UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

GABRIEL SOUZA LOPES

ESTUDO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DE SOLOS COM COMPORTAMENTO LATERÍTICO

Ilha Solteira

2024

GABRIEL SOUZA LOPES

ESTUDO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DE SOLOS COM COMPORTAMENTO LATERÍTICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima
Orientador

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Lopes, Gabriel Souza.
L864e Estudo da massa específica aparente solta de solos com comportamento laterítico / Gabriel Souza Lopes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
61 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: Jairo Salim Pinheiro de Lima

Inclui bibliografia

1. Massa específica solta. 2. Pavimentação rodoviária. 3. Corpos de prova alternativos.

Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: GABRIEL SOUZA LOPES

Titulo: “ESTUDO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DE SOLOS COM COMPORTAMENTO LATERÍTICO.”

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
JAIRO SALIM PINHEIRO DE LIMA
Data: 08/01/2024 10:14:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)

Prof. Dr. Cesar Gustavo da Rocha Lima

UNESP – Campus de Ilha Solteira

gov.br Documento assinado digitalmente
GEAN PEREIRA DA SILVA JUNIOR
Data: 08/01/2024 14:15:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

MSc. Gean Pereira da Silva Júnior

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

08/01/2024

DEDICATÓRIA

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus pela força concedida ao longo de minha trajetória, pela luz que iluminou meus caminhos e pela constância em manter-me firme neste propósito. Aos meus pais, Ednilson Lopes de Faria e Ivone de Jesus Souza, meu profundo agradecimento pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha vida, sendo a base fundamental e sempre dispostos a tudo para me ajudar a alcançar meus objetivos.

À minha namorada, Camila, minha companheira desde o início da minha jornada universitária, agradeço por estar ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio. A toda minha família, que contribuiu significativamente para minha formação como pessoa, transmitindo ensinamentos e valores que levarei para toda a vida.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, Jairo Salim Pinheiro de Lima, por confiar em mim para esta pesquisa e por seu apoio fundamental, fornecendo valiosos ensinamentos. Ao técnico do laboratório de pavimentação da FEIS, Ozias Porto, meu agradecimento pelo auxílio em práticas e experimentos laboratoriais essenciais para este trabalho, sempre prestativo e atencioso com os alunos da universidade.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET), no qual tive a oportunidade de participar, expresso minha gratidão por ser um grupo que contribuiu ativamente para o meu desenvolvimento, auxiliando-me no aprimoramento de diversas habilidades acadêmicas e pessoais.

Por fim, minha gratidão à UNESP de Ilha Solteira por toda a estrutura proporcionada durante minha jornada acadêmica, aos professores que contribuíram para minha formação e por ser o ambiente que esteve intimamente ligado a esta nova fase da minha vida. Sou profundamente grato por todas as experiências vivenciadas nesta instituição.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar a massa específica solta de solos de comportamento laterítico utilizáveis em pavimentação rodoviária e investigar a utilização de corpos-de-prova alternativos para determinar a massa específica solta. A massa específica solta é um parâmetro para determinar o volume solto dos materiais transportados em serviços de terraplenagem. O volume solto impacta no número de viagens, com reflexos em condicionantes ambientais para a obra. Dentre os ensaios realizados, destacam-se: a granulometria e os limites físicos para determinar a classificação Transportation Research Board (TRB) e os ensaios mini-MCV e perda de massa por imersão, para a classificação MCT. O ensaio de compactação foi realizado na energia do Proctor normal. Para medir a massa específica solta foram adotados diferentes teores de umidade e moldes com diferentes tamanhos, formas e materiais. Com base nos dados, é possível afirmar que o comportamento do solo laterítico é diretamente relacionado com a variação do teor de umidade, sendo que a massa específica aumenta com o aumento da umidade, diminui na umidade ótima e continua a aumentar até atingir o limite de plastificação, resultando maiores valores de massa específica solta (e seca) e, portanto, menor empolamento. Desta forma, com o conhecimento assertivo da umidade do solo em análise é possível otimizar o número de viagens entre a área de empréstimo até o local da obra, fator que tem impacto direto para uma construção sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Massa específica solta. Pavimentação rodoviária. Corpos de prova alternativos.

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the loose specific mass of lateritic soils usable in road pavement and investigate the use of alternative specimen samples for determining the loose specific mass. Loose specific mass is a parameter used to determine the volume of loose materials transported in earthwork operations. The volume of loose materials impacts the number of trips, affecting environmental conditions on the construction site. Notable tests conducted include: granulometry and physical limits to determine the Transportation Research Board (TRB) classification, and the mini-MCV and mass loss by immersion tests for the MCT classification. The compaction test was carried out using the energy of the standard Proctor. To measure the loose specific mass, different moisture contents were adopted along with molds of varying sizes, shapes, and materials. Based on the data, it was possible to affirm that the behavior of lateritic soil is directly related to variations in moisture content. The loose specific mass increases with higher moisture content, decreases at the optimum moisture, and continues to increase until reaching the plastic limit, resulting in higher values of loose (and dry) specific mass and consequently, less bulking. Thus, with accurate knowledge of the soil moisture under analysis, optimization of the number of trips from the borrowing area to the construction site is achievable. This factor directly impacts sustainable construction practices.

KEYWORDS: Loose specific mass. Road paving. Alternative test specimens.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil pedológico das camadas de solos. 16
Figura 2 - Estrutura de um pavimento flexível 17
Figura 3 - Estrutura de pavimento rígido. 18
Figura 4 - Localização da jazida de coleta do solo. 20
Figura 5 - Aparelho vibratório utilizado no método do peneiramento. 22
Figura 6 - Aparelho de dispersão utilizado no método de sedimentação 22
Figura 7 - Ensaio de limite de liquidez. 23
Figura 8 - Ensaio do limite de plasticidade. 23
Figura 9 - Determinação da umidade no ensaio de limite de plasticidade. 24
Figura 10 - Ábaco para a classificação TRB. 25
Figura 11 - Aparato para realização da compactação mini-MCV. 25
Figura 12 - Ensaio de compactação mini-MCV. 26
Figura 13 - Ensaio de perda de massa por imersão. 27
Figura 14 - Ábaco para a classificação MCT dos solos. 28
Figura 15 - Ensaio de compactação. 29
Figura 16 - Moldes cúbicos de madeira. 31
Figura 17 - Moldes cúbicos de metal 31
Figura 18 - Moldes cilíndricos de PVC. 32
Figura 19 - Moldes cilíndricos metálicos. 32
Figura 20 - Molde de madeira, em ensaio para determinar a massa específica solta. 33
Figura 21 - Procedimento de ensaio dos corpos de prova cilíndricos menores. 34
Figura 22 - Curva granulométrica do solo de comportamento laterítico. 36
Figura 23 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de madeira menor. 39
Figura 24 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de metal menor. 39
Figura 25 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de PVC menor. 40
Figura 26 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde mini-Proctor. 41

Figura 27 - Massa total dos solos em moldes com dimensões reduzidas. 41
Figura 28 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de madeira maior. 42
Figura 29 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de metal maior.....43
Figura 30 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de PVC maior. 43
Figura 31 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde Proctor.....44
Figura 32 - Massa total dos solos em moldes com dimensões maiores. 45
Figura 33 - Curva de regressão dos dados para os moldes menores. 46
Figura 34 - Curva de regressão dos dados para os moldes maiores. 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios para a classificação TRB. 37
Tabela 2 - Coeficiente obtidos para a classificação MCT. 37
Tabela 3 – Parâmetros ótimos de compactação.....38
Tabela 4 - Massa específica aparente solta para o molde menor de madeira. 38
Tabela 5 - Massa específica aparente solta para o molde de metal menor. ...39
Tabela 6 - Massa específica aparente solta para o molde de PVC menor. 40
Tabela 7 - Massa específica solta para o molde mini-Proctor. 40
Tabela 8 - Massa específica aparente solta para o molde de madeira maior. 42
Tabela 9 - Massa específica aparente solta para o molde de metal maior. 42
Tabela 10 - Massa específica aparente solta para o molde de PVC maior. ...43
Tabela 11 - Massa específica aparente solta para o molde de Proctor. 44

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Resultados do ensaio de granulometria conjunta 52
Anexo 2 -Curva granulométrica do solo.....53
Anexo 3 – Resultados do ensaio dos limites de Attemberg. 54
Anexo 4 - Classificação TRB. 55
Anexo 5 – Resultados do ensaio de Mini-MCV e perda por imersão.....56
Anexo 6 - Determinação de c' e e'. 57
Anexo 7 - Dados de perda de massa por imersão de Solo Compactado e Determinação do d'. 58
Anexo 8 - Determinação do coeficiente d'. 59
Anexo 9 - Classificação MCT.....60

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 13

2 OBJETIVO 14

2.1 Objetivo geral 14

2.2 Objetivos específicos 14

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15

3.1 Solo 15

3.1.1 Perfis do solo 15

3.1.2 Solos de comportamento laterítico 16

3.2 Estrutura de um pavimento 17

3.3 Solos soltos e compactados 18

3.3.1 Solos soltos 18

3.3.2 Solos compactados 19

3.3.3 Relação entre solos soltos e compactados 19

4 MATERIAIS E MÉTODOS 20

4.1 Coleta do solo 20

4.2 Caracterização física 21

4.2.1 Procedimentos laboratoriais 21

4.3 Classificação TRB (*Transportation Research Board*) do solo 24

4.3.1 Classificação MCT (Miniatura Compactado Valor) 25

4.4 Determinação da massa específica solta 30

4.5 Análise de dados 34

5 RESULTADOS 36

5.1 Classificação do solo 36

5.1.1 Classificação TRB (AASHTO) 36

5.1.2 Classificação MCT 37

5.2 Ensaio de compactação.....37

5.3 Massa específica aparente solta.....38

6 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS DADOS.....45

7 CONCLUSÃO 48

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 50

1 INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira tem 1.722.518 km dos quais 1.350.100km são de estradas não pavimentadas. Por outro lado, 64,86% das cargas nacionais são transportadas pelas rodovias (Confederação Nacional do Transporte – CNT, 2022). A combinação destes fatores implica nas cadeias produtivas e na relevância das estradas para a economia. Manter a qualidade de tráfego nas vias, portanto, é importante para o próprio desenvolvimento do País. Mas além de consumir muitos recursos, estradas perdem qualidade com o tempo e o uso, exigindo permanentes intervenções de recuperação e manutenção.

Construir e manter estradas recomenda classificar e caracterizar os materiais, controlar os serviços e observar as limitações regionais e operacionais. Empregar as técnicas adequadas, selecionar os tipos de equipamentos e o volume dos insumos empregados fazem parte do conjunto de ações vinculadas ao planejamento da obra para maximizar os investimentos e, ao mesmo tempo, mitigar os impactos ambientais resultantes.

O deslocamento das frentes de serviços em obras rodoviárias exige a movimentação crescente de máquinas e materiais. Neste sentido, a exploração dos solos (desde a jazida e áreas de empréstimo) para a sua aplicação em pavimentação pode ser dividida em quatro etapas: escavação; carregamento; transporte; e descarregamento. No local da obra os solos são espalhados, destorroados, umedecidos, homogeneizados e compactados.

Tomando como referência o ciclo de exploração e aplicação, as características estruturais do solo podem ser descritas em três etapas: natural, empolado e compactado. Cada um destes “estados” impõe condições típicas de umidade e massa específica. Assim, os materiais podem apresentar massa específica natural – quando in natura nas jazidas e áreas de empréstimos; empolada (ou solta) – quando são escavados, transportados, destorroados, umedecidos e homogeneizados; compactada – quando submetidos aos efeitos da compactação. Nos três casos, o fator determinante é o volume de vazios de ar.

Identificar as propriedades e características dos solos no estado natural solto ou compactado permite determinar os volumes a escavar, a transportar e a compactar. Como consequência, as áreas de exploração, o número de viagens e a compactação adotam quantitativos equivalentes, evitando excessos ou escassez de materiais e de serviços. Nos dois casos, mitigando custos adicionais (financeiros e ambientais) à

obra.

No caso do material solto, objeto deste estudo, o volume de vazios de ar incorporado entre as partículas do solo resulta em aumento de volume. Este acréscimo é chamado de empolamento e cada solo apresenta propriedades típicas. O conceito de empolamento, portanto, está relacionado à massa específica solta do material. A massa específica solta permite calcular o volume solto dos materiais empregados em pavimentação.

O volume solto – também chamado volume pago – é determinante para calcular o número de viagens para transportar o material desde a sua origem até o local da obra. Também é empregado para definir distâncias de descarregamento e a espessura solta da camada a compactar, de modo a resultar na espessura compactada definida no dimensionamento do pavimento.

Este estudo visa determinar a massa específica solta de solos lateríticos e analisar o impacto do teor de umidade na obtenção desse parâmetro, empregando corpos-de-prova com diferentes materiais e dimensões. Posteriormente, foi realizada uma investigação para avaliar a viabilidade do uso de corpos-de-prova com dimensões reduzidas na determinação da massa específica solta do solo.

Os resultados esperados deste estudo visam otimizar o planejamento e os serviços de terraplenagem e a logística na execução de obras. Além disso, buscam-se reduzir custos e otimizar o tempo de execução dos serviços, incluindo a operação de maquinário e equipamentos, oferecendo abordagem mais eficiente e precisa na determinação da massa específica solta do solo.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Analisar as características mecânicas de um solo laterítico coletado em Ilha Solteira – SP para a posterior determinação da massa específica solta de solos lateríticos utilizáveis em pavimentação rodoviária.

2.2 Objetivos específicos

O objetivo dessa pesquisa é classificar e caracterizar amostras de solos lateríticos para a pavimentação rodoviária. A fim de determinar as características e propriedades do material empolado e calcular a massa específica solta deste material em diferentes teores de umidades.

Comparar os resultados das massas específicas soltas obtidas em diferentes tipos de corpos-de-prova e teores de umidade, buscando replicar os serviços realizados em campo.

Investigar a viabilidade utilização de corpos-de-prova do mini-Proctor na obtenção da massa específica solta do solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Solo

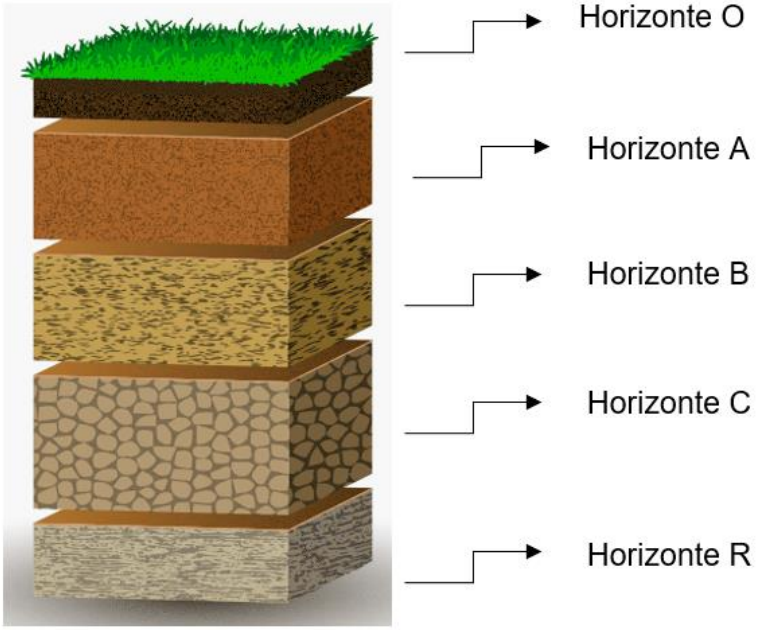
3.1.1 Perfis do solo

A formação do solo inicia no momento em que as rochas são expostas à superfície terrestre, por meio do resfriamento do magma vulcânico. O processo de intemperismo afeta as rochas, levando à sua decomposição e à criação de diversos tipos de solos.

Por meio da ação continuada dos processos pedogenéticos, o perfil de solo evolui e o solo é formado. A representação esquemática do solo pode ser por meio da diferenciação das camadas do solo, como ilustrado na Figura 1. Os horizontes são indicados de acordo com a característica predominante de cada camada do solo, sendo os mais comuns:

- O – Horizonte com resíduos orgânicos (flores, folhas, galhos, frutos, restos e dejetos de animais);
- A – Horizonte mineral rico em material orgânico incorporado aos constituintes minerais do solo;
- B – Horizonte mineral com máxima expressão de cor e estrutura;
- C – Rocha intemperizada (alterada);
- R – Rocha não intemperizada (não alterada).

Figura 1 – Perfil pedológico das camadas de solos.



Fonte: Adaptado Agroadvance,2022.

3.1.2 Solos de comportamento laterítico

Os solos laterítico são solos característicos de áreas bem drenadas, com alta intemperização e lixiviação, e que ocupam os horizontes pedológicos A e B. Possuem coloração com a predominância de tonalidades de vermelho e amarelo, e uma estrutura homogênea e isotrópica. A constituição mineralógica é caracterizada pela presença de quartzo e minerais resistentes mecanicamente e quimicamente na fração areia, como a ilmenita, magnetita, zircão e turmalina. A fração argila é constituída de argilo-minerais, em grande parte a caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (NOGAMI e VILLIBOR, 1983)

Este tipo de solo é amplamente encontrado em relevos suaves no Brasil e países de clima tropical úmido, são de característica permeável a menos que algum processo tenha sido realizado em sua superfície, os taludes por exemplo. O intemperismo faz com que a presença do óxido de ferro seja manifestada de forma clara, fazendo com que já nesse nível de alteração sua característica de coloração é vermelho-amarelada de aspecto ferruginoso, essa é uma das evidencias de jovialidade dos solos (ESPÍNDOLA e DANIEL, 2008).

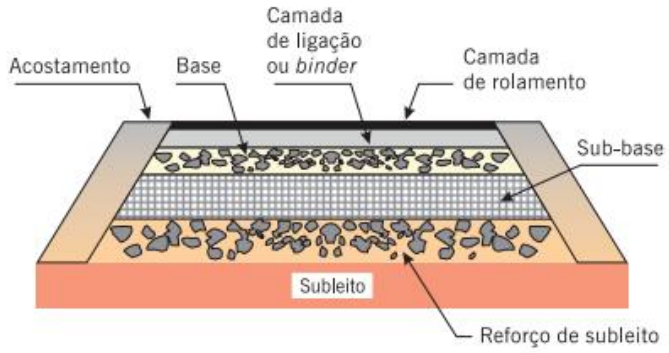
3.2 Estrutura de um pavimento

Senço (1929) define pavimento como a estrutura construída sobre a terraplanagem destinada técnica e economicamente a resistir os esforços verticais oriundos do tráfego e distribui-los, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e resistir aos esforços horizontais de desgaste, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O pavimento é composto por múltiplas camadas de espessuras devidamente dimensionadas para o tipo de carga submetida no mesmo, sendo que, segundo o DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes (DNIT, 2006) o pavimento pode ser classificado em três diferentes tipos: flexíveis, semirrígidos e rígidos.

Os pavimentos flexíveis são caracterizados por estrutura de multicamadas, com revestimento betuminoso sobre base granular ou solo estabilizado, representado na Figura 2. As cargas aplicadas são distribuídas de maneira uniforme entre todas as camadas e, respeitados limites de deformação, não chegam ao rompimento.

Figura 2 - Estrutura de um pavimento flexível

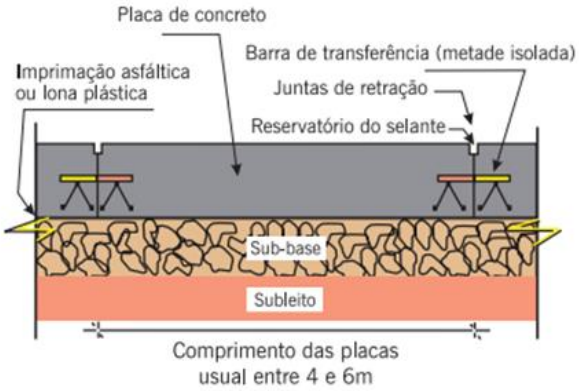


Fonte: Bernucci, et. al (2008).

Os pavimentos semirrígidos apresentam deformidade maior que o rígido e menor que o flexível e base com materiais de características cimentícias.

Os pavimentos rígidos, ilustrados na Figura 3, são pouco deformáveis e trabalham à tração, e o revestimento é de concreto de cimento.

Figura 3 - Estrutura de pavimento rígido.



Fonte: Bernucci, et. al (2008).

3.3 Solos soltos e compactados

3.3.1 Solos soltos

Os solos soltos são caracterizados por uma estrutura com espaços vazios significativos entre as partículas, resultando em baixa densidade e menor coesão. Geralmente, esses solos possuem maior porosidade, o que afeta diretamente as suas propriedades mecânicas e hidráulicas (HOLDS, R. D., 2010).

Um fenômeno diretamente associado aos solos soltos é o empolamento, que significa aumento de volume dos solos ao serem escavados e movimentados. O empolamento pode resultar em maiores custos e dificuldades no transporte (BOWLES, J.E).

Os solos soltos são frequentemente encontrados em áreas de empréstimo, de onde são extraídos para uso na construção civil. Nessas áreas, a seleção criteriosa dos solos soltos é essencial para garantir que atendam aos requisitos de engenharia, como a resistência adequada e a capacidade de compactação para as aplicações pretendidas (DAS, BRAJA M., 1985).

A utilização dos solos soltos em aterros são uma opção, quando disponíveis na região da obra. No entanto, eles apresentam desafios devido à sua baixa capacidade de suporte de cargas e à sua tendência a assentamentos diferenciais. Para mitigar esses problemas, técnicas de compactação podem ser aplicadas para aumentar a densidade do solo, melhorando assim sua estabilidade e capacidade de carga.

No contexto da engenharia civil, é crucial entender o comportamento dos solos soltos para calcular quantidades precisas de solo necessárias para aterros, estradas, fundações e outras estruturas. Isso ajuda a minimizar desperdícios e otimizar os processos de construção.

3.3.2 Solos compactados

A compactação do solo é fundamental na engenharia civil, com o propósito principal de aumentar a densidade do solo, reduzindo os seus vazios e melhorando as suas propriedades mecânicas, como resistência e estabilidade. Esse procedimento busca obter um solo com características desejáveis para a construção de estruturas, estradas, aterros e fundações.

A compactação consiste em aplicar forças mecânicas ao solo, reduzindo o seu volume e aumentando a sua densidade aparente. Melhorando assim as propriedades do solo, aumentando a sua capacidade de suporte de cargas, reduzindo a deformação sob cargas e minimizando a permeabilidade (DAS, BRAJA M., 1985).

A compactação do solo pode ser por diversos métodos e técnicas, e os mais comuns incluem:

- compactação por vibração: que consiste na utilização de compactadores vibratórios para agitar as partículas do solo reduzindo os vazios entre elas;
- compactação por impacto: emprega compactadores que aplicam impacto direto ao solo para aumentar a densidade; e
- compactação por pressão estática: utilizam rolos compactadores de grande peso para aplicar a pressão estática sobre o solo, comprimindo-o.

Mesmo sendo um procedimento considerado simples, a compactação depende de uma série de fatores para que seja feita de modo apropriado e preciso. Dentre os principais fatores que influenciam na compactação, destacam-se o teor de umidade e a energia de compactação. E o teor de água ideal varia de acordo com o tipo de solo. Outro dado importante na compactação é a seleção e utilização dos equipamentos. Cada tipo de solo requer tipos apropriados de equipamentos para a sua compactação (HOLDS, R. D., 2010).

3.3.3 Relação entre solos soltos e compactados

Os solos compactados se caracterizam por uma estrutura mais densa, obtida por meio do processo de compactação. Esse procedimento reduz os vazios entre as partículas, resultando em maior resistência ao cisalhamento e à compressão, o que

culmina em notável melhoria na capacidade de suporte de cargas. Em contrapartida, os solos soltos ostentam estrutura menos densa, contendo quantidade maior de espaços vazios entre as partículas. Esse arranjo resulta em resistência mecânica inferior (DAS, BRAJA M., 1985).

As propriedades hidráulicas desses solos divergem, influenciadas diretamente por sua estrutura e porosidade. Os solos compactados geralmente apresentam menor permeabilidade, fruto da diminuição dos vazios, enquanto os solos soltos exibem maior capacidade de drenagem, dado a presença de espaços vazios interconectados (LAMBE, T. W.,1970).

Em relação à estabilidade, os solos compactados demonstram tendência superior, atribuída à sua estrutura mais coesa e densa, que reduz a probabilidade de movimentos e colapsos. Entretanto, a resistência específica varia conforme a composição do solo, o teor de umidade e a técnica de compactação empregada. Por outro lado, os solos soltos, pela sua estrutura menos coesa, apresentam menor resistência ao cisalhamento, tornando-se suscetíveis a escorregamentos e instabilidades (CRAIG, R.F.,2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Coleta do solo

A amostra de solo utilizada nesta pesquisa provém de uma jazida identificada como “Torre”. Esta jazida está localizada nas coordenadas latitude 20°23'53.3"S e longitude 51°20'01.9” W no município de Ilha Solteira-SP, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Localização da jazida de coleta do solo.



Fonte: Google Earth (2023).

No momento da coleta o solo passou por um processo de destorroamento manual e peneiramento na peneira ASTM #10 (American Society for Testing and Materials), correspondente à malha de 2,0 mm.

Em uma análise preliminar, analisando os padrões táteis visuais, o solo carrega características de um solo saprolítico, com grande quantidade de material orgânico presente em sua composição, visto por alta quantidade de raízes e humus no solo, em conjunto com traços fortes de argila em sua constituição.

4.2 Caracterização física

4.2.1 Procedimentos laboratoriais

4.2.1.1 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

Normatizada pela ABNT NBR 7181:2016, a análise granulométrica do solo é determina a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. A norma estabelece o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento.

Os ensaios para a determinação da granulometria do solo consistem no método do peneiramento, em que, com o auxílio de um agitador mecânico (Figura 5), o solo é submetido a passagem pela sequência de peneiras cujas aberturas são: 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. E o método da sedimentação em água destilada, em que após a separação das partículas grossas do solo, o material passante pelo conjunto de peneiras é submetido ao copo de dispersão (Figura 6), para que as partículas finas do solo sejam analisadas. O método do peneiramento separa as partículas até a dimensão de 0,074 mm, enquanto o método da sedimentação em água destilada é utilizado para as partículas menores que 0,074 mm.

Com as proporções dos materiais passantes e retidos em cada peneira, e também a proporção obtida através do ensaio de sedimentação, é traçada a curva granulométrica do solo, disponível nos anexos do documento.

Figura 5 - Aparelho vibratório utilizado no método do peneiramento.



Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 6 - Aparelho de dispersão utilizado no método de sedimentação



Fonte: Próprio autor (2022).

4.2.1.2 Limites físicos (LL; LP)

Os limites físicos, também conhecidos como limites de Atterberg são os limites de consistência do solo, normatizados pela NBR 6459:2016 e NBR 7180:2016. Esses limites são utilizados para determinar a quantidade de água necessária para que um solo mude de estado sólido para estado plástico e vice-versa.

Para determinar o limite de liquidez do solo, representada na Figura 7, preconizado pela NBR 6459:2016, é necessária retirar uma amostra do solo. Esta amostra é umedecida, homogeneizada e alocada na concha do aparelho de

Casagrande. Depois, são aplicadas sequencias de golpes com o intuito de fechar uma ranhura de 2 mm de profundidade no solo.

Figura 7 - Ensaio de limite de liquidez.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para obter dados precisos, sugere-se realizar o ensaio com ao menos três amostras diferentes do mesmo solo. Com os dados obtidos, é possível calcular o limite de liquidez (LL), utilizando a Equação (1).

$$\mathrm{LL} = (\text{número médio de golpes}) / 10 \quad (1)$$

Para determinar o limite de plasticidade (NBR 7180, 2016), é necessário separar uma amostra de cerca de 10g do material e formar uma pequena esfera.

Com a esfera moldada, sobre uma placa de vidro, é realizado um molde de forma cilíndrica com cerca de 10 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro (Figura 8).

Figura 8 - Ensaio do limite de plasticidade.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O limite de plasticidade é determinado pela umidade em que a amostra começa a fraturar ao ser moldada com a mão sobre a placa de vidro. O procedimento é repetido outras duas vezes para corrigir distorções. Com a amostra em seu ponto de fissuração, é determinado o teor de umidade (Figura 9). Este valor corresponde ao limite de plasticidade.

Figura 9 - Determinação da umidade no ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Com os limites físicos determinados, é possível calcular o índice de plasticidade do solo pela Equação 2.

$$IP = LL - LP \tag{2}$$

4.3 Classificação TRB (*Transportation Research Board*) do solo

A classificação TRB (Transportation Research Board) é um método de classificação de solos que utiliza a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade como fatores determinantes. Esse método foi criado com objetivo de analisar materiais para base e sub-base de pavimentos. As classes dos solos estão resumidas na Figura 10 (DNIT, 2006).

Figura 10 - Ábaco para a classificação TRB.

Grupo ou classificação		% passa na # 10	% passa na # 40	% passa na # 200	Índice de plasticidade	Limite de liquidez	Índice de grupo
A - 1	A -1a	≤ 50	≤ 30	≤ 15	≤ 6	-	0
	A - 1b	≤ 50	≤ 30	≤ 25	≤ 6	-	0
A - 3		≥ 50	≥ 51	≤ 10	NP	-	0
A - 2	A -2 - 4	≥ 50	≥ 51	≤ 35	≤ 10	≤ 40	0
	A - 2 - 5	≥ 50	≥ 51	≤ 35	≤ 10	≥ 41	0
	A - 2 - 6	≥ 50	≥ 51	≤ 35	≥ 11	≤ 40	≤ 4
	A - 2 - 7	≥ 50	≥ 51	≤ 35	≥ 11	≥ 41	≤ 4
A - 4		≥ 50	≥ 51	≥ 36	≤ 10	≤ 40	≤ 8
A - 5		≥ 50	≥ 51	≥ 36	≤ 10	≥ 41	≤ 12
A - 6		≥ 50	≥ 51	≥ 36	≥ 11	≤ 40	≤ 16
A - 7	A - 7 - 5	≥ 50	≥ 51	≥ 36	≤ LL - 30	≥ 41	≤ 20
	A - 7 - 6	≥ 50	≥ 51	≥ 36	> LL - 30	≥ 41	≤ 20

Fonte: Manual de pavimentação (DNIT, 2006).

4.3.1 Classificação MCT (Miniatura Compactado Valor)

4.3.1.1 Compactação mini-MCV

O ensaio Mini-MCV (Miniatura compactado valor), é uma adaptação do ensaio MCV proposto por Parsons em 1976, que utiliza um processo de compactação que permite que, durante a aplicação dos golpes, seja medida a altura do corpo-de-prova resultante. A Figura 11 ilustra o aparato utilizado para a realização do ensaio.

Figura 11 - Aparato para realização da compactação mini-MCV.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A massa específica aparente final do corpo-de-prova tende a um valor próximo à condição de saturação. Para cada teor de umidade há uma energia (nº de golpes) que leva a amostra a este estado de compactação.

O ensaio consiste na compactação de amostras em cilindro miniatura, aplicando-se diferentes níveis de energia para cada teor de umidade, com procedimento é representado na Figura 12. Em seguida, é feita a representação gráfica desses dados.

As curvas de deformabilidade e de compactação são utilizadas para determinar os coeficientes empíricos c' e d' da classificação MCT de solos, conforme estabelecido pela norma DNIT 258/2023-ME (DNIT, 2023). A Equação 3 determina o fator ΔAn nas curvas de deformabilidade.

$$\Delta An = A_n - A_{4n} \quad (3)$$

Onde:

- ΔA_n: diferença de altura (afundamento), expressa em mm;
- A_n: leitura obtida após n golpes, expressa em mm;
- A_{4n}: leitura obtida após 4n golpes, expressa em mm.

Figura 12 - Ensaio de compactação mini-MCV.



Fonte: Próprio autor.

Os dados da compactação mini-MCV são empregados para determinar as curvas de compactação correspondentes aos números de golpes da série de Parsons. Na curva de 12 golpes é determinado o índice d', fator que integra o cálculo de e'. A Equação 4 determina o valor da massa específica aparente seca correspondente ao teor de umidade admitido e ao número de golpes durante a compactação da amostra.

$$\rho_d = \frac{100.M_h}{(100+w).V} \quad (4)$$

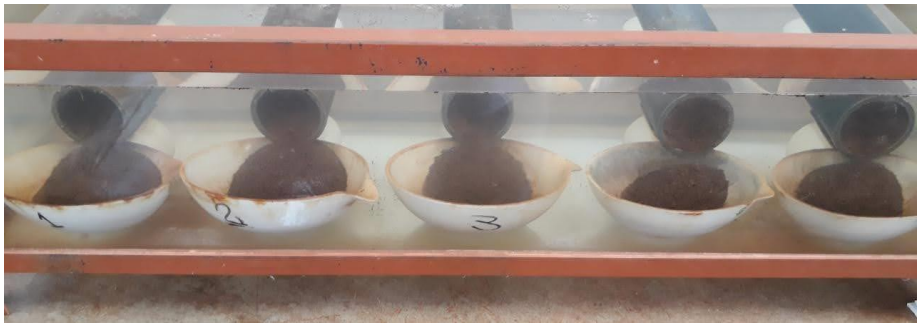
Onde:

- ρ_d: massa Específica Aparente Seca, em g/cm³;
- M_h: massa de solo úmido da porção compactada, em g;
- w: teor de umidade da porção compactada, em %;
- V: volume do corpo-de-prova, que é igual a área da seção interna do cilindro de molde multiplicada pela altura do CP, em cm³.

4.3.1.2 Perda de massa por imersão

O ensaio de perda de massa por imersão é uma das etapas para determinar o valor de e'. Uma porção do corpo-de-prova compactado é extrusada do cilindro e a amostra é imersa em água por 20 horas. No final do tempo de imersão, a porção desprendida do solo é seca e comparada com o volume extrusado. A Figura 13 mostra corpos-de-prova imersos em água durante o ensaio. A Equação 5 determina o valor da perda de massa por imersão (Pi) de cada amostra

Figura 13 - Ensaio de perda de massa por imersão.



Fonte: Autoria própria, 2023.

$$P_i = \frac{10.M_d.A}{M_s} \quad (5)$$

Sendo:

- P_i : perda de massa por imersão, em %;
- M_d: massa de solo seco desprendida do corpo de prova, em g;
- A: a altura do corpo de prova, em mm;
- M_s: a massa seca em estufa do corpo de prova, em g, expressa pela Equação 6:

$$M_s = \frac{100.M_u}{100 + w_c} \tag{6}$$

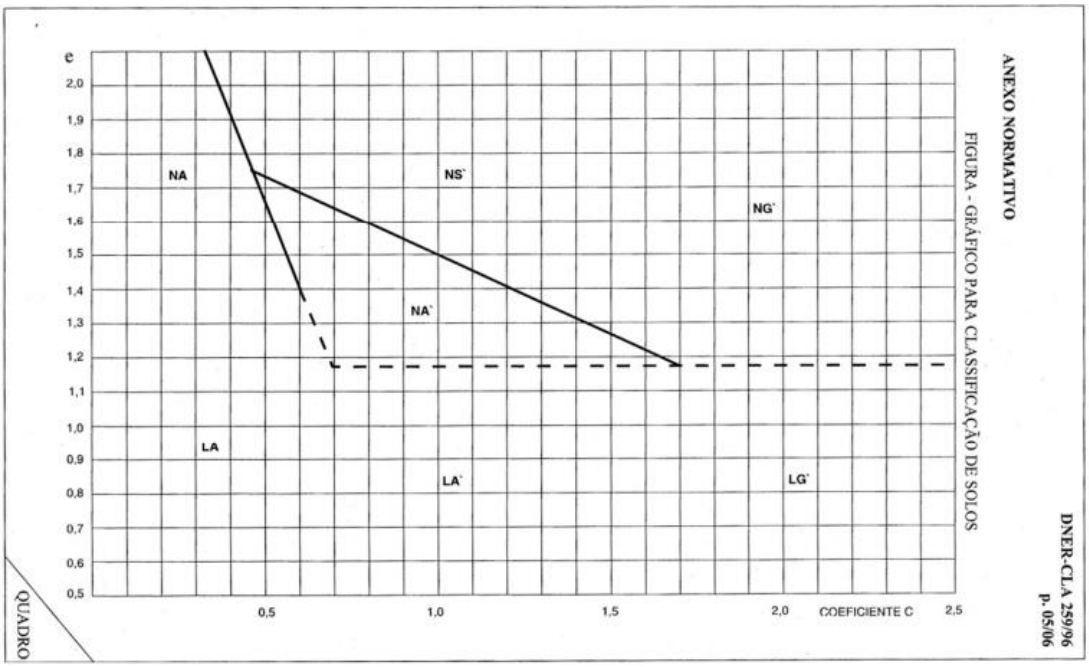
Sendo:

- M_u: massa de solo úmido do corpo de prova, em g;
- w_c: teor de umidade da compactação, em %.

Com os valores da perda de massa por imersão (Pi) e d' é possível calcular o valor do Índice de laterização (e') pela Equação 7. A classe do solo é indicada em ábaco, conforme a Figura 14, com base nos valores de e' e c'.

$$e' = \sqrt[3]{\frac{20}{d'} + \frac{P_i}{100}} \tag{7}$$

Figura 14 - Ábaco para a classificação MCT dos solos.



Fonte: DNER-CLA 259/96, 1996.

Sendo:

- L → laterítico;
- N → não laterítico;
- A → areia;
- A’ → arenoso;
- S’ → siltoso;
- G’ → argiloso.

4.3.1.3 Ensaio de compactação – Proctor

O ensaio de compactação do solo, também conhecido como Ensaio de Proctor, ilustrado na Figura 15, é um dos mais importantes procedimentos de estudo e controle de qualidade de aterros de solo no estado compactado. O ensaio foi desenvolvido pelo engenheiro Ralph Proctor em 1933 e é normatizado nos Estados Unidos pela A.A.S.H.O - American Association of State Highway Officials. No Brasil, a sua execução segue a norma ABNT NBR 7182/1986 - Ensaios de Compactação.

Figura 15 - Ensaio de compactação.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A energia específica de compactação pode ser classificada em três níveis: normal, intermediária, ou modificada, de acordo com o peso do soquete e o número de golpes e de camadas na amostra.

4.4 Determinação da massa específica solta

A massa específica solta do solo foi determinada em quatro conjuntos de corpos-de-prova com tamanhos, formas e materiais de fabricação diferentes. As amostras foram testadas com diferentes teores de umidades, de modo a traduzir condições encontráveis em campo durante as atividades de escavação e transporte dos materiais.

Para determinar a massa específica aparente solta, as amostras de solos foram previamente preparadas, umedecidas com teores determinados, homogeneizadas manualmente e estocadas por 24 horas. Este “repouso” visa melhorar a qualidade de integração dos materiais.

Os procedimentos para medir a massa específica solta (ρ) dos solos estão descritos nas normas NBR 7251 (1982) e NBR 16972 (2021). Como referência aos dados do ensaio de compactação, foram também calculadas as massas específicas soltas secas (ρd) em todos os ensaios.

Com a intenção de reproduzir condições operacionais em campo no momento da exploração (escavação e transporte), os solos foram testados também com diferentes teores de umidades, além da umidade natural. A escala de variação para os teores de umidades é a mesma adotada nos ensaios de compactação: de 6 a 18%.

Os moldes cúbicos com tamanhos normais e menores estão definidos na norma NBR 7251 (1982). Neste caso, os moldes foram construídos com madeira e metal. Esta norma, contudo, foi substituída pela NBR 16972 (2021), que recomenda molde cilíndrico. Como no caso anterior, foram empregados moldes cilíndricos com tamanhos diferentes (normal e menor). As formas cilíndricas foram construídas de PVC.

De modo complementar, foi conduzida uma investigação complementar envolvendo o uso de moldes metálicos e em formato cilíndrico. Estes moldes são os mesmos empregados nos ensaios de compactação Proctor e mini-Proctor.

A Figura 16 mostra os moldes de madeira e as suas dimensões respectivas. Na Figura 17 estão os moldes metálicos. Na Figura 18 os moldes cilíndricos de PVC, relativos à norma NBR 16972 (2021). Na Figura 19 estão ilustrados os cilindros metálicos empregados nos ensaios de compactação Proctor e mini-Proctor e adotados como moldes para medir massa específica solta de solos de comportamento laterítico.

Os moldes maiores (cúbicos de metal e de madeira) têm volumes de 20.480,00 cm³. O volume dos moldes menores equivale a 15.360,00 cm³. Os moldes cilíndricos têm volumes de 15.374,04 cm³ e 10.280,38 cm³, na condição de maior altura e menor altura, respectivamente. Os moldes para os ensaios Proctor e mini-Proctor têm volumes de 1.000 cm³ e 98,17 cm³, respectivamente.

Figura 16 - Moldes cúbicos de madeira.

MOLDE 1	DIMENSÕES
	Base : 32 cm Largura : 32 cm Altura 15 cm
	Base : 32 cm Largura : 32 cm Altura 20 cm

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 17 - Moldes cúbicos de metal

MOLDE 2	DIMENSÕES
	Base : 32 cm Largura : 32 cm Altura 15 cm
	Base : 32 cm Largura : 32 cm Altura 20 cm

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 18 - Moldes cilíndricos de PVC.

MOLDE 3	DIMENSÕES
	Diâmetro: 22,1 cm Altura 26,8 cm
	Diâmetro: 26,3 cm Altura 28,3 cm

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 19 - Moldes cilíndricos metálicos.

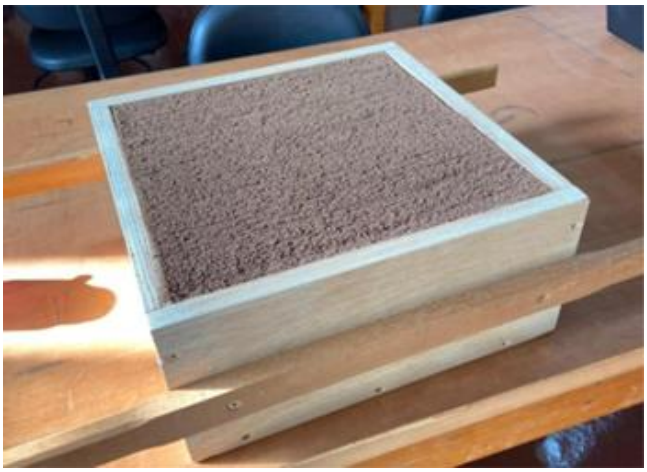
MOLDE 4	DIMENSÕES
	Diâmetro: 5,0 cm Altura 13,0 cm
	Diâmetro: 10 cm Altura 12 cm

Fonte: Autoria própria, 2023.

Os procedimentos para determinar a massa unitária do solo em estado solto estão descritos nas normas técnicas NBR 7251 (1982), NBR 16972 (2021), DNER-ME 152 (1995) e DNER-ME 153 (1997).

A Figura 20 mostra uma etapa do ensaio realizado no molde 1, em que o solo foi despejado com a altura de queda controlada, a fim de evitar inconsistências nos resultados. Depois, a massa de solo foi nivelada de modo a ocupar todo o volume do molde. O cálculo da massa específica solta é feito pela Equação 8.

Figura 20 - Molde de madeira, em ensaio para determinar a massa específica solta.



Fonte: Autoria própria, 2023.

$$\rho = \frac{M_s}{V_{CP}} \tag{8}$$

Sendo:

- ρ: massa específica solta, em g/cm³;
- M_s: massa solta, em g;
- V_{CP}: volume do corpo-de-prova, em cm³.

No experimento com os corpos-de-prova em cilindros Proctor, o cálculo da massa específica solta adotou também a Equação 8. A Figura 21 ilustra o procedimento experimental conduzido, seguindo as orientações prescritas para a altura de queda controlada e a preparação adequada do solo, garantindo o nivelamento da superfície para assegurar que o volume total do corpo de prova fosse devidamente preenchido.

Figura 21 - Procedimento de ensaio dos corpos de prova cilíndricos menores.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.5 Análise de dados

Para a análise de dados foi utilizado o método de regressão polinomial de terceira ordem. Regressão é um método estatístico que permite estudar a relação entre duas ou mais variáveis de interesse. A variável que se quer explicar ou prever é chamada de variável dependente ou resposta, e as variáveis que servem como base para essa explicação ou previsão são chamadas de variáveis independentes ou preditoras.

Existem diferentes tipos de regressão, dependendo da forma da relação entre as variáveis e da distribuição da variável dependente. Um dos tipos mais comuns é a regressão linear, que assume que a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes é uma função linear de alguns parâmetros. Por exemplo, se a variável dependente é y e as variáveis independentes são x_1e x_2, a regressão linear pode ter a forma (Equação 9):

$$y = \beta_0 + \beta_1 . x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon \quad (9)$$

Onde β_0, β_1 e β_2 são os parâmetros ou coeficientes da regressão, que indicam o efeito de cada variável independente sobre a variável dependente, e ϵ é o erro ou resíduo, que representa a parte da variabilidade de y que não é explicada pelas variáveis independentes.

A regressão linear pode ser usada para analisar dados e fazer previsões sobre a variável dependente, com base nos valores das variáveis independentes. Para isso, é preciso estimar os parâmetros da regressão, usando algum método como os mínimos quadrados ou o máxima verossimilhança, que buscam minimizar a diferença entre os valores observados e os valores previstos pela regressão. Depois de estimar os parâmetros, é possível testar hipóteses sobre eles, como se são diferentes de zero ou se têm algum valor específico, usando técnicas como o teste t ou o intervalo de confiança. Também é possível avaliar a qualidade do ajuste da regressão, usando medidas como o coeficiente de determinação ou o erro quadrático médio, que indicam o quanto a regressão explica a variabilidade da variável dependente.

Um caso particular de regressão linear é a regressão polinomial, que permite modelar relações não lineares entre as variáveis, usando potências das variáveis independentes como termos da regressão. Por exemplo, se a variável dependente é y e a variável independente é x, uma regressão polinomial do terceiro grau pode ter a forma (Equação 10):

$$y = \beta_0 + \beta_1.x + \beta_2.x_2 + \beta_3.x_3 + \epsilon \quad (10)$$

Onde β_0, β_1, β_2 e β_3 são os parâmetros da regressão, e ϵ é o erro. A regressão polinomial do terceiro grau pode capturar relações cúbicas entre as variáveis, que podem ser úteis para modelar fenômenos como o crescimento populacional, a curva de aprendizagem ou a elasticidade da demanda.

Para aplicar a regressão polinomial em uma análise de dados, é preciso seguir os mesmos passos da regressão linear, mas usando as potências da variável independente como termos da regressão. Ou seja, é preciso estimar os parâmetros da regressão, testar hipóteses sobre eles, e avaliar a qualidade do ajuste. Além disso, é preciso escolher o grau do polinômio que melhor se adapta aos dados, sem causar sobreajuste ou subajuste. O sobreajuste ocorre quando o polinômio é muito complexo e se adapta demais aos dados, perdendo a capacidade de generalizar para novos dados. O subajuste ocorre quando o polinômio é muito simples e não capta a relação entre as variáveis, tendo um baixo poder explicativo. Uma forma de escolher o grau do polinômio é usar o critério de informação de Akaike ou o critério de informação bayesiano, que penalizam a complexidade do modelo e buscam minimizar o erro de previsão.

Outro ponto de atenção para validar o modelo de regressão é a relação R^2, que é uma medida estatística que indica o quão bem um modelo de regressão se ajusta aos dados. O valor de R^2 varia entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1, melhor o modelo se ajusta aos dados. Para a regressão exponencial, o R^2 é calculado como a proporção da variação total da variável dependente que é explicada pela regressão exponencial. Em outras palavras, o R^2 mede a proporção da variação total da variável dependente que é explicada pela variação da variável independente.

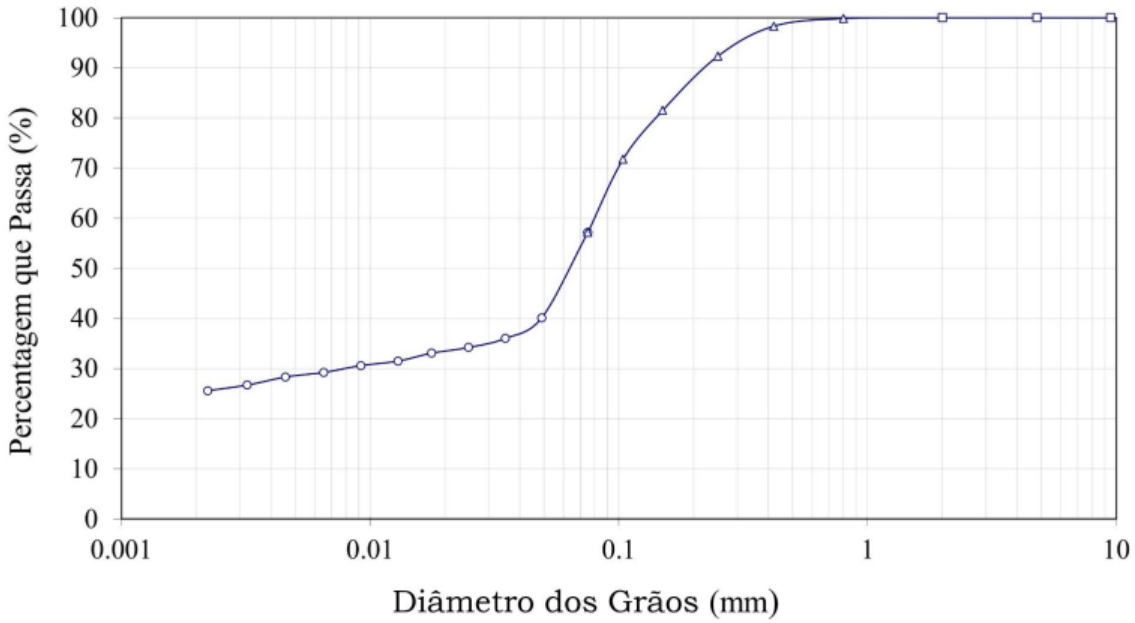
5 RESULTADOS

5.1 Classificação do solo

5.1.1 Classificação TRB (AASHTO)

O solo foi classificado de acordo com a classificação TRB. Primeiramente, foi realizado o ensaio de granulometria (NBR 7181:2016), cuja a curva obtida se encontra na Figura 22.

Figura 22 - Curva granulométrica do solo de comportamento laterítico.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Em sequência, o solo foi ensaiado para a obtenção dos parâmetros de limite de liquidez (NBR 6459:2016) e limite de plasticidade (NBR 7180:2016). Os resultados obtidos estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios para a classificação TRB.

Parâmetro		Valor
Peneira	# 10	0,08 g
	# 40	1,75 g
	# 200	35,64 g
Limite de liquidez (LL)		20,50%
Limite de plasticidade (LP)		16,98%
Índice de plasticidade (IP)		3,52%
Índice de grupo (IG)		4

Fonte: Autoria própria, 2023.

De acordo com os resultados obtidos, o solo em análise é A-4 (4).

5.1.2 Classificação MCT

As variáveis medidas para a classificação MCT do solo estão resumidas na Tabela 2. O ábaco da classificação está ilustrado na Figura 13.

Tabela 2 - Coeficiente obtidos para a classificação MCT.

Parâmetro	Valor
Coeficiente c’	1,25
Coeficiente d’ (kg/m^3)	77
Perda de massa por imersão (%)	50
Índice e’	0,912

Fonte: Autoria própria, 2023.

De acordo com os resultados obtidos, o solo da amostra pertence à classe MCT LA’ (Laterítico arenoso).

5.2 Ensaio de compactação

Com o ensaio de Proctor, foi possível obter a relação da massa específica aparente seca máxima do solo e o teor de umidade ótima (Tabela 3). Este são os parâmetros de controle e definem as condições ideais para os trabalhos em campo.

Tabela 3 – Parâmetros ótimos de compactação.

Parâmetro	Valor
Teor de umidade ótima (w_{ot}, %)	12,3
Massa específica aparente seca máxima (ρ_d max, g/cm³)	1,954

Fonte: Autoria própria, 2023.

5.3 Massa específica aparente solta

As Tabelas 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 resumem os resultados das medidas de massa específica aparente solta para o solo de comportamento laterítico. Também foram gerados gráficos, para melhor analisar o comportamento do solo. Em todos os casos, w indica o teor de umidade do material, M refere-se à massa de material para o volume do molde, V indica o volume do molde em ensaio, ρ corresponde à massa específica aparente solta do solo e ρ_d a massa específica aparente solta seca do solo.

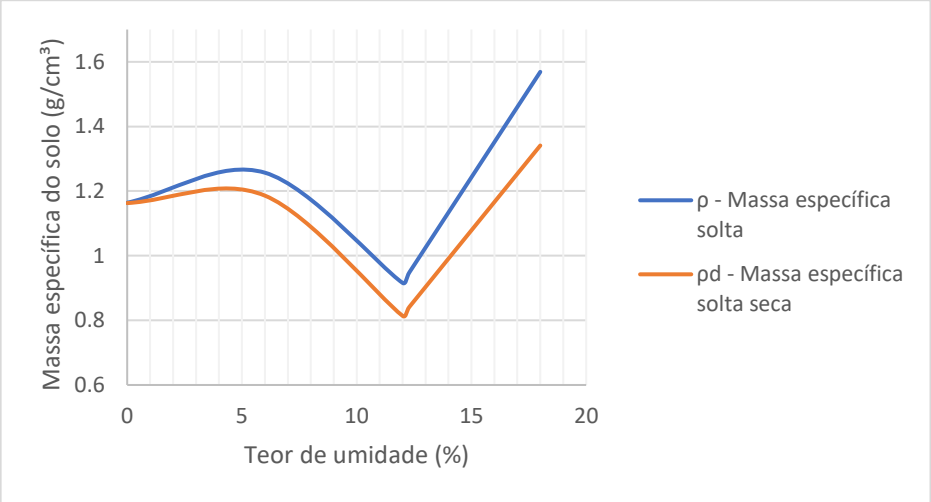
As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os dados da massa específica aparente solta e seca do solo analisado nos moldes de madeira, de metal e PVC de tamanhos reduzidos, inclui o molde mini-Proctor. Os gráficos das Figura 23, 24, 25, e 26 ilustram a relação do comportamento do solo, levando em consideração a massa específica aparente solta e a massa específica aparente solta seca da amostra.

Tabela 4 - Massa específica aparente solta para o molde menor de madeira.

w (%)	M (g)	V (cm³)	ρ (g/cm³)	ρd (g/cm³)
0	17865,7	15360	1,164	1,163
6	19317,2	15360	1,257	1,186
12	14001,433	15360	0,916	0,814
12,3	14516,577	15360	0,949	0,842
18	24304,3	15360	1,569	1,341

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 23 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de madeira menor.



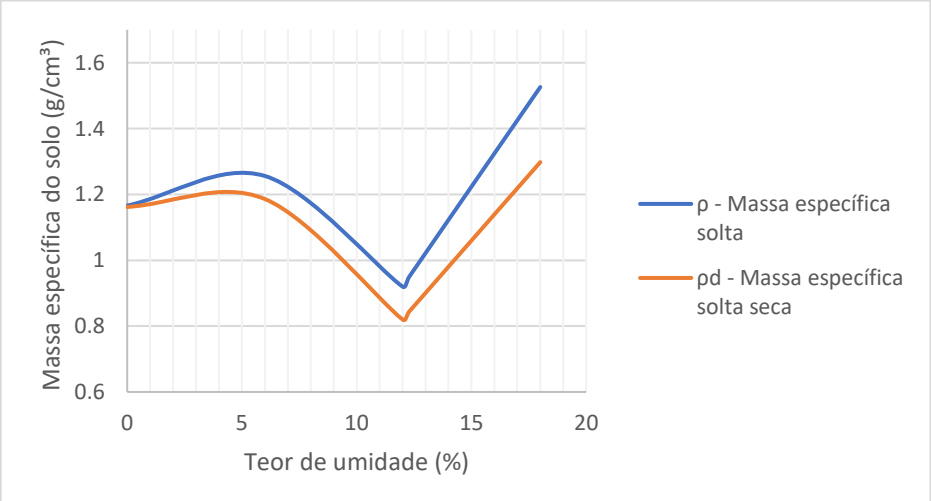
Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 5 - Massa específica aparente solta para o molde de metal menor.

w (%)	M (g)	V (cm³)	ρ (g/cm³)	ρd (g/cm³)
0	17848,633	15360	1,166	1,162
6	19310,633	15360	1,256	1,186
12	14108,7	15360	0,92	0,82
12,3	14579,692	15360	0,951	0,845
18	23528,533	15360	1,526	1,298

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 24 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de metal menor.



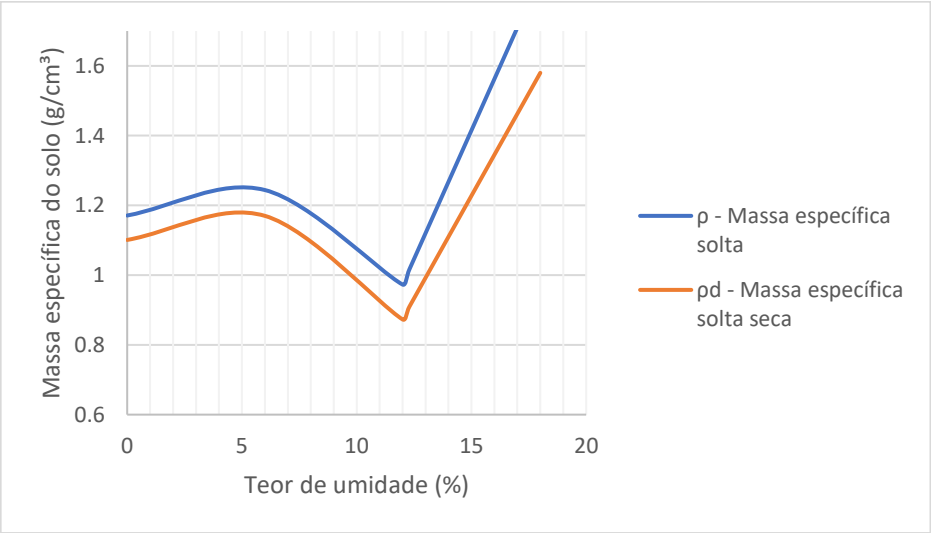
Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 6 - Massa específica aparente solta para o molde de PVC menor.

w (%)	M (g)	V (cm³)	ρ (g/cm³)	ρd (g/cm³)
0	11317,267	10280,381	1,171	1,101
6	12752,433	10280,381	1,244	1,17
12	10055,3	10280,381	0,973	0,873
12,3	10510,982	10280,381	1,017	0,91
18	19168,933	10280,381	1,857	1,58

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 25 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de PVC menor.



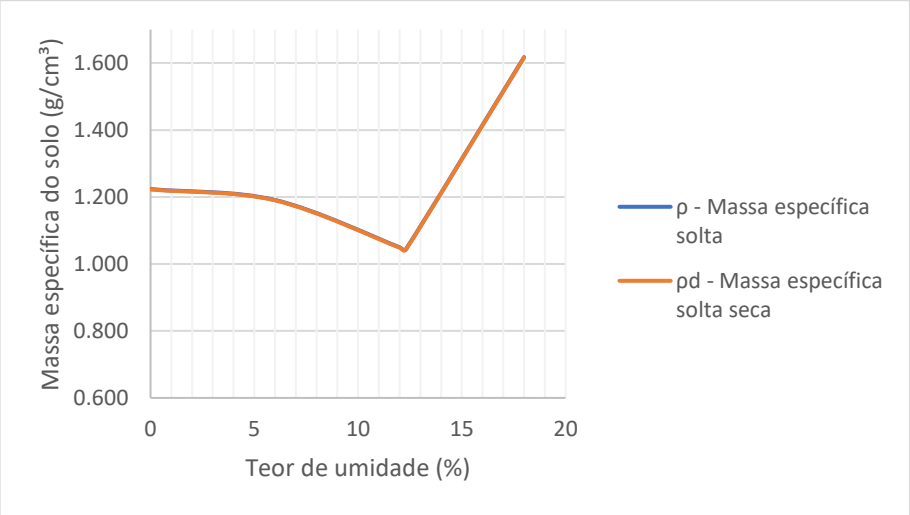
Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 7 - Massa específica solta para o molde mini-Proctor.

w (%)	M (g)	V (cm³)	ρ (g/cm³)	ρd (g/cm³)
0	289,170	225,254	1,284	1,279
6	309,800	225,254	1,375	1,371
12	206,000	225,254	0,915	0,910
12,3	212,184	225,254	0,942	0,937
18	329,670	225,254	1,464	1,458

Fonte: Autoria própria, 2023.

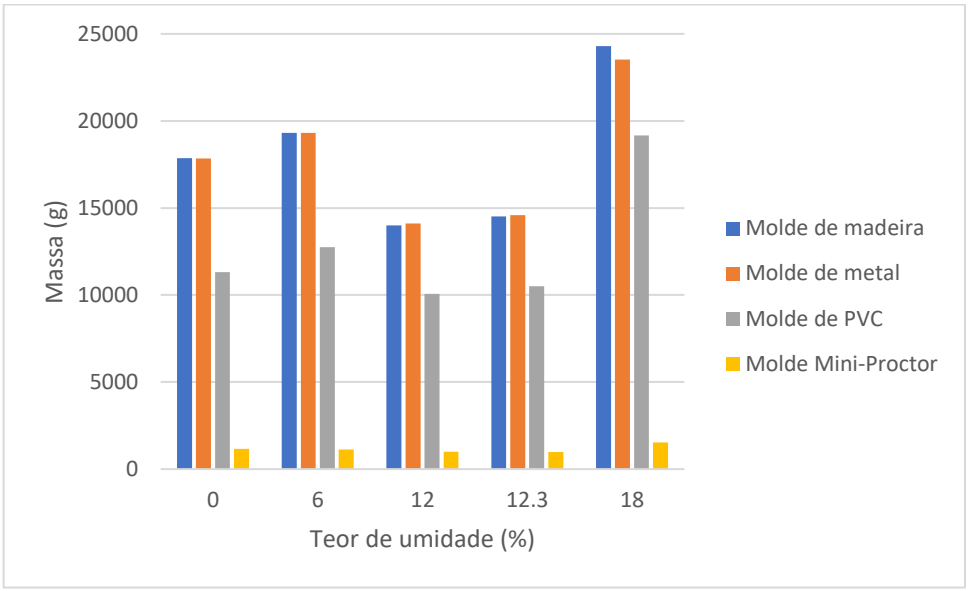
Figura 26 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde mini-Proctor.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O gráfico da Figura 26 ilustra as massas de solo de comportamento laterítico empregadas nos diferentes moldes com as menores dimensões.

Figura 27 - Massa total dos solos em moldes com dimensões reduzidas.



Fonte: Autoria própria, 2023.

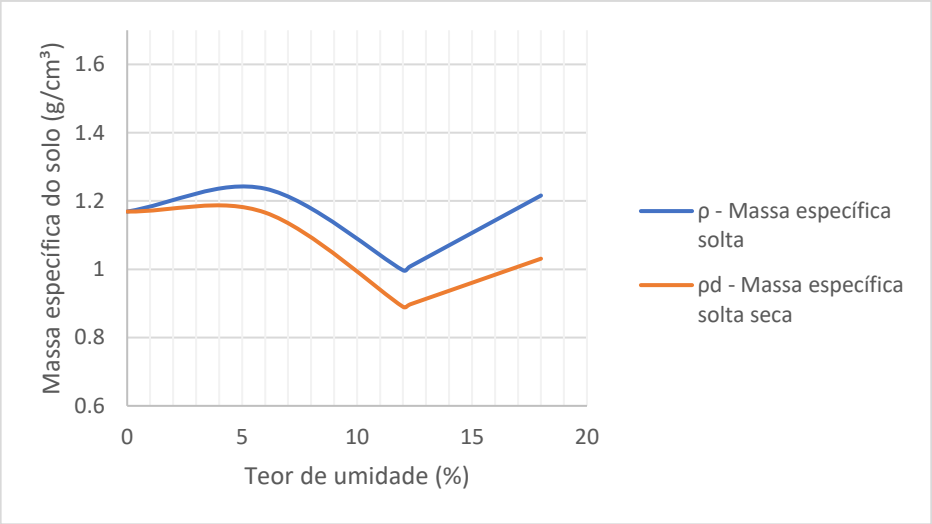
A mesma sequência anterior foi replicada na segunda série de ensaios, porém com os moldes com as dimensões maiores. As Tabelas 8, 9, 10 e 11 resumem os resultados medidos nesta etapa, e os gráficos das Figura 28, 29, 30, e 31 ilustram a relação entre a massa específica aparente solta e a massa específica aparente solta seca do solo laterítico, de acordo com o tipo de molde utilizado.

Tabela 8 - Massa específica aparente solta para o molde de madeira maior.

w (%)	M (g)	V (cm³)	ρ (g/cm³)	ρd (g/cm³)
0	23948,3	20480	1,169	1,169
6	25309,133	20480	1,236	1,166
12	20411,9	20480	0,997	0,89
12,3	20636,945	20480	1,008	0,897
18	24912,8	20480	1,216	1,031

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 28 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de madeira maior.



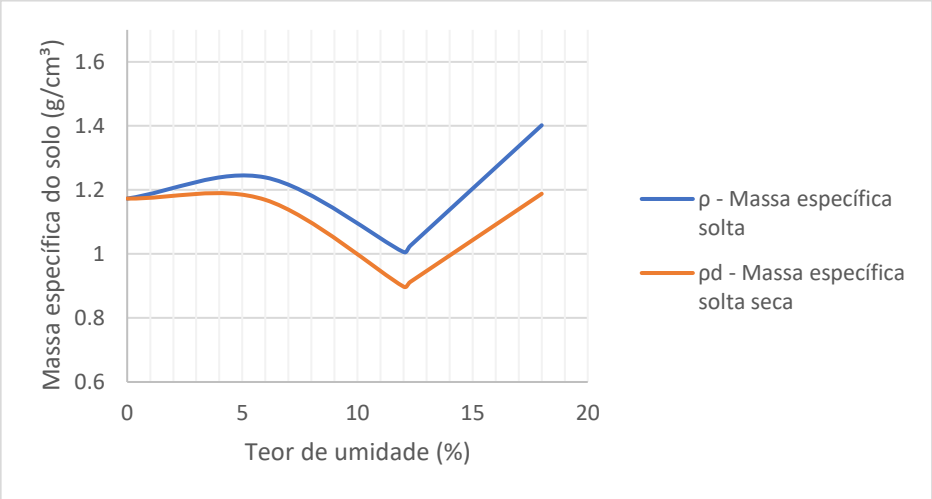
Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 9 - Massa específica aparente solta para o molde de metal maior.

w (%)	M (g)	V (cm³)	ρ (g/cm³)	ρd (g/cm³)
0	24032,333	20480	1,173	1,173
6	25384,6	20480	1,239	1,169
12	20596,733	20480	1,006	0,898
12,3	21002,922	20480	1,026	0,913
18	28720,5	20480	1,402	1,188

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 29 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de metal maior.



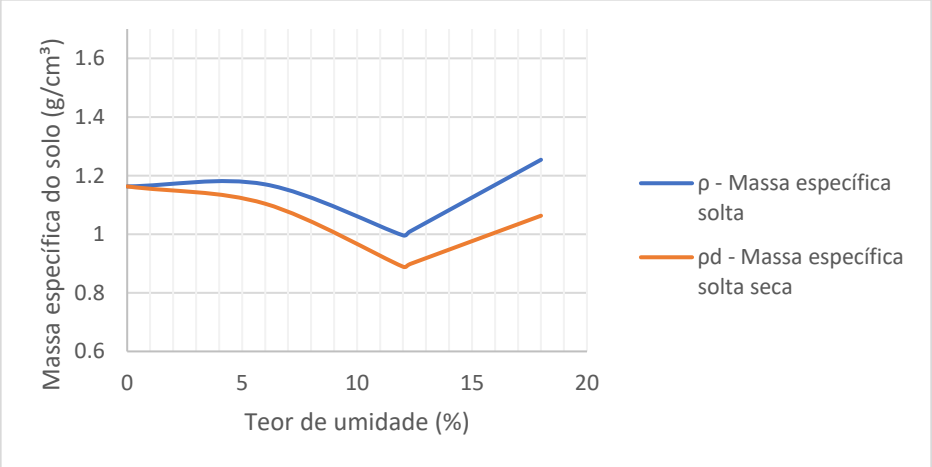
Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 10 - Massa específica aparente solta para o molde de PVC maior.

w (%)	M (g)	V (cm³)	ρ (g/cm³)	ρd (g/cm³)
0	17886,433	15374,033	1,163	1,163
6	17984,533	15374,033	1,17	1,104
12	15306,667	15374,033	0,996	0,889
12,3	15505,528	15374,033	1,009	0,898
18	19283,9	15374,033	1,254	1,063

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 30 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde de PVC maior.



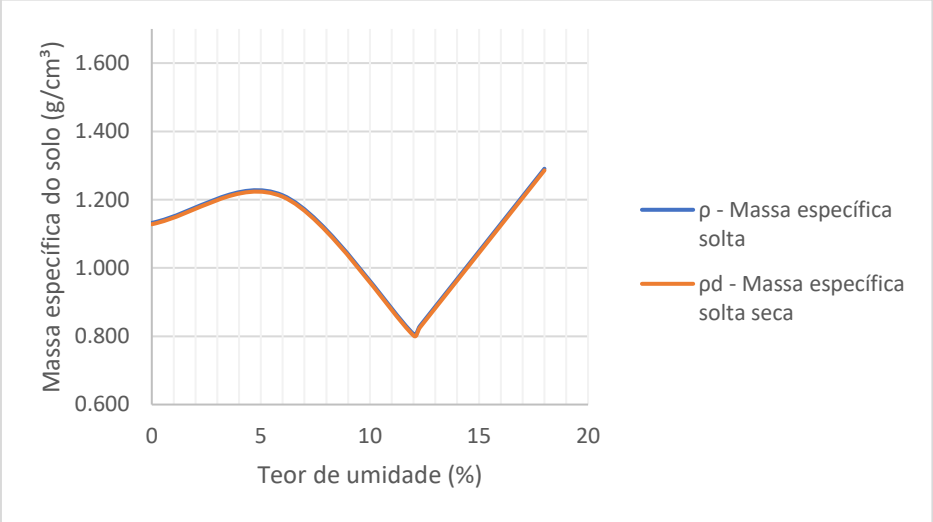
Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 11 - Massa específica aparente solta para o molde de Proctor.

w (%)	M (g)	V (cm^3)	ρ (g/cm^3)	ρd (g/cm^3)
0	1156,350	945,000	1,224	1,223
6	1125,530	945,000	1,191	1,190
12	992,150	945,000	1,050	1,049
12,3	986,225	945,000	1,044	1,042
18	1528,649	945,000	1,618	1,616

Fonte: Autoria própria, 2023.

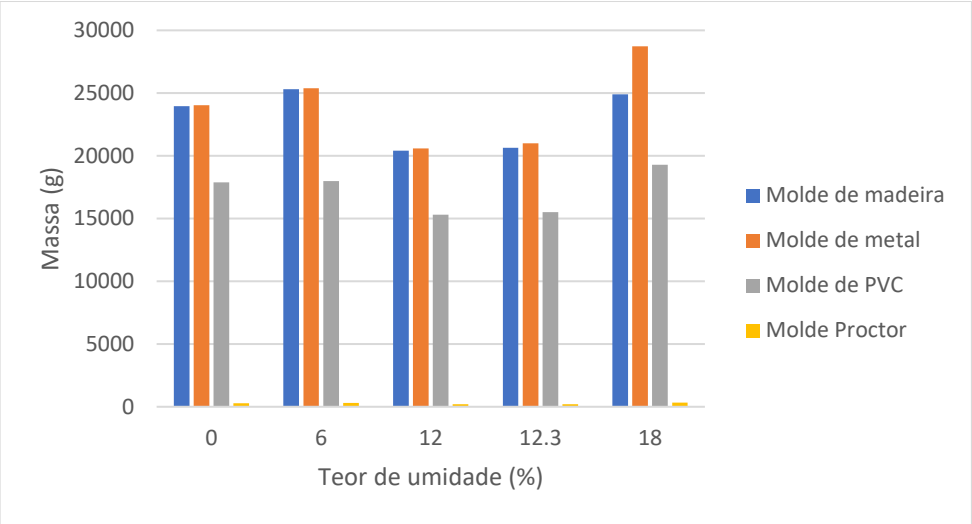
Figura 31 - Massa específica solta e seca versus teor de umidade: molde Proctor.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A Figura 32 ilustra as massas de solo de comportamento laterítico empregadas nos diferentes moldes com as menores dimensões.

Figura 32 - Massa total dos solos em moldes com dimensões maiores.



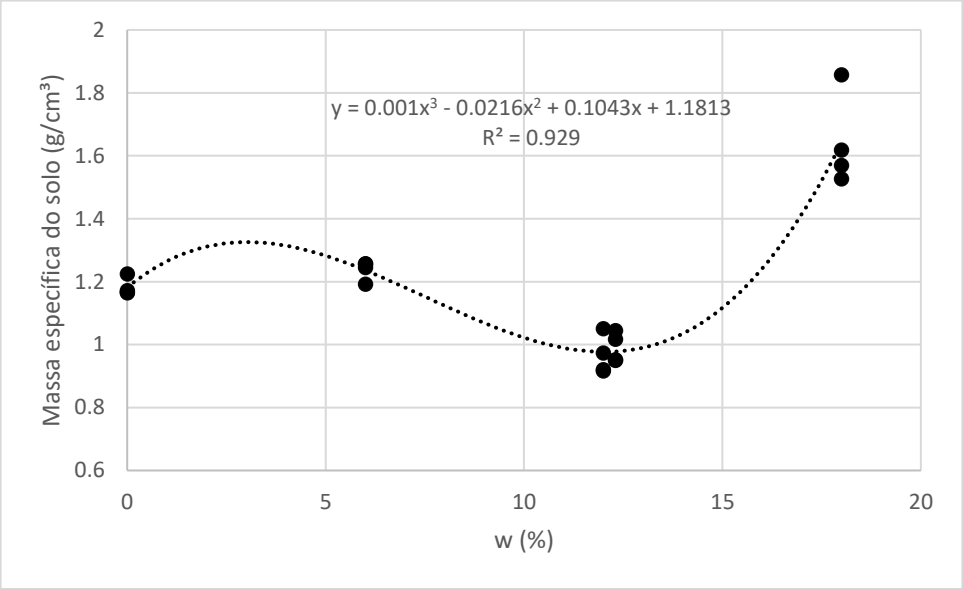
Fonte: Autoria própria, 2023.

6 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS DADOS

A fim de obter melhor precisão, cada sequência de ensaio foi repetida três vezes e com altura de queda controlada. Para mitigar inconsistências nos resultados, os dados foram tratados com média simples entre cada porcentagem de umidade ensaiada em cada molde, gerando assim os resultados apresentados nas Tabelas 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11.

O modelo de regressão linear utilizada para a análise foi o polinomial, de acordo com a Equação 10. A Figura 33 representa graficamente a análise de regressão da massa específica aparente solta para os moldes da configuração menor, variando o teor de umidade do solo.

Figura 33 - Curva de regressão dos dados para os moldes menores.



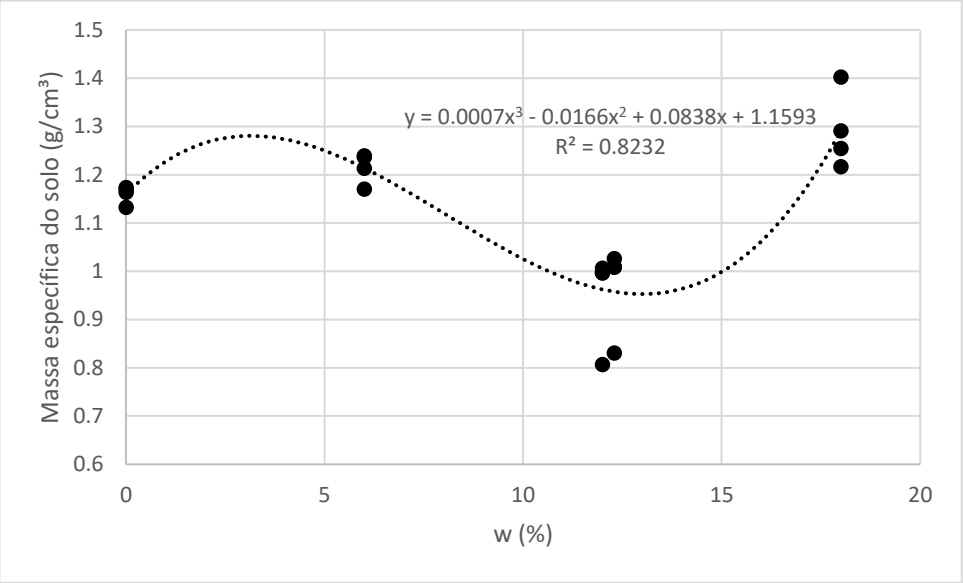
Fonte: Autoria própria, 2023.

Após a obtenção dos dados relativos a cada ciclo de ensaio empregando os moldes de menor escala, tornou-se viável proceder à análise de confiabilidade dos dados. A equação que descreve a curva resultante, conforme determinado pelo modelo de regressão polinomial é expressa na equação 10 e visualmente representada pela Figura 34. Uma vez estabelecida a curva, sua dinâmica é caracterizada pela formulação matemática presente na equação 11, com um coeficiente de ajuste de 0,929.

$$y = -0{,}0001x^3 - 0{,}0216x^2 + 0{,}1043x + 1{,}1813 \qquad (11)$$
$$R^2 = 0{,}929$$

A Figura 33 representa a análise de regressão da massa específica solta para os moldes maiores, variando o teor de umidade do solo.

Figura 34 - Curva de regressão dos dados para os moldes maiores.



Fonte: Autoria própria, 2023.

De forma análoga ao procedimento de análise adotado para os moldes de menor dimensão, empregou-se a mesma metodologia na avaliação dos dados provenientes dos ensaios realizados com os moldes de maiores proporções. Mediante a aplicação da análise de confiabilidade sobre os dados obtidos, constatou-se igualmente um padrão comportamental de natureza polinomial, o qual é descrito pela equação 12, exibindo um coeficiente de ajuste de 0,8232.

$$y = -0{,}0007x^3 - 0{,}0166x^2 + 0{,}0838x + 1{,}1593 \quad (12)$$

$$R^2 = 0{,}8232$$

7 CONCLUSÃO

É possível medir a massa específica aparente solta de solos de comportamento laterítico empregando moldes com diferentes formas, tamanhos e materiais.

A variações do teor de umidade dos materiais durante os ensaios importa nos resultados. Significa que o seu manejo em campo (extração, carregamento e transporte) também são influenciados pelo teor de umidade.

Uma possibilidade viável para a medição da massa específica aparente solta é adotar os cilindros tradicionais de compactação, de proctor e mini-Proctor. Isso se dá devido à semelhança no comportamento das curvas que descrevem a massa específica solta, que seguem padrões análogos e em conformidade com os requisitos estabelecidos pelos ensaios normativos.

Durante os ensaios, observou-se que os moldes de Proctor e mini-Proctor foram os mais adequados para a realização das medições. Os moldes dos ensaios de compactação requerem menor volume de material em relação aos demais moldes utilizados, e preservaram a qualidade dos dados. Cabe destacar que, mesmo com a substituição da norma, foram testados moldes com formatos cúbicos a fim de verificar a melhor alternativa para os propósitos do estudo em questão.

Os dados obtidos nos ensaios de massa específica aparente solta foram analisados utilizando regressão polinomial. O coeficiente de determinação R^2 foi utilizado para avaliar a confiabilidade dos resultados, obtendo confiabilidade de 93% para os moldes menores e de 82% para os moldes maiores. Tais relações revelam boa confiabilidade entre os resultados obtidos entre a relação da variação da umidade em cada análise da massa específica solta do material.

Quanto ao comportamento do solo em relação à variação do teor de umidade, observa-se que a massa específica aparente solta (ρ) do material aumentou conforme aumentou o teor de umidade, diminuiu na umidade ótima e voltou a aumentar. Um dado que pode explicar tal condição está relacionado à compactação pelo peso próprio do material durante o ensaio. A primeira camada de material solto recebe o peso das demais camadas, resultando em compactação pelo próprio peso do material, mesmo preservando as rotinas de preenchimento dos moldes

A massa específica aparente dos solos manteve comportamento similar em todas as configurações de ensaios. Isso é justificado porque o solo de comportamento laterítico apresenta características uniformes. A tendência é que os ensaios se repliquem e mesmo que os valores alterem, o gráfico mantém a mesma configuração.

No teor de umidade igual a 12,3%, a massa específica aparente do solo ficou muito próxima à da massa específica da água. Desta forma, pode-se sugerir que quase todo o volume nas caixas foi preenchido pelo solo com esse teor de umidade, que corresponde ao teor de umidade ótima do material laterítico.

Por fim, observa-se que o comportamento das curvas para os solos no estado solto é similar à curva de controle de umidade na relação entre o mini-MCV versus teor de umidade, na sistemática de classificação MCT. Ambas têm concavidade voltada para baixo no caso dos solos de comportamento laterítico.

A análise dos resultados permite observar e compreender a variação da massa específica solta dos solos resultante do empolamento e da variação do teor de umidade. Esta análise pode contribuir para o planejamento das atividades de exploração e determinar com precisão o número de viagens para movimentar grandes volumes de solos até o local da obra. Este planejamento implica diretamente nos custos e nos impactos ambientais da obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. **Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes**. Norma D-3282. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 3p.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al*. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2006. 507 p

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. CNT. Boletins estatísticos. Boletim Unificado – fevereiro de 2022. Brasília: CNT, 2022. 34p.

CRAIG, Robert F. **Mecânica dos solos**. Tradução de: Craig's soil mechanics, 7th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 365 p.

DAS, Braja M.; Sobhan, Khaled. **Principles of Geotechnical Engineering**, 9th ed. Boston: Cengage Learning, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 258/94**: Solos compactados com equipamento miniatura – Mini-MCV. Brasília: DNER, 1994. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 256/94**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Brasília: DNER, 1994. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 152/95**: Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Brasília: DNER, 1995. 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 153/97**: Agregado em estado solto seco – determinação da massa específica aparente. Brasília: DNER, 1997. 4p.

ESPINDOLA, Carlos Roberto; DANIEL, Luiz Antônio. **Laterita e solos lateríticos no Brasil**. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: < http://bt.fatecsp.br/system/articles/724/original/004.pdf >. Acesso em: 05 nov. 2022.

HOLDZ, R. D.; Kovacs, W. D. **Introduction to Geotechnical Engineering**. 2nd ed. New York: Pearson. 2010.

LAMBE, T. W.; Whitman, R. V. **Soil Mechanics**. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LIMA, Valmiqui Costa; LIMA, Marcelo Ricardo de**. O solo no meio ambiente:** Abordagem para Professores do Ensino Fundamental e Médio e Alunos do Ensino Médio. Paraná, 2019. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/67899>. Acesso em: 28 ago. 2023.

NETO, José Pereira de Queiroz. **Pedologia:** conceito, método e aplicações. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47088>. Acesso em: 18 ago. 2023.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentos econômicos:** tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Os Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação.** In: 18° REUNIÂO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Porto alegre: Anais, 1983. 463-484p.

PINTO, C; S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997.

SARTORE, Natália. **O que é perfil do solo e como construir?** 2022. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-perfil-do-solo/. Acesso em: 29 nov. 2023.

ANEXOS

Anexo 1 – Resultados do ensaio de granulometria conjunta

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

ENSAIO DE GRANULOMETRIA CONJUNTA

Classificação: Solo laterítico arenoso.	
	Amostra: SOLO TORRE
Profundidade: (m)	Data: 2023
Local: Ilha Solteira - SP	Operador Gabriel Souza Lopes

SEDIMENTAÇÃO

Umidade %	
Cápsula	240
(S + A + T) (g)	56.00
(S + T) (g)	55.38
(S) (g)	30.83
(A) (g)	0.62
(T) (g)	24.55
w (%)	2.0

Dados Gerais	
Solo Umido (g):	71.80
Solo Seco (g):	70.38
ρs (g/cm^3) :	2.67
Solo Seco Retido - # 200 (g):	30.15
Densímetro:	1
Defloculante:	Hexametafosfato de Sódio
Am total sêca (grosso)	70.38

T (°C)	Tempo (min)	Leitura	Correção	Leitura Corrig.	Viscosid. μ x(10^4)	ρw (g/cm^3)	Alt. Queda (cm)	Diâmetro ϕ (mm)	Porc. %
				0.00				**0.075**	57.16
25.5	1	20.0	-2.3	17.70	8.92	0.9968	14.7	0.0490	40.13
25.5	2	18.2	-2.3	15.90	8.92	0.9968	15.0	0.0350	36.05
25.5	4	17.4	-2.3	15.10	8.92	0.9968	15.2	0.0249	34.23
25.5	8	16.9	-2.3	14.60	8.92	0.9968	15.3	0.0177	33.10
25.5	15	16.2	-2.3	13.90	8.92	0.9968	15.4	0.0129	31.51
25.5	30	15.8	-2.3	13.50	8.92	0.9968	15.5	0.0092	30.61
26.0	60	15.1	-2.2	12.90	8.92	0.9968	15.6	0.0065	29.25
26.5	120	14.5	-2.0	12.50	8.72	0.9965	15.7	0.0046	28.33
28.0	240	13.5	-1.7	11.80	8.52	0.9963	15.8	0.0032	26.74
29.5	480	12.6	-1.3	11.30	8.16	0.9957	15.9	0.0022	25.60

PENEIRAMENTO

Peneiramento Grosso

Peneira Nº	Diâmetro ϕ (mm)	Massa Retida	Porc. % < ϕ
	50	0.00	100.0
	38	0.00	100.0
	25	0.00	100.0
	19	0.00	100.0
	13.5	0.00	100.0
	9.5	0.00	100.0
4	4.8	0.00	100.0
10	2.0	0.00	100.0

Peneiramento Fino

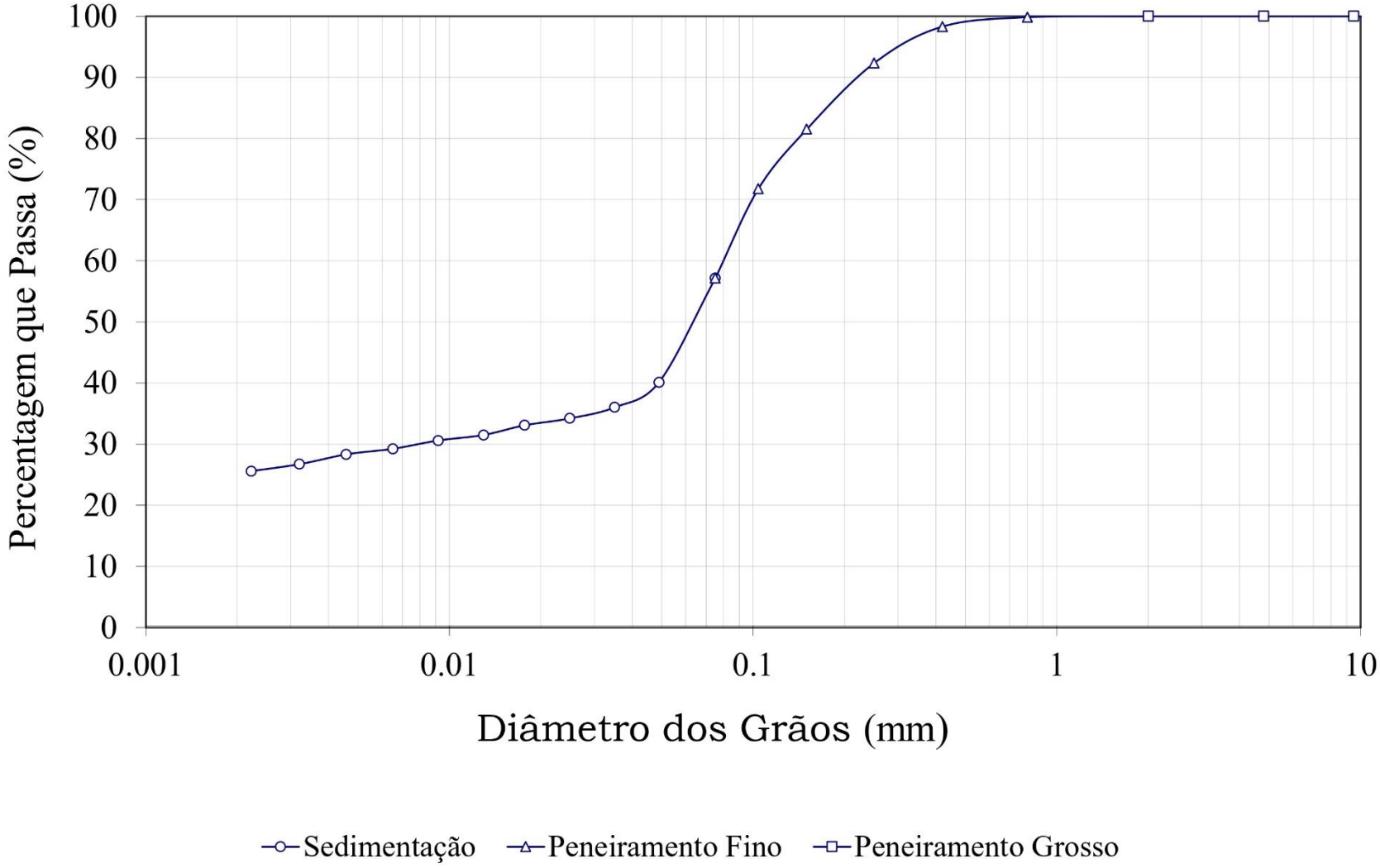
Peneira Nº	Diâmetro ϕ (mm)	Massa Retida	Porc. % < ϕ
10	**2.0**	**0.00**	**100.0**
20	0.800	0.12	99.8
40	0.420	1.20	98.3
60	0.250	5.40	92.3
100	0.150	13.01	81.5
140	0.104	19.86	71.8
200	0.075	30.15	57.2
Prato	-		

Fração	Intervalo de Diâmetros - mm		Peneiras
Pedregulho	4,8 < ϕ < 76	Grosso : 19 < ϕ <76	
		Fino: 4,8 < ϕ < 19	
Areia	0,05 < ϕ < 4,8	Grossa: 2,0 < ϕ <4,8	#10 #4
		Média: 0,42 < ϕ < 2,0	#40 #10
		Fina: 0,05 < ϕ < 0,42	#270 #40
Silte	0,005 < ϕ < 0,05	-	-
Argila	ϕ < 0,005	-	-

Porcentagem de Ocorrência		
Fração	**Subdivisão**	**(%)**
Pedregulho	-	0.0
Areia	Grossa	0.0
	Média	1.7
	Fina	57.2
Silte	-	11.5
Argila	-	29.6

Fonte: Autoria própria, 2023.

Anexo 2 -Curva granulométrica do solo.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Anexo 3 – Resultados do ensaio dos limites de Attemberg.

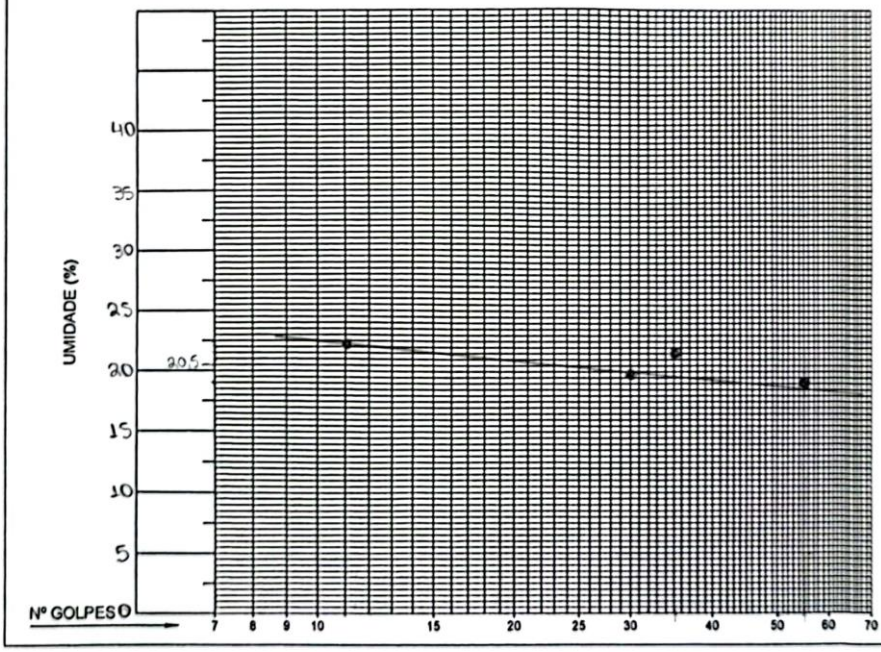
UNESP - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
Departamento de Engenharia Civil
Laboratório de Pavimentação
Professor Jairo
Técnico Mário

Trabalho
Amostra
Interessado
Local
Data: / /

Ensaios de Limites de Atterberg

LIMITE DE LIQUIDEZ

Recipiente nº	calc./auferir	u.m.	80	13	58	89		
1 Amostra + tara + água	pesar	g	20,01	23,14	15,05	15,52		
2 Amostra + tara	pesar	g	18,33	21,64	14,19	14,20		
3 Água	1 - 2	g	1,71	1,50	0,86	0,96		
4 Tara	pesar	g	9,24	14,06	10,18	10,24		
5 Amostra seca	2 - 4	g	9,09	7,58	4,01	4,32		
6 Teor de umidade (W)	(3 / 5) x 100	%	18,81	19,79	21,45	22,22		
7 Número de golpes	ensaiar	n	55	20	35	14		



LIMITE DE PLASTICIDADE

Recipiente nº	calc./auferir	u.m.	84	47	10	21		
1 Amostra + tara + água	pesar	g	11,40	14,02	15,74	16,03		
2 Amostra + tara	pesar	g	11,27	13,79	15,54	15,81		
3 Água	1 - 2	g	0,13	0,23	0,20	0,22		
4 Tara	pesar	g	10,42	12,36	14,46	14,59		
5 Amostra seca	2 - 4	g	0,85	1,43	1,08	1,23		
6 Umidade (W)	(3 / 5) x 100	%	15,29	16,08	18,52	18,03		

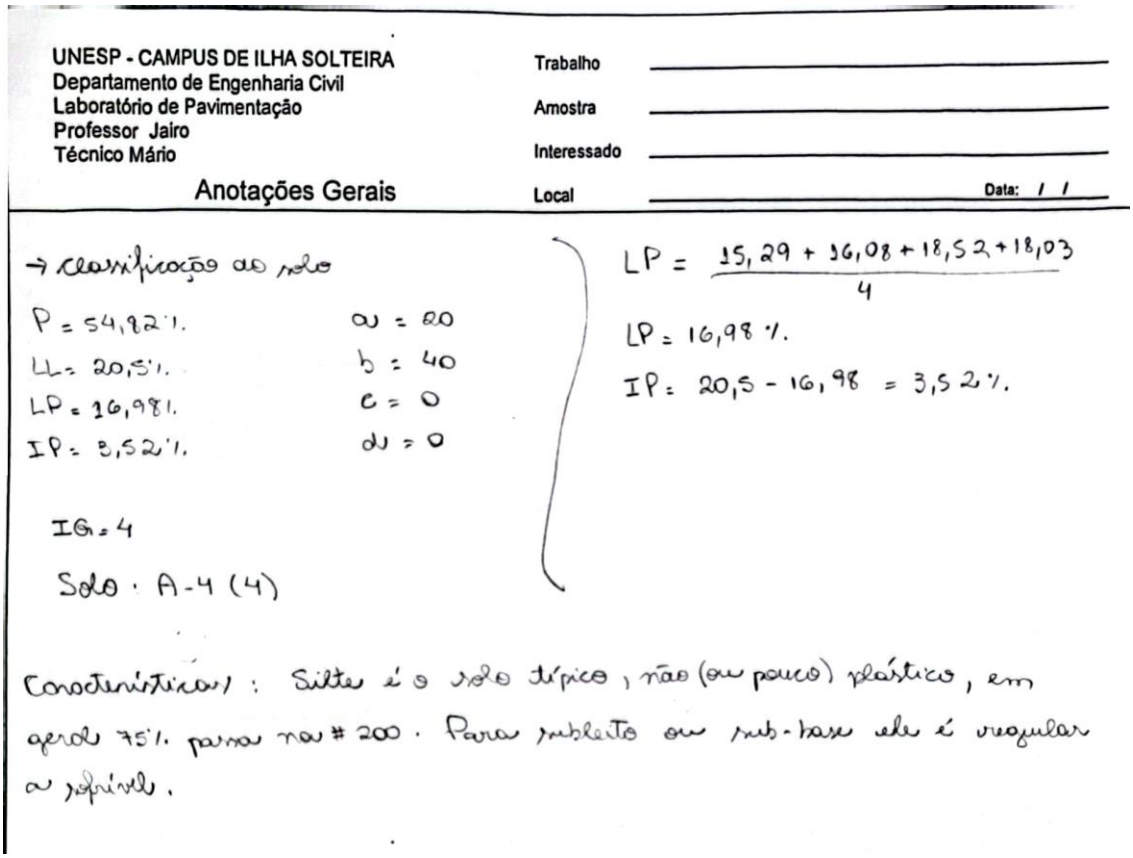
RESULTADOS

1 LIMITE DE LIQUIDEZ	W p/ 25 golpes	%	20,50
2 LIMITE DE PLASTICIDADE	W p/ rol 3mm	%	16,99
3 ÍNDICE DE PLASTICIDADE	1 - 2	%	3,52
4 ÍNDICE DE ESCOAMENTO	W/Δlg N	%	
5 ÍNDICE DE TENACIDADE	3 / 4	%	

Observações:

Fonte: Autoria própria, 2023.

Anexo 4 - Classificação TRB.



UNESP - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
Departamento de Engenharia Civil
Laboratório de Pavimentação
Professor Jairo
Técnico Mário

Trabalho
Amostra
Interessado
Local
Data: / /

Anotações Gerais

→ classificação do solo

P = 54,82 %.
LL = 20,5 %.
LP = 16,98 %.
IP = 3,52 %.

a = 20
b = 40
c = 0
d = 0

IG = 4

Solo · A-4 (4)

$LP = \frac{15,29 + 16,08 + 18,52 + 18,03}{4}$

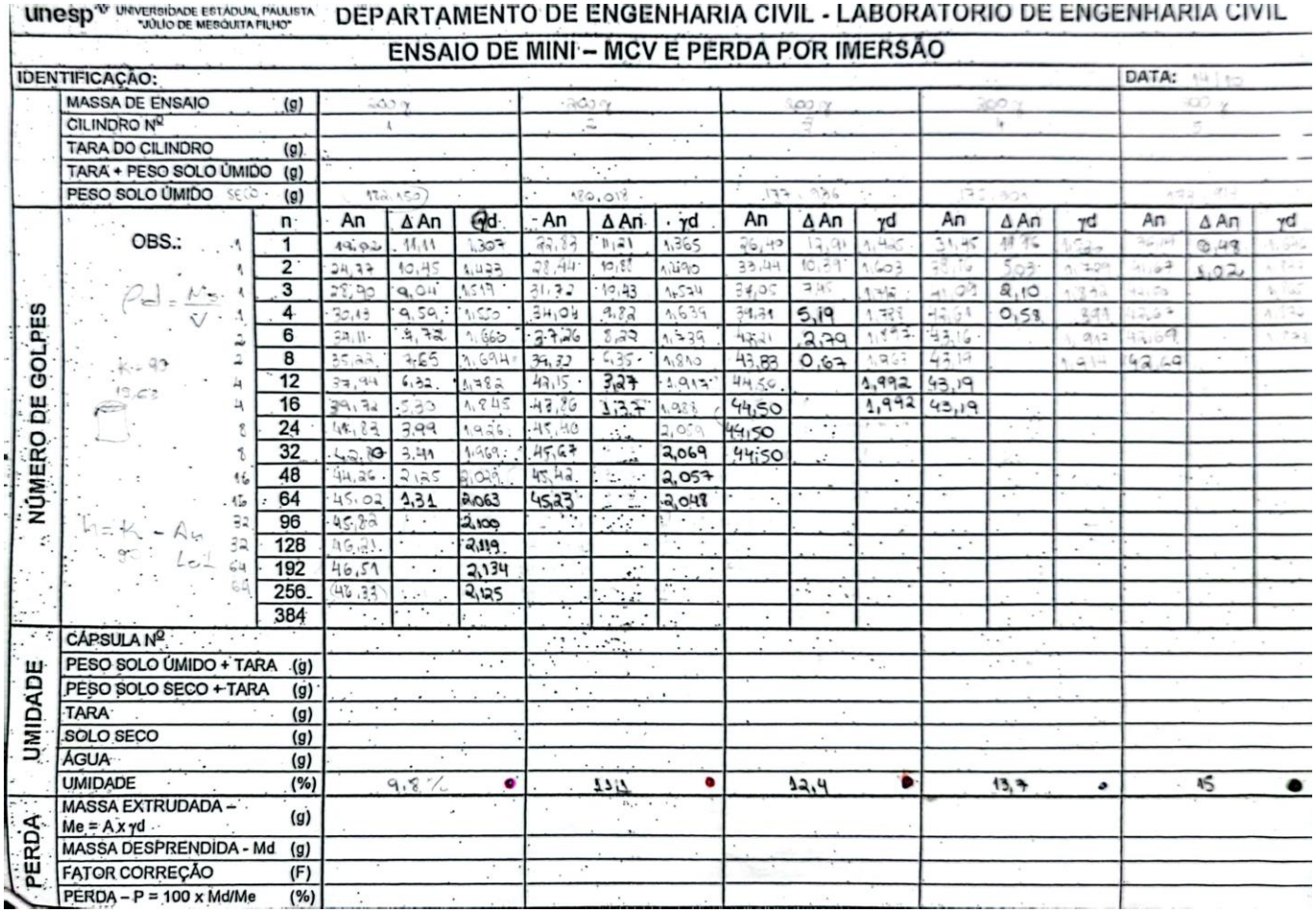
LP = 16,98 %.

IP = 20,5 - 16,98 = 3,52 %.

Características: Silte é o solo típico, não (ou pouco) plástico, em geral 75% ou mais # 200. Para subleito ou sub-base ele é regular a sofrível.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Anexo 5 – Resultados do ensaio de Mini-MCV e perda por imersão.



unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" — DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL

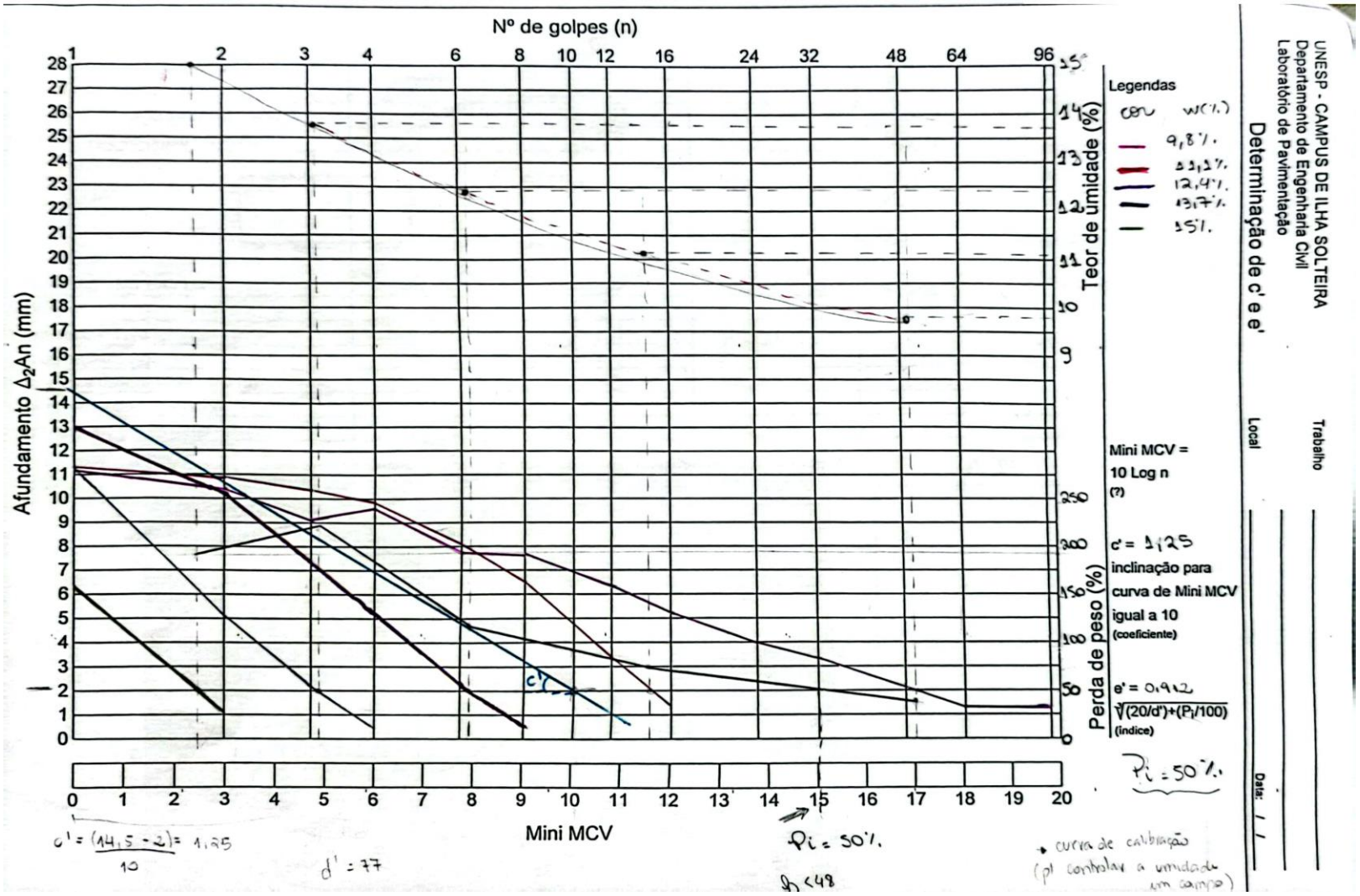
ENSAIO DE MINI – MCV E PERDA POR IMERSÃO

IDENTIFICAÇÃO: — DATA:

MASSA DE ENSAIO (g)																	
CILINDRO Nº																	
TARA DO CILINDRO (g)																	
TARA + PESO SOLO ÚMIDO (g)																	
PESO SOLO ÚMIDO (g)																	
NÚMERO DE GOLPES	n	An	Δ An	γd	An	Δ An	γd	An	Δ An	γd	An	Δ An	γd	An	Δ An	γd
OBS.:	1	19,92	11,11	1,307	29,83	11,21	1,365	36,42	12,71	1,445	31,45	11,96				
	2	24,77	10,45	1,427	28,44	10,81	1,490	33,44	10,29	1,603	33,16	5,03				
	3	28,90	9,01	1,519	31,72	10,43	1,524	34,05	7,95	1,646	41,29	8,10				
	4	30,13	9,59	1,555	34,104	9,82	1,639	39,71	5,19	1,773	42,91	0,58				
	6	33,11	9,72	1,666	37,726	8,22	1,739	42,21	2,79	1,842	43,16					
	8	35,23	7,65	1,694	39,32	6,35	1,810	43,88	0,67	1,863	43,14					
	12	37,94	6,32	1,782	42,15	3,27	1,913	44,56		1,992	43,19					
	16	39,72	5,30	1,845	43,86	1,37	1,988	44,50		1,992	43,19					
	24	41,82	3,99	1,926	45,40		2,050	44,50								
	32	42,80	3,41	1,969	45,67		2,069	44,50								
	48	44,26	2,25	2,029	45,42		2,057									
	64	45,02	1,31	2,063	45,23		2,048									
	96	45,82		2,100												
	128	46,21		2,119												
	192	46,51		2,134												
	256	46,33		2,125												
	384															
UMIDADE	CÁPSULA Nº															
	PESO SOLO ÚMIDO + TARA (g)															
	PESO SOLO SECO + TARA (g)															
	TARA (g)															
	SOLO SECO (g)															
	ÁGUA (g)															
	UMIDADE (%)	9,8 %			11,1			12,4			13,7			15		
PERDA	MASSA EXTRUDADA – Me = A x γd (g)															
	MASSA DESPRENDIDA - Md (g)															
	FATOR CORREÇÃO (F)															
	PERDA – P = 100 x Md/Me (%)															

Fonte: Autoria própria, 2023.

Anexo 6 - Determinação de c' e e'.



Fonte: Autoria própria, 2023.

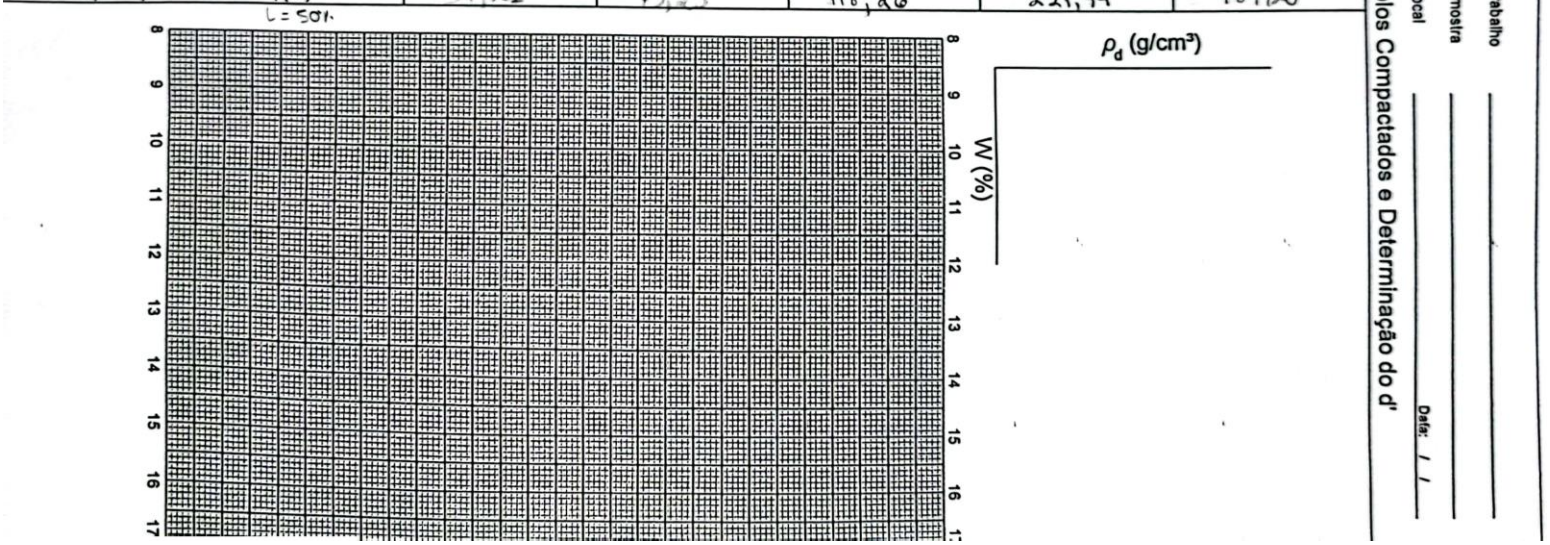
Anexo 7 - Dados de perda de massa por imersão de Solo Compactado e Determinação do d'.

UNESP - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
Departamento de Engenharia Civil
Laboratório de Pavimentação
Professor Jairo
Técnico Mário

Trabalho
Amostra
Local
Data: / /

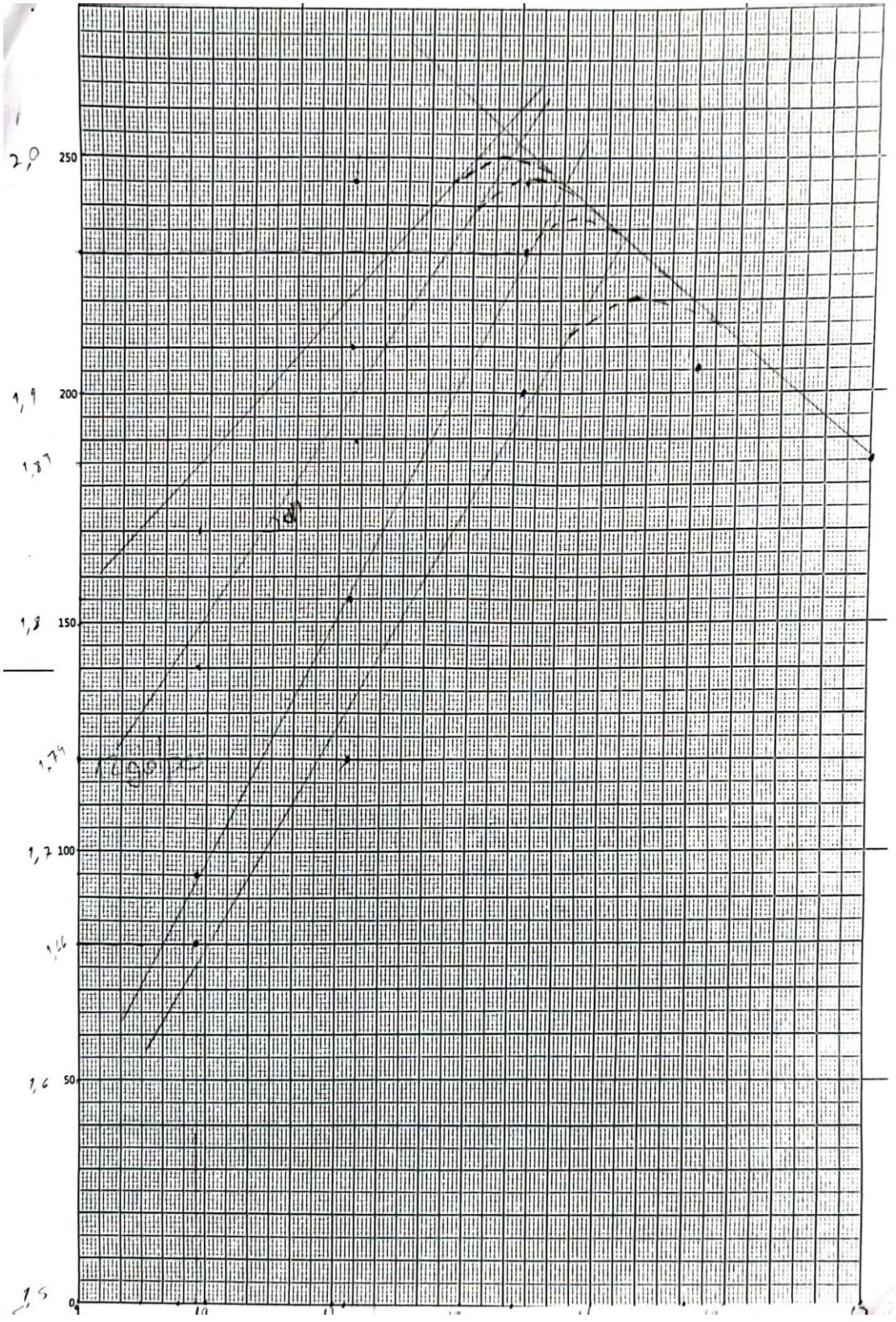
Perda de Massa por Imersão de Solos Compactados e Determinação do d'

Condição de compactação:					
Cilindro nº	01	02	03	04	05
Umidade da compactação (%)	9,8	11,1	12,4	13,7	15,0
Massa úmida do corpo de prova (g)	200	200	200	200	200
Massa seca do corpo de prova - Ms (g)	182,5	180,018	177,936	175,921	173,913
Altura do corpo-de-prova - A (mm)	43,67	44,77	45,5	46,21	47,21
P_i (%) = 100 x Md x A / Ms					
Cápsula nº	1	2	3	4	5
Massa seca + Tara (g)	220,03	236,24	270,67	229,13	273,63
Tara da cápsula (g)	204,48	205,99	224,43	206,49	204,08
Massa seca desprendida - Md (g)	15,55	30,25	46,25	83,42	69,55
Fator de redução ( ) = 0,5%	—	—	—	—	—
Perda de peso por imersão - P_i (%)	37,21	75,23	118,26	221,99	189,20



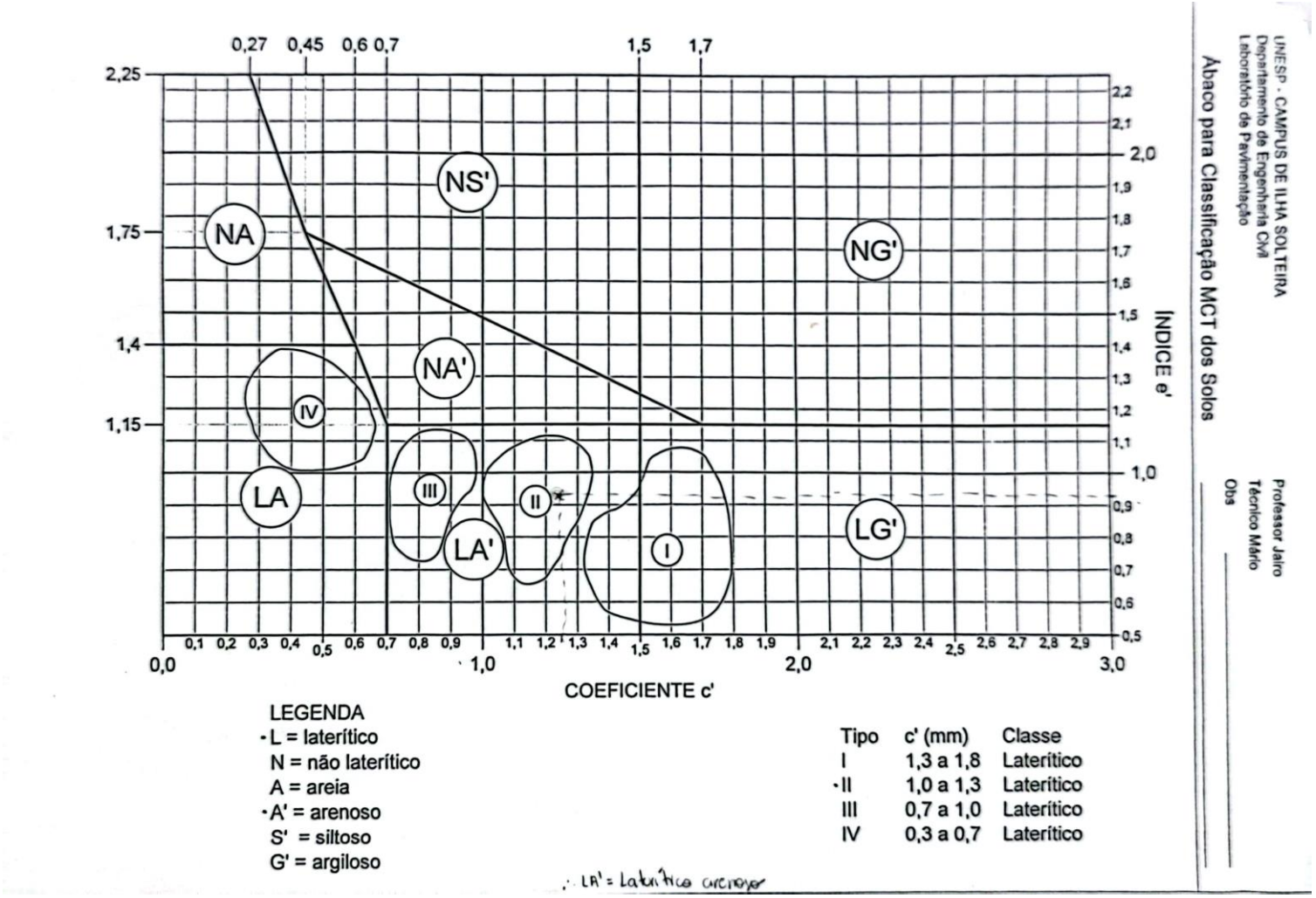
Fonte: Autoria própria, 2023.

Anexo 8 - Determinação do coeficiente d'.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Anexo 9 - Classificação MCT.



Fonte: Autoria própria, 2023.