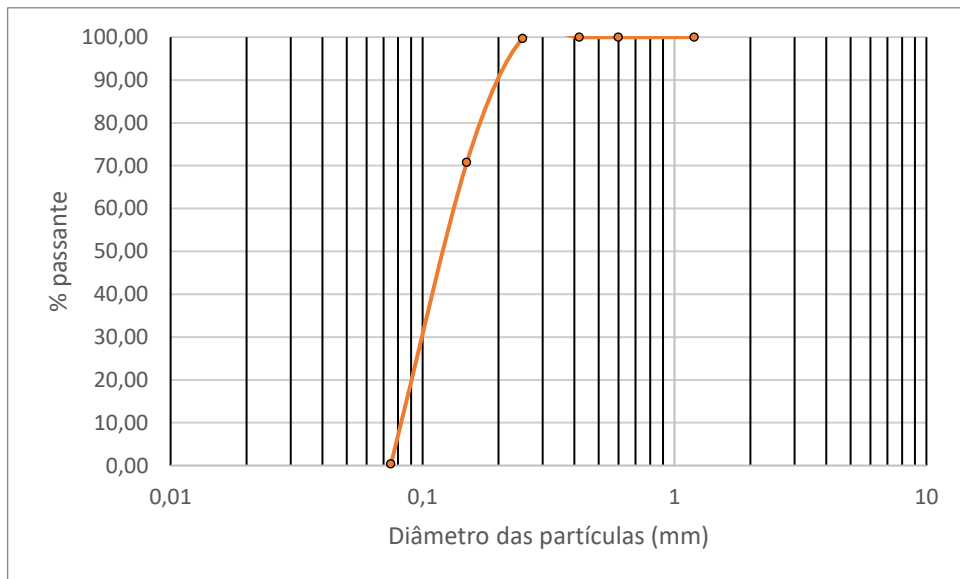
Baseado nos dados extraídos do ensaio foi ilustrada a curva granulométrica de cada amostra, apresentadas a seguir.

Gráfico 1 - Curva de granulometria de solo da amostra N1



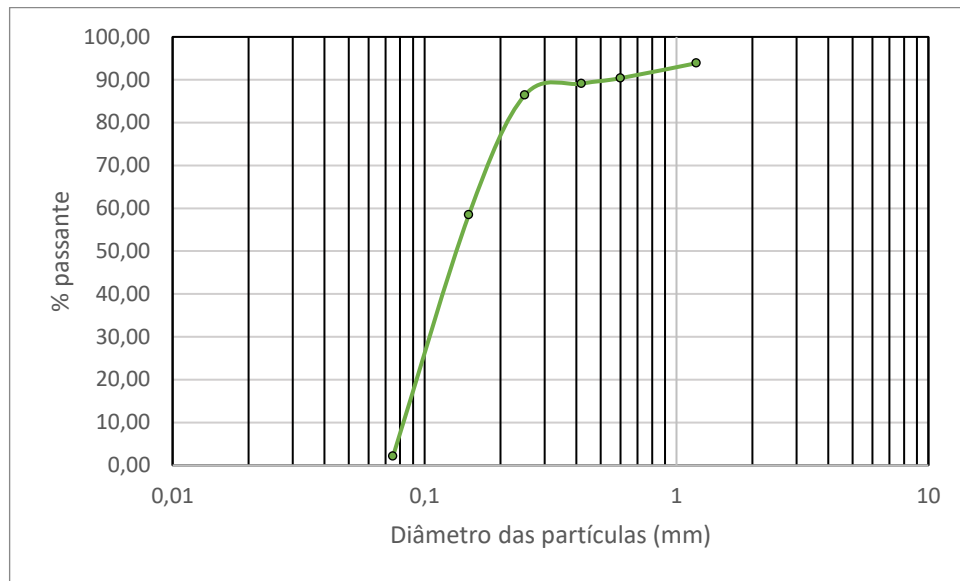
Fonte: o autor (2023).

Gráfico 2 - Curva de granulometria de solo da amostra N2



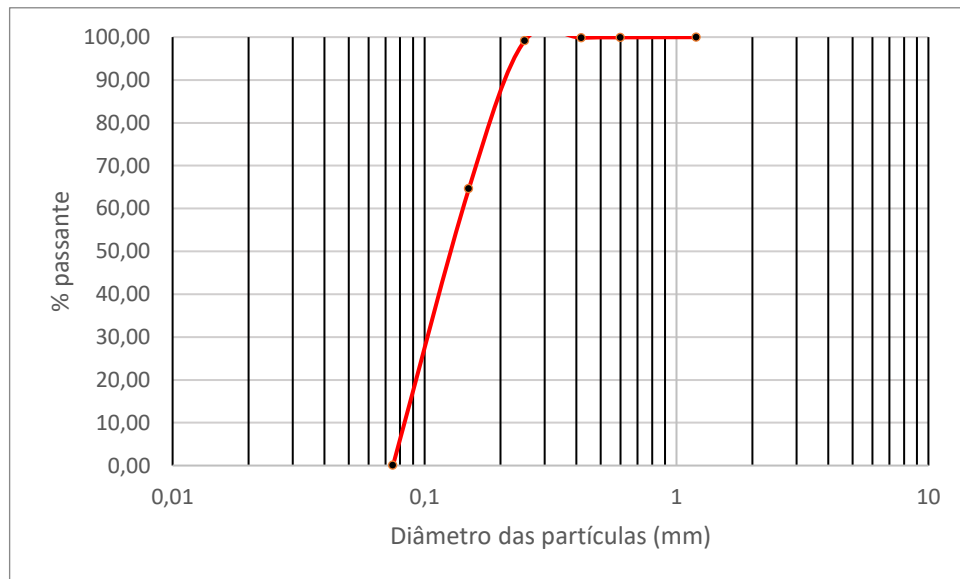
Fonte: o autor (2023).

Gráfico 3 - Curva de granulometria de solo da amostra N3



Fonte: o autor (2023).

Gráfico 4 - Curva de granulometria de solo da amostra N4



Fonte: o autor (2023).

4.6 ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

Utilizando as eq. (8), (9) e (10), foram encontrados os índices de vazios, grau de saturação e altura dos sólidos para cada amostra, respectivamente. Os resultados são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Índice de vazios e Altura dos sólidos das amostras

ID	pd (g/cm ³)	ps (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)	Índice de vazios (e)	Altura dos sólidos (mm)	Grau de Saturação (%)
N1	1,573	2,25	14,79	0,43	18,60	77,32
N2	1,495	2,19	3,46	0,46	18,16	16,30
N3	1,317	2,11	5,06	0,60	16,60	17,73
N4	1,473	2,19	3,56	0,49	17,89	16,02

Fonte: o autor (2023).

Para cada incremento de carga realizado no ensaio, o corpo de prova apresentou deformações imediatas, mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 – Pressões e deformações para cada incremento de carga

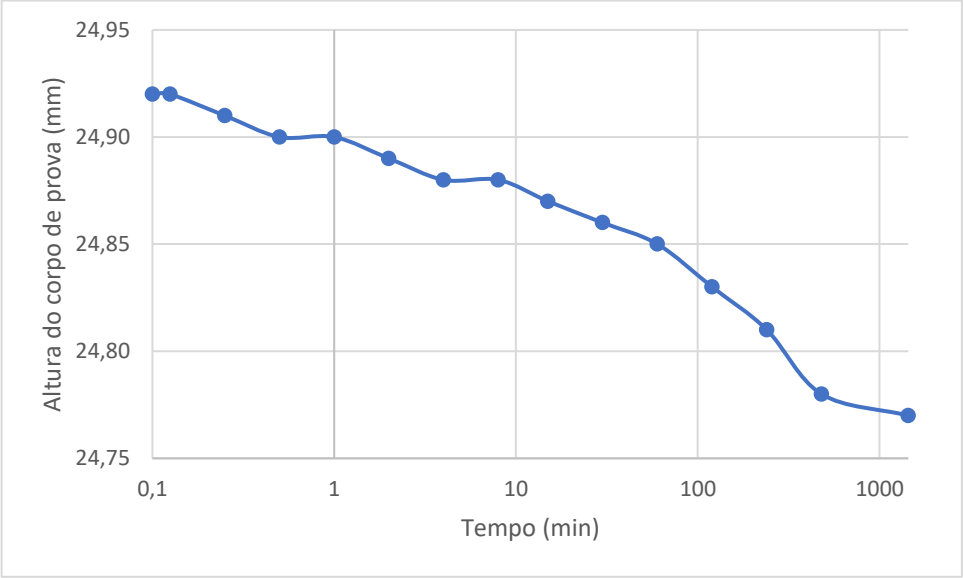
Pressão (kPa)	Peso (kg)	Δt_0 N1 (mm)	Δt_0 N2 (mm)	Δt_0 N3 (mm)	Δt_0 N4 (mm)
12,5	0,25	0,03	0,09	0,05	0,07
500	10	1,65	1,11	1,46	1,5
1000	20	0,3	0,2	0,28	0,24

Fonte: o autor (2023).

Nota: " Δt_0 " corresponde a variação da altura do corpo de prova imediatamente após o incremento de carga.

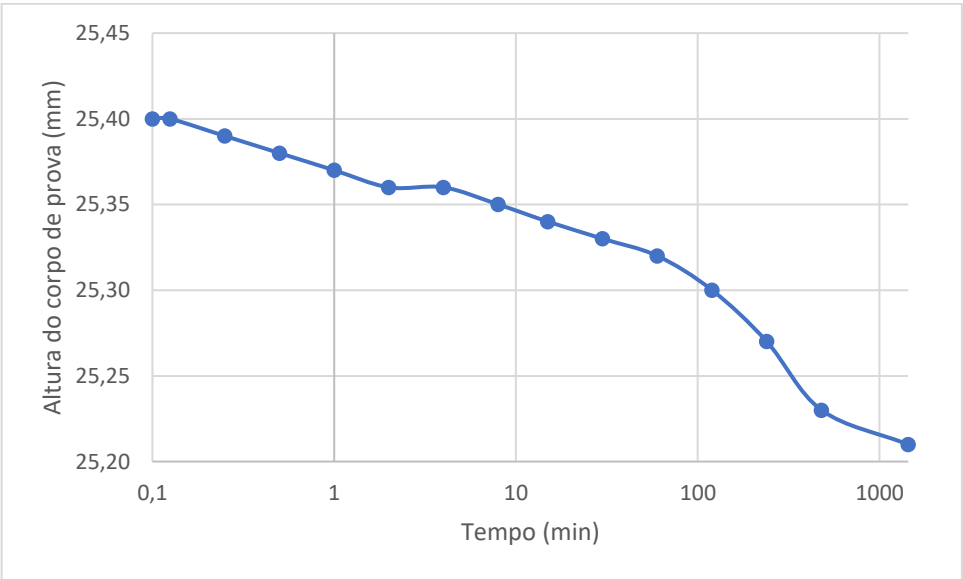
Após o ensaio, foi escolhida a curva de adensamento de cada amostra que apresentou maior variação da altura do corpo de prova, em função do tempo (500 kPa). As respectivas curvas são mostradas nos gráficos a seguir.

Gráfico 5 – Curva de Adensamento da amostra N1 – 500 kPa



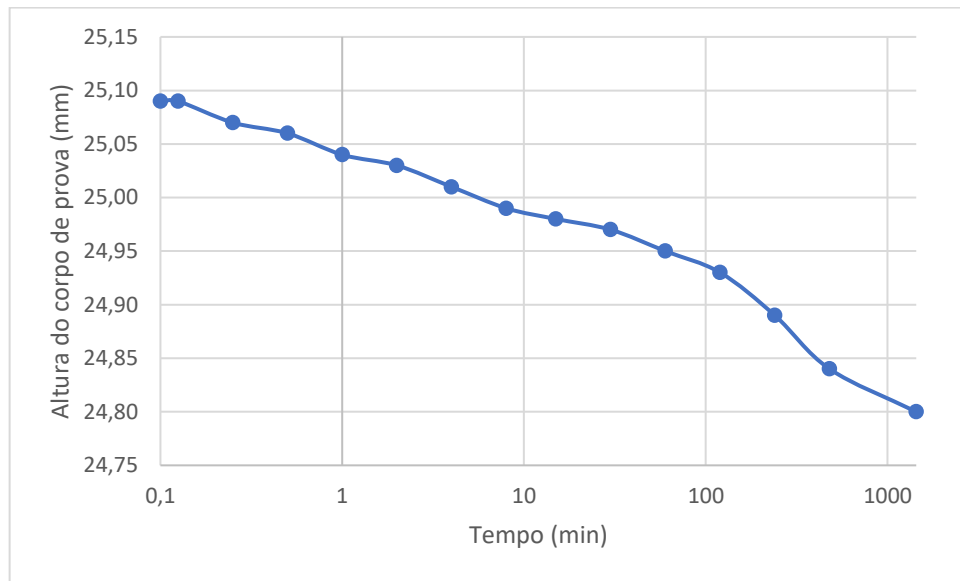
Fonte: o autor (2023).

Gráfico 6 - Curva de Adensamento da amostra N2 – 500 kPa



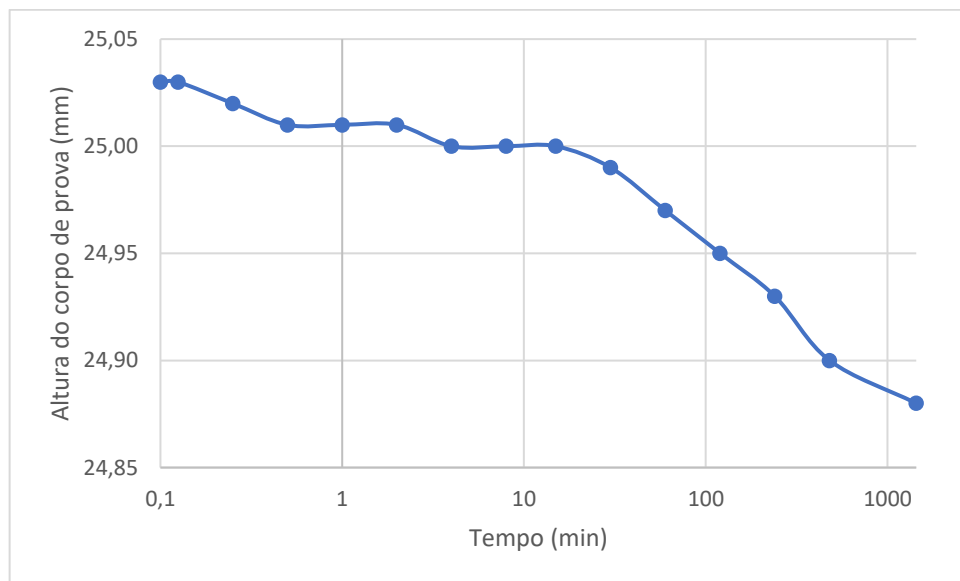
Fonte: o autor (2023).

Gráfico 7 - Curva de Adensamento da amostra N3 – 500 kPa



Fonte: o autor (2023).

Gráfico 8 - Curva de Adensamento da amostra N4 – 500 kPa



Fonte: o autor (2023).

5 DISCUSSÃO

Analisando as amostras visualmente, foi observado que se tratam de solos arenosos e as amostras são bastante semelhantes entre si, exceto a amostra N3, que apresenta uma cor mais escura, proveniente de maior quantidade de matéria orgânica. Observando as curvas granulométricas e os respectivos coeficientes de

uniformidade e curvatura, percebe-se que as amostras N1 e N3 apresentam maior variação em seus grãos, enquanto que as amostras N2 e N4 apresentam grãos de tamanhos muito semelhantes. Se tratando da granulometria, a amostra N3 é a mais desejável para fundações, visto que um solo bem graduado apresenta menos vazios entre as partículas e impede uma maior deformação sob esforços, se comparado com um solo com maiores espaços entre os grãos. Segundo a NBR 7217, areias com módulo de finura (MF) menor que 2,4 são consideradas areia fina, portanto, os solos das amostras são todos compostos por areia fina, sendo a amostra N3 a que apresenta a maior quantidade de grãos de maiores dimensões.

Das (2016) fornece valores de referência para algumas das propriedades físicas dos solos que foram medidas neste estudo, mostradas na tabela a seguir.

Tabela 12 - Valores de referência para índice de vazios, teor de umidade saturado e peso específico de diferentes solos

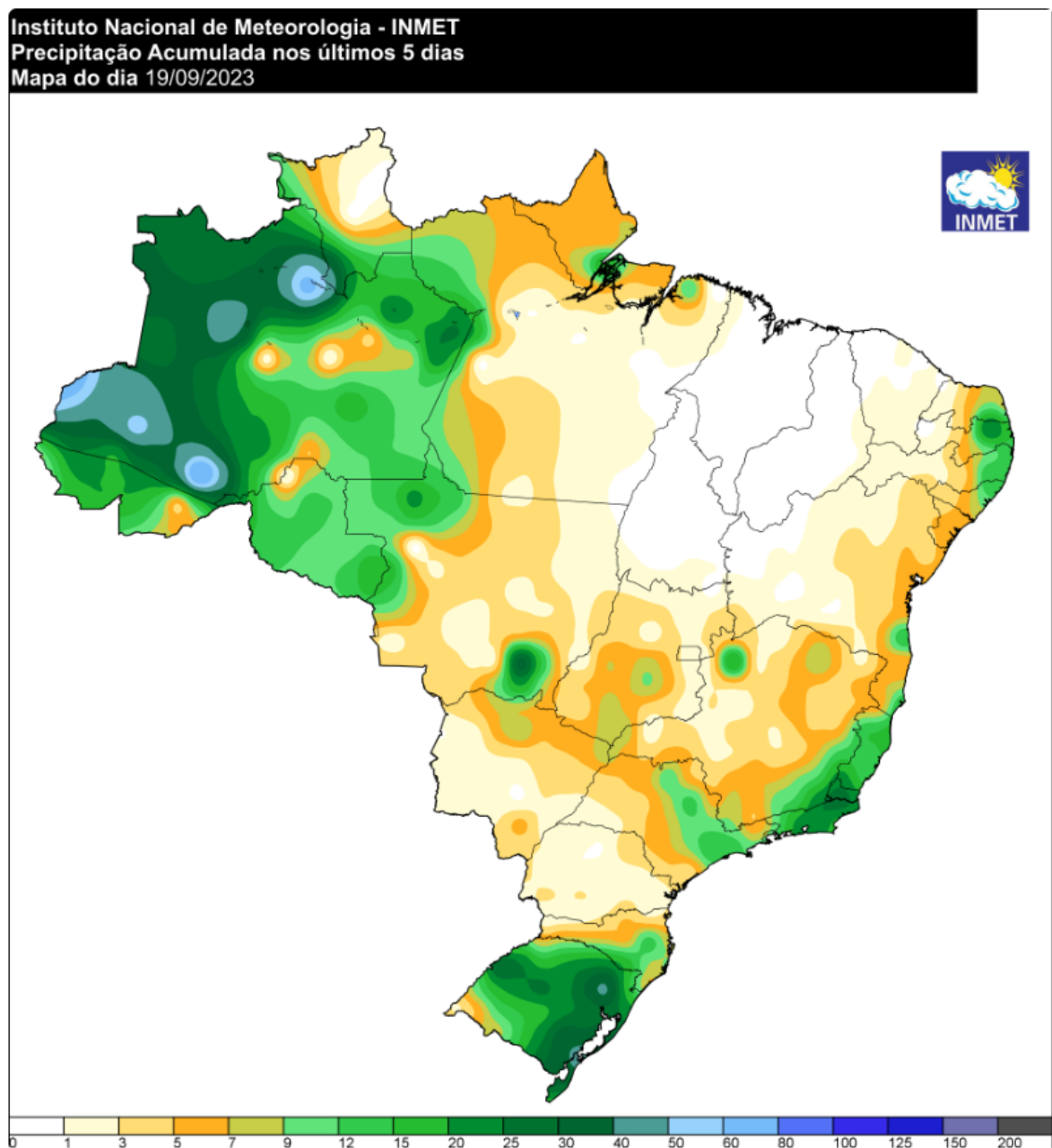
Tipo de solo	Índice de Vazios (e)	Teor de umidade no estado saturado (%)	Peso específico seco (γ_d) em kN/m³
Areia uniforme fofa ou solta	0,80	3	14,5
Areia uniforme compacta	0,45	16	18
Areia siltosa com granulação angular fofa	0,65	25	16
Areia Siltosa com granulação angular compacta	0,40	15	19
Argila rija	0,60	21	17
Argila mole	0,90-1,40	30-50	11,5-14,5
Loess	0,90	25	13,5
Argila orgânica mole	2,50-3,20	90-120	6-8
Till Glacial	0,30	10	21

Fonte: Das (2016).

Comparando primeiramente o índice de vazios de cada amostra, foram encontrados valores semelhantes para as amostras N1, N2 e N4, compreendidos entre 0,43 e 0,49, já a amostra N3 apresentou um índice mais distante equivalendo 0,6, mesmo tendo a curva granulométrica mais graduada. A explicação disso pode ser a grande presença de matéria orgânica em sua composição. Essa diferença de índice de vazios para cada trecho da rodovia, pode resultar em ondulações, visto que um solo será mais comprimido que o outro, quando submetido a cargas verticais.

Percebe-se que o teor de umidade da amostra N1 foi de 15%, enquanto que o teor de umidade das outras amostras ficou na média de 4%. Observando o grau de saturação das amostras, percebe-se que a amostra N1 apresentou um grau de saturação bem maior (77% contra, em média 16,7%). Entretanto, analisando a precipitação acumulada nos últimos 5 dias anteriores a coleta (que foi realizada no dia 20/09/2023) apresentada na Figura 24, percebe-se que a precipitação na região foi de aproximadamente 1mm.

Figura 24 – Precipitação acumulada em 5 dias antes da coleta



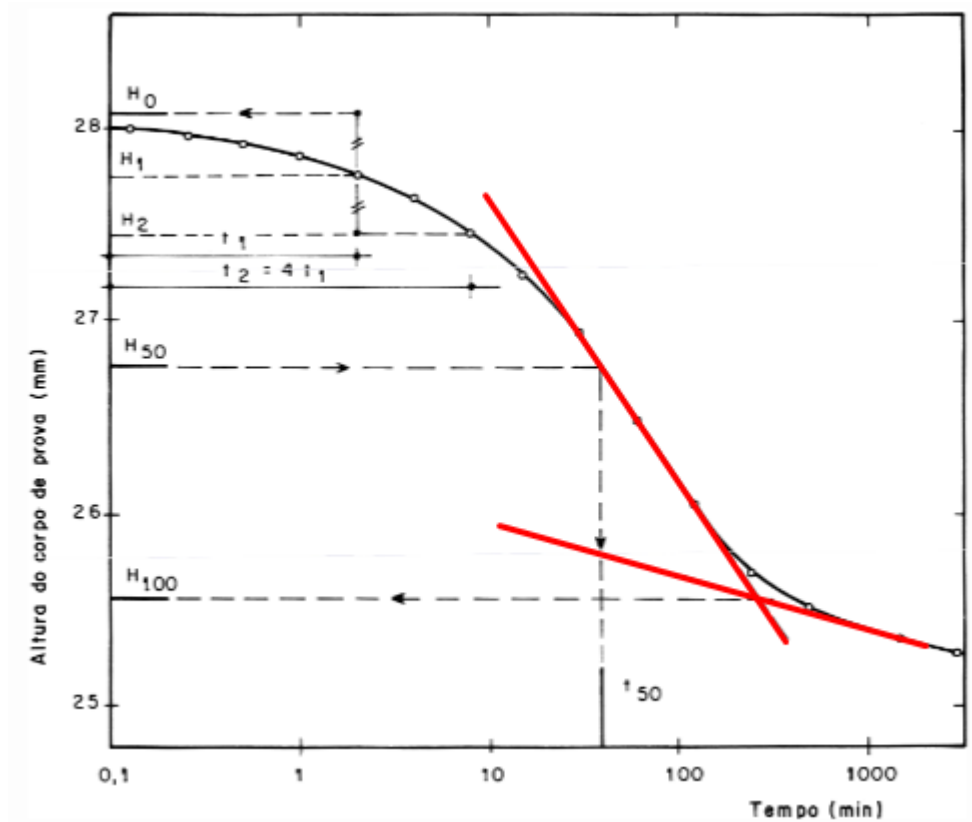
Fonte: INMET (2023).

A explicação para que a amostra N1 tenha mantido um maior teor de umidade pode ser pela forma como a amostra foi armazenada. Diferente das outras 3 amostras, essa amostra apresentou um problema no momento de colocar os tampões no cano de PVC, que não encaixou completamente. Esse fato pode ter impactado para que a amostra adquirisse umidade após a coleta.

O peso específico seco das amostras determinados foram o esperado para as areias. Já que se tratam de grãos muito parecidos se observada a massa específica dos grãos e granulometria, a diferença de peso específico seco das amostras pode ser explicada pela forma como o solo estava arranjado no campo, as que apresentam vazios maiores e maior quantidade de matéria orgânica apresentaram menores densidades, já os mais compactos, maiores densidades.

Partindo para a análise referente ao adensamento, não foi possível distinguir o ramo de compressão virgem e o ramo de compressão secundária, para que fosse traçada as tangentes e encontrada a altura referente a 100% do adensamento primário H_{100} . Para que a altura H_{100} possa ser encontrada, o solo deve apresentar um comportamento parecido com o da figura abaixo.

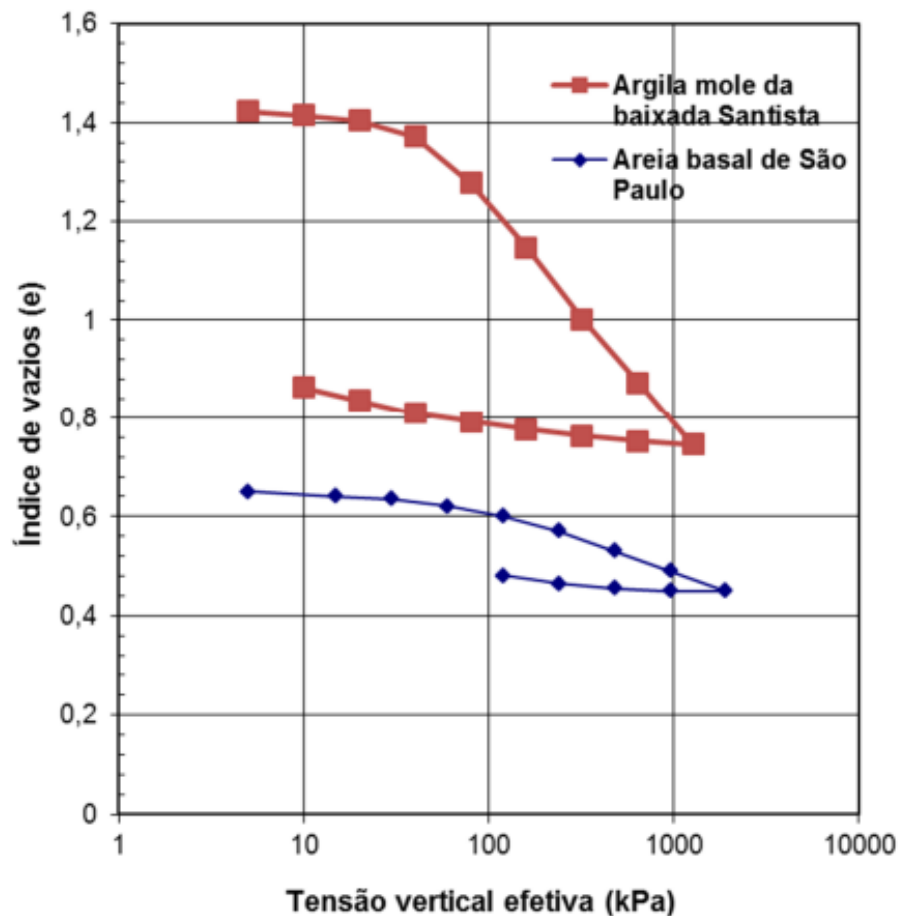
Figura 25 – Modelo de solo esperado com o ensaio de adensamento



Fonte: adaptado da NBR 16853 (2020).

Buscando na literatura, o tipo de solo que se esperava encontrar para realizar o respectivo ensaio era um solo coesivo, entretanto, os solos encontrados nas amostras foram todos não coesivos. O modelo do comportamento de compressão esperado geralmente acontece devido a expulsão de água dos vazios em função do tempo, mas analisando as tabelas de teor de umidade, percebe-se que pouca umidade foi perdida após o ensaio. O comportamento de compressão desses dois tipos de solos é diferente, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 26 - Curva de compressão edométrica



Fonte: Deformabilidade dos solos arenosos vs compressibilidade dos solos argilosos (sem data).

Desse modo, a teoria de adensamento de Terzaghi não pode ser aplicada, visto que não é possível distinguir o ramo de compressão virgem. Observando a tabela 11, podemos reparar que os corpos de prova obtiveram uma grande deformação imediatamente após a aplicação das cargas e se comparada com as deformações apresentadas nas curvas de adensamento, estas foram bem menores. A teoria de Terzaghi é baseada na compressibilidade do solo ao longo do tempo, submetido a uma tensão de forma que a água presente nos vazios do solo seja drenada lentamente, aumentando a coesão entre cada partícula. Os solos não coesivos, são conhecidos por sua baixa capacidade de retenção de água, de forma que o seu assentamento aconteça logo após a aplicação de uma carga. Dessa forma, para a estimativa de recalques em solos arenosos o emprego de outros tipos de ensaios é mais indicado, juntamente com modelos de previsão de recalques devido à dificuldade

de amostragem e ensaio desses materiais em laboratório com as mesmas características *in situ* (Velloso e Lopes, 2010).

Dito isto, foi encontrada uma possibilidade para explicar o tipo de recalque que acontece em alguns trechos da rodovia que ainda valida o primeiro pensamento deste estudo: o recalque é causado por adensamento devido a solos coesivos, porém este solo com um maior teor de argila se encontra em maiores profundidades, que não foi alcançada com nosso amostrador, que obteve o tipo de solo encontrado em 40 cm de profundidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a caracterização do solo das amostras, pudemos observar que em alguns trechos da rodovia, o solo apresentou um índice de vazios maior. Um solo com maior índice de vazios se deforma mais que um solo com menor índice de vazios, quando submetido a uma carga vertical. Com essa análise, podemos concluir que alguns trechos apresentam maiores recalques que outros. Esse pensamento é válido, não somente para o índice de vazios, bem como para todas as características do solo, visto que solos diferentes apresentam comportamentos diferentes.

Para estimar melhor esse recalque seria necessário o emprego de um ensaio triaxial com as amostras, que é mais indicado para solos arenosos. Outra possibilidade, caso existam solos argilosos em camadas de solo mais profundas no trecho de análise, seria realizar a coleta desse tipo de solo e repetir os ensaios empregados neste estudo.

Quando encontrado solos moles através das investigações geotécnicas, é necessário o emprego de técnicas de aterro que visam minimizar o recalque ao longo do tempo. Para isso, o solo deve ser caracterizado em todos seus trechos, para prever seu comportamento quando submetido a cargas verticais e realizar as técnicas de aterro adequadas para este comportamento.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16853: Solo — Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, p. 24. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: — Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, p. 24. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, p. 24. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, p. 24. 2003.

ALMEIDA, M.; MARQUES, M. **Aterros sobre solos moles: Projeto e desempenho**. São Paulo: Oficina de Textos. 2014. Acesso em: 01 out. 2023.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos Solos: Teoria e Aplicações**. Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 9788521638032. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521638032/> Acesso em: 17 set. 2023.

DAS, Braja M. **Princípios de engenharia de fundações: Tradução e adaptação da 8ª edição norte-americana**. Cengage Learning Brasil, 2016. E-book. ISBN 9788522124169. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788522124169/> Acesso em: 05 out. 2023.

Deformabilidade dos solos arenosos vs compressibilidade dos solos argilosos. (sem data). Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5050941/mod_resource/content/6/compressib..pdf Acesso em: 14 nov. 2023.

EBELING, A. **Atributos físicos e matéria orgânica de organossolos háplicos em distintos ambientes no Brasil**. Tese de Doutorado da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Seropédica (RJ). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/LqBPNxcnfZsPDQbrPzcXSWG/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 10 out. 2023.

EMPRAPA. SIBCS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos do Brasil**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs> Acesso em: 25 set. 2023.

FLORIANO, Cleber. **Mecânica dos solos**. Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788569726975. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788569726975/> Acesso em: 25 set. 2023.

FUTAI, M. M.; NETO J. O. A. **Aspectos Gerais do Uso de Geossintéticos em Reforço de Aterros Sobre Solos Moles**. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG. Belo Horizonte. 2016.

GALVÃO, F. **Composição florística e fitossociologia de caxetais do litoral do estado do paraná – brasil**. Dep. De Ciências Florestais da UFPR, Curitiba – PR. jun. 2002. Disponível em <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/16963> Acesso em: 10 out. 2023.

GUAITA, G. R. **Histórico de ocupação e diagnóstico ambiental do Município de Pontal do Paraná: subsídios para o planejamento ambiental**. UFPR Setor Litoral, 2008. Disponível em: <http://www.augm-cadr.org.ar/archivos/7mo-coloquio/poster/20080422.pdf> Acesso em: 08 out. 2023.

HAN, JIE & GABR, M. **Numerical Analysis of Geosynthetic-Reinforced and Pile** (2002). Acesso em: 08 out. 2023.

JUNIOR, Edison Gilton J. B; ARAUJO; PIRES, Rachel C. S. **Solos Moles: Os desafios na construção civil**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, 24 de maio de 2021.v.7, n.5, p. 51803-51824. Disponível em <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/30290/23825> Acesso em: 24 jun. 2023.

MARANGON, M. **Geotecnia de Fundações**. 2009. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/510594238/M-Marangon-Geotecnia-de-Fundacoes> Acesso em 15 set. 2023.

MASSAD, F. **Obras de Terra – curso básico de geotecnia**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2010. Acesso em: 30 set. 2023

MORAES, Juliana Goulart. **Análise da tensão x deformação e suas possíveis inter-relações no leito estradal da rodovia de acesso norte do município de tubarão, a partir de carregamentos limítrofes**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, 2019. Disponível em <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/4416/1/Tcc%20Juliana%20Moraes%20RIUNI%20corrigido.pdf> Acesso em: 20 mai. 2023.

MOTTA, Felipe Debize; NETO, Paulo Pinheiro Castanheira; SILVA, Flávia; PIRES, Rachel Cristina Santos. **Caracterização dos solos moles e técnicas de reforço para construção de aterros, com ênfase nos geotêxteis**. Editora Epitaya, ISBN: 978-65-87809-54-0, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/209/434> Acesso em 15 set. 2023.

OLIVEIRA, Bianca Lopes de. **Construções de aterros sobre solos moles**. Editora Saraiva, 2021. E-book. ISBN 9786589881797. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786589881797/> Acesso em: 12 set. 2023.

PELAQUIM, Flávia Gonçalves P. **Mecânica dos solos aplicada à geotecnia**. Editora Saraiva, 2021. E-book. ISBN 9786559031184. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559031184/> Acesso em: 12 set. 2023.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/471633231/Curso-Basico-Mecanica-dos-Solos-Carlos-de-Souza-Pinto-3%C2%AA-ed-pdf> Acesso em: 15 set. 2023.

VAMPETA. Talvez o prédio mais torto da Orla de Santos. Disponível em: https://www.reddit.com/r/brasil/comments/s4xixo/talvez_o_pr%C3%A9dio_mais_torto_da_orla_de_santos/?rdt=55835 Acesso em: 22 set. 2023.

SANTOS, Guilherme Veloso. **Patologias devido ao recalque diferencial em fundações**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília – UniCEUB. Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/6389/1/21113271.pdf> Acesso em: 22 set. 2023.

SANTOS, Palloma Ribeiro Cuba dos; DAIBERT, João D. **Análise dos Solos**. Editora Saraiva, 2013. E-book. ISBN 9788536518589. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518589/> Acesso em: 20 jun. 2023.

SIMÕES, F. T; CORREIA, H. R. **Projeto de estacas de aterros estruturados em áreas de interface com aterros convencionais – estudo de caso em Guaratiba**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/7831> Acesso em: 8 out. 2023.

VELLOSO, D.; LOPES, F. **Fundações. Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. Oficina de textos, 2010. Acesso em: 14 nov. 2023.

ZORZAN, G. Lucas; STRESSER, Cleyton; DIAS, Luana. **Propriedades e índices físicos de solos**. Grupo de estudos em Geotecnia, UFPR. Março, 2019. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2020/01/APOSTILA-PROPRIEDADES-E-%C3%8DNDICES-F%C3%8DSICOS-DE-SOLOS.pdf> Acesso em: 26 jun. 2023.