

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ FELIPE DE COSTA OLDRA

**CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DO SUBSOLO DO MUNICÍPIO DE
TOLEDO-PR PARA FINS DE GEOTECNIA**

TOLEDO

2022

LUIZ FELIPE DE COSTA OLDRA

**CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DO SUBSOLO DO MUNICÍPIO DE
TOLEDO-PR PARA FINS DE GEOTECNIA**

**Contribution to the characterization of the subsoil of Toledo-PR for
Geotechnics Purposes**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Guilherme Alan Souza Costa.

TOLEDO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUIZ FELIPE DE COSTA OLDRA

**CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DO SUBSOLO DO MUNICÍPIO DE
TOLEDO-PR PARA FINS DE GEOTECNIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25 de novembro de 2022

Fernando Nunes Cavalheiro
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Tassiane Apolinario de Oliveira
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme Alan Souza Costa
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**TOLEDO
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar, dar forças e me manter no caminho independente das dificuldades que surgiram.

Aos meus pais José e Bernardete, pelo incentivo, amor, paciência e por sempre se certificarem de que eu tivesse tudo o que fosse necessário para continuar os estudos, não medindo esforços para me ajudar.

Aos meus irmãos e pessoas da família pelo suporte e cuidados ao longo de todo o caminho.

A minha namorada pelo amor, incentivo, me alegrar e principalmente paciência nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Guilherme Costa, pela disposição, auxílio e ensinamentos ao longo desse período.

A todos meus amigos que estiveram comigo durante essa trajetória, me alegrando e incentivando.

E a todos que de alguma maneira contribuíram para que isso fosse possível.

Constitui requisito prévio para o projeto de qualquer obra, o conhecimento da formação geológica local, estudo das rochas, solos, minerais que o compõem, bem como a influência da presença de água sobre ou sob a superfície da crosta.

É verdade conhecida que, em se tratando de solos e rochas, a heterogeneidade é a regra, a homogeneidade a exceção. Tais Estudos são, de fato, indispensáveis para se alcançar a “boa engenharia”, isto é, aquela que garante a necessária condição de segurança e, também, de economia.
(CAPUTO, 1988).

RESUMO

Estudar o solo é parte fundamental de um projeto de engenharia civil, isso porque pode influenciar nos custos das fundações das estruturas, bem como na segurança delas. Sendo assim, foram utilizadas as normas brasileiras que tratam da caracterização do solo para a realização de ensaios cujo objetivo era compreender e classificar o tipo de solo existente na área urbana do município de Toledo-PR. Dessa forma, através dos ensaios e juntamente com a análise de outros trabalhos encontrados na literatura, foi possível identificar esse solo. Trata-se de um solo do tipo Latossolo, esse que possui a maior taxa de incidência do estado do Paraná, sendo argiloso, com teores de finos superiores a 70%, silte variando de 10 a 20% e outras granulometrias em pequenas proporções. As amostras analisadas em laboratório apresentaram uma média de $2,679 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica dos grãos, com desvio padrão de 0,168 e variando entre $2,435$ e $2,892 \text{ g/cm}^3$. As amostras ensaiadas apresentaram limites de liquidez entre 52 e 61% para os solos rasos e com dispersão significativa para os limites de plasticidade, de 28 a 51%, influenciando na classificação com relação à plasticidade, contudo, em geral todos apresentaram boa trabalhabilidade e taxas de plasticidade variando de média a alta. Além disso, notou-se uma diferença significativa entre as amostras de profundidade 14 e 15 metros. Estas foram adquiridas de um amostrador SPT em pequenas quantidades, aproximadamente 500 g para cada, e por esse motivo, para a realização dos ensaios dos limites de Atterberg foi reutilizado o material da Massa específica dos grãos através da secagem em estufa, o que pode ter influenciado na coesão das partículas e consequentemente nos resultados desses ensaios. Ainda, notou-se a possível presença de matéria orgânica na amostra de 15 metros de profundidade, essa que apresentou os menores teores de argila no solo, 69,16%, a menor massa específica, de $2,435 \text{ g/cm}^3$, e também valores elevados para o limite de plasticidade em relação ao limite de liquidez, 86 e 100% respectivamente, reduzindo consequentemente o índice de plasticidade para 14% e a classificação do solo quanto à consistência e plasticidade.

Palavras-chave: caracterização do solo; índices físicos; solo residual; granulometria; limites de Atterberg.

ABSTRACT

Studying the soil is a paramount part of a civil engineering project because it can influence the costs of foundations, as well as on their safety. Therefore, the Brazilian standards that deal with soil characterization were used to perform tests whose objective was to understand and classify the type of soil existing in the urban area of the Toledo-PR. Thus, through the trials and together with the analysis of other studies found in the literature, it was possible to identify this soil. It is a soil of the Latosol type, which has the highest incidence rate of the state of Paraná, being clayey, with fine contents higher than 70%, silt ranging from 10 to 20% and other granulometry in small proportions. The samples analyzed in the laboratory presented an average of 2.679 g/cm³ for the specific mass of the grains, with a standard deviation of 0.168 and ranging between 2.435 and 2.892 g/cm³. It is also a soil with liquidity limits between 52 and 61% for shallow soils and with significant dispersion for plasticity limits, from 28 to 51%, influencing the classification in relation to plasticity, however, in general all presented good workability and plasticity rates ranging from medium to high. In addition, a significant difference was observed between the samples of depth 14 and 15 meters. They were acquired from an SPT sampler in small quantities, approximately 500 g for each, and for this reason, for the Atterberg limits tests, the material of the specific mass of the grains was reused through kiln drying, which may have influenced the particles cohesion and consequently the results tests. Furthermore, the possible presence of organic matter was noted in the sample of 15 meters deep, which presented the lowest clay contents in the soil, 69.16%, the lowest specific mass, of 2.435 g/cm³ and also high values for the plasticity limit in relation to the liquidity limit, 86 and 100% respectively, consequently reducing the plasticity index to 14% and the soil classification for consistency and plasticity.

Keywords: soil characterization; physical properties; residual soil; granulometry; Atterberg limits.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Mapa simplificado de solos do estado do Paraná | 14 |
| Figura 2 – Mapa simplificado de solos aproximado na região de Toledo-PR..... | 15 |
| Figura 3 – Limites de consistência | 20 |
| Figura 4 – Fotografias das amostras coletadas de 1 a 5..... | 25 |
| Figura 5 – Mapa das Amostras na região de Toledo-PR | 25 |
| Figura 6 – Secagem da amostra ao ar | 26 |
| Figura 7 – Destorroamento da amostra..... | 27 |
| Figura 8 – Amostra Destorroadada | 27 |
| Figura 9 – Amostra para Sedimentação e determinações de umidade..... | 31 |
| Figura 10 – Amostra imersa no defloculante | 31 |
| Figura 11 – Amostra no aparelho de dispersão..... | 32 |
| Figura 12 – Provetas para Sedimentação e leitura do Densímetro | 32 |
| Figura 13 – Material retido na peneira de abertura 0,075 mm..... | 33 |
| Figura 14 – Peneiramento Fino utilizando o agitador mecânico..... | 33 |
| Figura 15 – Amostra imersa em água destilada | 35 |
| Figura 16 – Aplicação de Vácuo em picnômetros de 1000 cm ³ com metade do volume..... | 36 |
| Figura 17 – Aplicação de Vácuo em picnômetros de 1000 cm ³ | 36 |
| Figura 18 – Banho-maria em chapa aquecida..... | 37 |
| Figura 19 – Cápsulas para determinação do teor de umidade..... | 38 |
| Figura 20 – Amostra colocada na concha de latão | 39 |
| Figura 21 – Ranhura feita na Amostra | 40 |
| Figura 22 – Fechamento da ranhura após golpes..... | 40 |
| Figura 23 – Placa de vidro e gabarito cilíndrico..... | 41 |
| Figura 24 – Amostra em comparação com o gabarito..... | 42 |
| Figura 25 – Curvas Granulométricas das amostras ensaiadas compiladas..... | 44 |
| Figura 26 – Média e Desvio Padrão da massa específica dos grãos..... | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Nomenclatura conforme tamanho dos grãos..... | 17 |
| Tabela 2 – Resultados da distribuição granulométrica do solo | 21 |
| Tabela 3 – Resultados da massa específica dos grãos | 22 |
| Tabela 4 – Resultados dos limites de Atterberg | 23 |
| Tabela 5 – Definição conforme índice de plasticidade | 23 |
| Tabela 6 – Classificação conforme índice de plasticidade | 23 |
| Tabela 7 – Quantidade de amostra para análise granulométrica | 28 |
| Tabela 8 – Quantidade de material em função da dimensão dos grãos maiores..... | 29 |
| Tabela 9 – Quantidade de material para os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade | 29 |
| Tabela 10 – Quantidade de material necessário para os ensaios de caracterização | 29 |
| Tabela 11 – Resultados compilados da distribuição granulométrica do solo | 45 |
| Tabela 12 – Resultados compilados da massa específica dos grãos | 46 |
| Tabela 13 – Resultados compilados dos limites de Atterberg | 49 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Justificativa | 11 |
| 1.2 | Objetivo Geral | 12 |
| 1.3 | Objetivos Específicos | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 2.1 | Solo de Toledo | 14 |
| 2.1.1 | Latossolos | 15 |
| 2.2 | Caracterização do solo | 16 |
| 2.3 | Ensaio em laboratório | 16 |
| 2.3.1 | Análise Granulométrica | 16 |
| 2.3.2 | Massa Específica dos grãos..... | 18 |
| 2.3.3 | Teor de Umidade..... | 18 |
| 2.3.4 | Limites de Atterberg | 19 |
| 2.4 | Contribuições para a criação de um banco de dados | 20 |
| 2.4.1 | Resultados da análise granulométrica..... | 21 |
| 2.4.2 | Resultados da massa específica dos grãos | 22 |
| 2.4.3 | Resultados dos limites de Atterberg | 22 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 24 |
| 3.1 | Amostras | 24 |
| 3.2 | Preparação do Solo para Ensaio de Caracterização em laboratório 26 | |
| 3.2.1 | Preparação com secagem prévia..... | 26 |
| <u>3.2.1.1</u> | <u>Amostra para análise granulométrica</u> | <u>27</u> |
| <u>3.2.1.2</u> | <u>Amostra para determinação dos limites de liquidez e plasticidade</u> | <u>28</u> |
| <u>3.2.1.3</u> | <u>Amostra para determinação da massa específica dos grãos</u> | <u>28</u> |
| 3.2.2 | Preparação sem secagem prévia | 28 |
| <u>3.2.2.1</u> | <u>Amostra para determinação do teor de umidade</u> | <u>29</u> |
| 3.3 | Análise Granulométrica | 30 |
| 3.4 | Determinação da Massa Específica dos Grãos | 35 |
| 3.5 | Teor de Umidade | 37 |
| 3.6 | Limite de Liquidez | 39 |
| 3.7 | Limite de Plasticidade | 41 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 43 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1 | Resultados Compilados da Análise Granulométrica | 44 |
| 4.2 | Resultados Compilados da Massa Específica dos Grãos | 46 |
| 4.3 | Resultados Compilados dos Limites de Atterberg..... | 48 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 51 |
| | REFERÊNCIAS..... | 53 |
| | APÊNDICE A - Informações e Determinações da Massa específica dos grãos e Limites de Liquidez e Plasticidade | 55 |

1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil tem evoluído muito ao longo dos anos e possibilitado a construção de edifícios e estruturas cada vez maiores. Um desses motivos atribui-se ao fato de terem sido desenvolvidas fundações capazes de suportar as cargas e transferi-las ao solo de maneira adequada, evitando os diversos problemas que possam ocorrer, para isto, se faz necessário o estudo do solo.

Compreender as características do solo e suas propriedades é parte indispensável para qualquer estrutura de engenharia civil, tanto para qualificar quanto para quantificar suas propriedades mecânicas a fim de garantir a segurança necessária nas fundações e construções a serem ali realizadas.

De acordo com a Norma Brasileira de rochas e solos 6502:1995 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é possível diferenciar os tipos de solo pelo tamanho de suas partículas, entre eles estão o pedregulho com dimensões que variam de 2 a 60 mm, a areia, com partículas que variam de 0,06 a 2,0 mm, o silte, que pode ser considerado um intermediário entre a areia e a argila, com partículas de 0,002 a 0,06 mm, e a argila, constituída de partículas com dimensões menores que 0,002 mm.

Ainda em relação aos tipos, cada um possui particularidades em relação ao comportamento e características mecânicas, as quais impactam diretamente na interação solo-estrutura, bem como na escolha do tipo de fundação que melhor atenda a segurança requerida.

Desta forma, a caracterização e investigação do subsolo consistem na análise das suas propriedades quantitativas e qualitativas, por meio de ensaios em laboratório ou campo em conformidade com os padrões descritos pelas Normas Brasileiras (NBR) vigentes.

1.1 Justificativa

Na engenharia, a importância do estudo do solo e a investigação do subsolo podem impactar no tipo de fundação que será utilizada e conseqüentemente nos custos dos empreendimentos. Além disso, essas informações também são

importantes para o projeto de terraplanagem e de cálculo estrutural pois torna possível saber como o solo vai reagir aos esforços.

Com relação à essas informações, caso não sejam precisas podem gerar inúmeros problemas ao longo da execução e após o término da obra, como recalques ou outras patologias que poderiam ser evitadas. Isso faz com que os custos com a obra aumentem mesmo após esta ter sido finalizada, desde custos relativamente baixos à até casos extremos em que a edificação pode ser condenada. Um exemplo problemático são os edifícios inclinados na orla de Santos-SP cujo efeito se deve ao recalque diferencial provocado devido a utilização de fundações rasas, onde posteriormente essa inclinação foi corrigida com a utilização de técnicas de reaprumo.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), produzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2018), apresenta uma enorme diversidade de solos existentes em todo o território nacional, cada um possuindo diferentes propriedades e particularidades, sendo assim, uma das motivações do trabalho é através da caracterização contribuir para um melhor entendimento do tipo de solo com o qual está sendo trabalhado no município de Toledo-PR.

1.2 Objetivo Geral

Avaliar as características como o tamanho das partículas, massa específica, teor de umidade e limites de consistência do solo, de modo a contribuir para a criação de uma base de dados e estudos do solo de Toledo-PR.

1.3 Objetivos Específicos

Caracterizar o solo através da análise tátil-visual e por meio de ensaios de granulometria, determinação da massa específica dos grãos, teor de umidade, limites de liquidez e de plasticidade.

Buscar na literatura dados de outros ensaios realizados na região e compilar as informações de modo a criar uma base de dados.

Analisar os resultados da campanha de ensaios realizados e confrontar com aqueles levantados na revisão bibliográfica de modo a garantir que estes são satisfatórios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para se iniciar os ensaios em laboratório e os estudos aprofundados acerca do conteúdo, inicialmente será feita uma contextualização sobre o assunto, abordando quais são e o que cada um desses métodos irá abordar. Além disso, apresentar possíveis resultados esperados e informações existentes sobre eles que serão usadas para fins de comparação.

2.1 Solo de Toledo

No mapa simplificado de solos do estado do Paraná, de 2012, apresentado na Figura 1, produzido em conjunto pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), EMBRAPA e Laboratório de Monitoramento Ambiental (LMA), é notável a diversidade dos solos mapeados no estado. Toledo, localizada no extremo oeste, caracteriza-se em região compreendida por solo do tipo Latossolo, conforme pode ser visualizado na Figura 2, ampliada no trecho de interesse do presente estudo.

Figura 1 – Mapa simplificado de solos do estado do Paraná

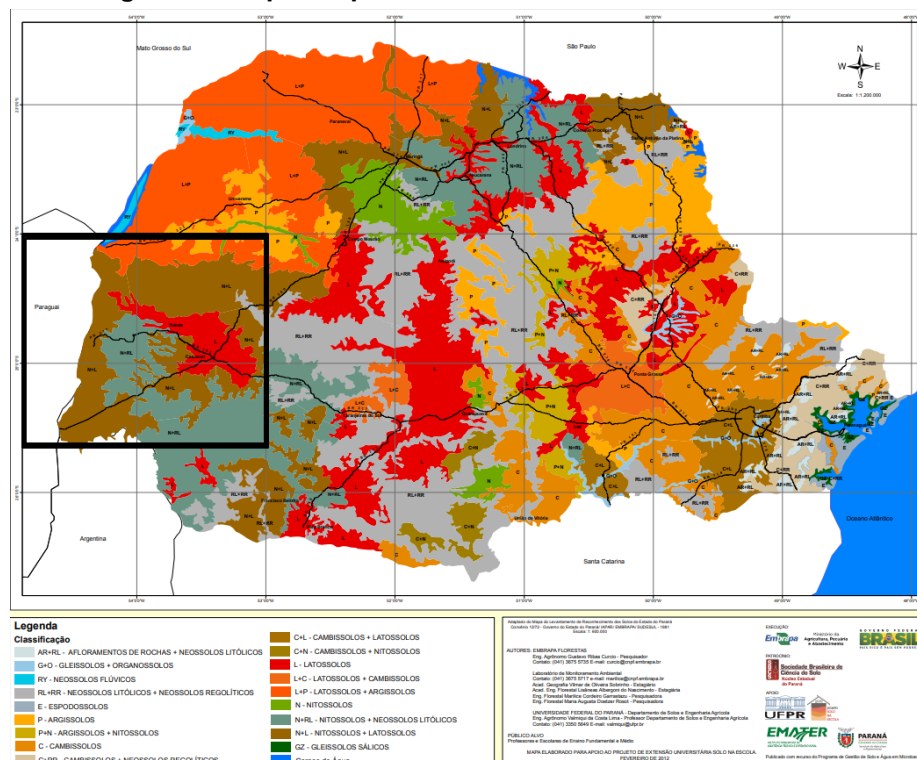
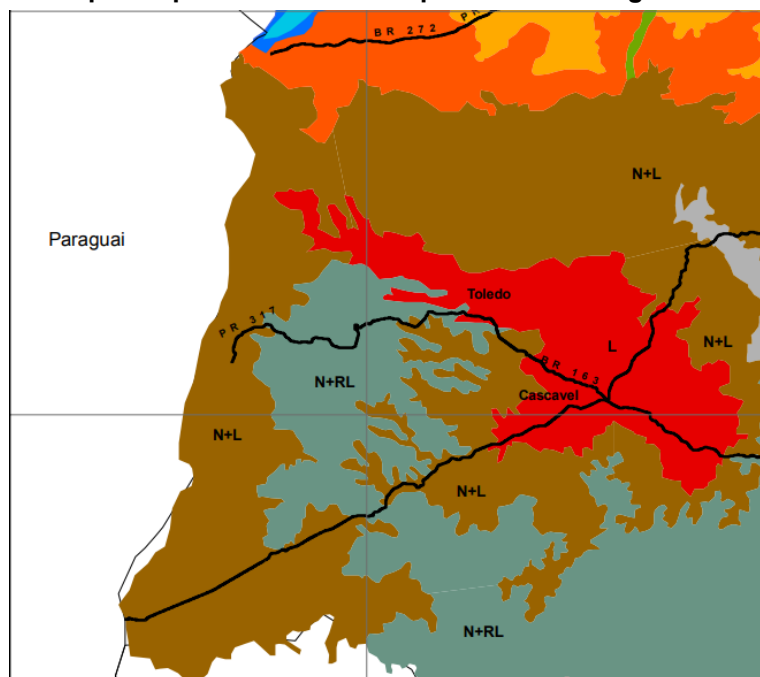


Figura 2 – Mapa simplificado de solos aproximado na região de Toledo-PR



Fonte: Adaptado de UFPR, EMBRAPA, LMA (2012)

2.1.1 Latossolos

Os latossolos são solos minerais, com enriquecimento em óxido de ferro (Fe_2O_3) e de alumínio (Al_2O_3), com cores que variam de vermelhas muito escuras a amareladas. São solos profundos, com mais de 2 metros de espessura, bastante intemperizados, muito porosos, permeáveis e com boa drenagem. Além disso, apresentam teor de silte inferior a 20% e argila variando entre 15% e 80% (EMBRAPA, 2002).

É o principal tipo de solo encontrado no Paraná, cerca de 31% do total do estado, comumente apresenta relevo plano, alta estabilidade, baixo risco de erosão, grande capacidade para suportar estradas, construções e favoráveis para a instalação de aterros sanitários (UFPR; SBCS, 2012).

De acordo com Ker (1997), os Latossolos presentes na região, do tipo Latossolos Roxos são, na grande maioria de textura argilosa ou muito argilosa. Quanto aos minerais predominantes é possível citar entre eles a magnetita, magnetita intercrescida de ilmenita e quartzo (sendo este em pequenas proporções), na porção grosseira, e caulinita, gibbsita, e hematita na porção mais fina.

2.2 Caracterização do solo

A caracterização e classificação dos solos diferencia os comportamentos dos diversos tipos perante as solicitações impostas, de modo que seja possível estimar o provável comportamento de um determinado solo ou então, fazer a investigação necessária para se obter uma análise adequada do problema (PINTO, 2006).

Um dos objetivos da mecânica dos solos é o de facilitar os estudos de caracterização e também prever possíveis comportamentos dos solos. Dessa forma, existem vários sistemas de classificação de solos, contudo, não há um sistema que atenda simultaneamente por exemplo a área relacionada às estradas com a mesma eficiência que atenda a de fundações (ALMEIDA, 2005).

Ainda, Pinto (2006) afirma que existem diversas formas de classificar os solos, e que, os sistemas que se baseiam nas características dos grãos utilizando dos índices de granulometria e de Atterberg, têm como objetivo a definição de grupos que apresentam comportamentos semelhantes sob aspectos de interesse da Engenharia Civil.

Segundo Santos (2002), os ensaios de caracterização mecânica dos solos são de grande relevância na engenharia geotécnica, visto que estudos detalhados sobre o comportamento tensão-deformação podem contribuir para um melhor dimensionamento das obras geotécnicas.

2.3 Ensaio em laboratório

Para prosseguir com os ensaios em laboratório e devida caracterização do solo é necessário fazer o uso da ABNT NBR 6457:2016, que especifica os procedimentos a serem seguidos para a preparação das amostras de solo dos ensaios que serão realizados. Estes incluem a análise granulométrica, determinação da massa específica dos grãos, teor de umidade e limites de liquidez e plasticidade.

2.3.1 Análise Granulométrica

O método para os ensaios de análise granulométrica segue os padrões da ABNT NBR 7181:2018, fazendo uso dos processos de peneiramento e sedimentação.

Segundo Dirksen (2018), a granulometria avalia a distribuição dos grãos presentes em uma amostra de solo e deve ser feita antes dos outros ensaios de caracterização por ser uma propriedade básica e fundamental para o reconhecimento e entendimento das propriedades de um solo.

A ABNT NBR 6502:1995 referente a rochas e solos, apresenta uma nomenclatura com relação ao tamanho dos grãos da seguinte maneira, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Nomenclatura conforme tamanho dos grãos

| Nomenclatura | Tamanho dos Grãos (mm) |
|-------------------|------------------------|
| Matacão | 200 a 1000 |
| Pedra-de-mão | 60 a 200 |
| Pedregulho grosso | 20 a 60 |
| Pedregulho médio | 6 a 20 |
| Pedregulho fino | 2 a 6 |
| Areia grossa | 0,6 a 2 |
| Areia média | 0,2 a 0,6 |
| Areia fina | 0,06 a 0,2 |
| Silte | 0,002 a 0,06 |
| Argila | Menores que 0,002 |

Fonte: ABNT NBR 6502:1995

Enquanto pedregulhos são facilmente identificados visualmente, apenas os maiores grãos de areia são visíveis a olho nu, visto que estes podem chegar a até 0,06 mm para os grãos de menor diâmetro. No caso do silte, que os grãos são de formato arredondado assim como a areia, suas partículas são ainda menores com até 0,002 mm de diâmetro, não sendo possível de identificar a olho nu e individualmente são imperceptíveis ao tato, assim como as argilas. Entretanto, o formato dos grãos se difere em relação aos da argila, que além de ter dimensões inferiores a 0,002 mm, são na maior parte semelhantes a placas de vidro (ALMEIDA, 2005).

Ao analisar uma massa de solo, os tamanhos dos grãos podem variar imensamente, sendo assim, é necessário conhecer a granulometria para se classificar uma propriedade. Para solos de grãos grossos, geralmente é determinado pelo ensaio de peneiramento, já para solos de grãos finos, que passam pela peneira de 0,075 mm, a distribuição é obtida por ensaios de sedimentação (DAS, 2016).

2.3.2 Massa Específica dos grãos

Massa específica é a relação entre a massa dos grãos e o volume, para isso, o método usado na determinação da massa específica segue os padrões da ABNT NBR 6458:2017 – Anexo B (grãos de solo que passam na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica), por meio de picnômetro e realizando pelo menos dois ensaios.

De acordo com Barnes (2016), os solos possuem vários minerais decorrentes de processos geológicos com diferentes pesos moleculares, no caso de solos com grande variedade de materiais só é encontrado um valor médio, dessa forma, a determinação da massa específica pode ser útil para determinar a presença de certos minerais, contudo, a maioria dos solos apresenta intervalos de valores pequenos, de 2,6 a 2,8 g/cm³, tornando o método limitado a isso. Assim, a principal aplicação deste é determinar outras propriedades do solo, como o índice de vazios e grau de saturação.

Almeida (2005), aponta que para os solos mais comuns esses valores podem variar de 2,65 a 2,90 g/cm³, mas que a presença de minérios ou metais pesados podem aumentá-los. Em casos onde há por exemplo a presença de matéria orgânica, esses valores podem ser reduzidos.

2.3.3 Teor de Umidade

A ABNT NBR 6502:1995 define teor de umidade como “a relação entre a massa de água contida nos vazios de um solo e a massa das partículas sólidas (grãos), expressa em percentagem”. Quanto aos procedimentos, seguem os padrões da ABNT NBR 6547:2016 – Anexo A (Determinação do teor de umidade de solos), que especifica a determinação em laboratório.

O teor de umidade de um solo, embora expresso como tal, não é uma porcentagem. Imagine uma amostra seca, à qual são adicionadas porções de água. O peso da água aumenta, mas o peso das partículas sólidas é constante. Portanto o limite inferior para a umidade de um solo é zero (0%), mas não há limite superior para este índice. (ALMEIDA, 2005, p. 40).

Determinar o teor de umidade de um solo pelo método da estufa é um processo muito simples, porém demorado, sendo necessário apenas determinar a massa da amostra em estado natural e após a secagem completa em estufa a 105 ou 110 °C. Contudo, esse valor pode variar muito dependendo do tipo do solo e local, podendo apresentar valores expressivos de umidade que impactam diretamente na resistência do solo (CAPUTO, 1988).

2.3.4 Limites de Atterberg

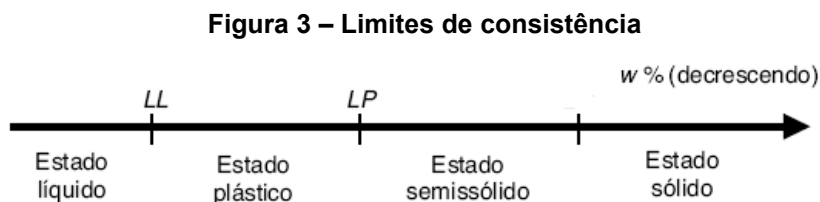
Os limites de liquidez e de plasticidade também são conhecidos como Limites de Atterberg. O ensaio para a determinação do limite de liquidez é feito através do uso do aparelho de Casagrande, de um Cinzel e de acordo com os padrões da ABNT NBR 6459:2017. Além disso, o limite de liquidez é definido pela ABNT NBR 6502:1995 como sendo o “Teor de umidade de um solo argiloso, correspondente ao estado limite entre os estados líquido e plástico”.

Quando o teor de umidade é muito alto em solos de grãos finos e com presença de um argilomineral, o solo e água podem ter comportamentos parecidos com os de um líquido, já quando a umidade é muito baixa, este se comporta como um sólido. Assim, dependendo do teor de umidade de um solo, seu comportamento poderá ser classificado como sólido, semissólido, plástico ou líquido, sendo o teor de umidade onde ocorre a transição do estado plástico para o líquido chamado de Limite de Liquidez (DAS; SOBHAN, 2019).

Quanto ao limite de plasticidade, esse é definido pela ABNT NBR 6502:1995 como sendo o “Teor de umidade de um solo argiloso, correspondente ao estado limite entre os estados plástico e semissólido”. O método utilizado para a determinação do limite de plasticidade segue os padrões da ABNT NBR 7180:2016.

Plasticidade é a capacidade dos solos com certa porcentagem de fração fina de serem moldados sob um teor de umidade, no estado plástico este solo permanece sem romper, de modo que ao perder umidade passa para o estado semissólido, onde se desmancha ao ser trabalhado. Esse é o limite de plasticidade, determinado pela porcentagem de umidade onde ao tentar moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento o solo começa a se fragmentar (CAPUTO, 1988).

A Figura 3 apresenta essa relação entre o comportamento e o teor de umidade de um solo, onde: Limite de liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Teor de umidade ($w\%$).



Fonte: Adaptado de Caputo (1988, p. 53)

O Índice de Plasticidade (IP), de acordo com a ABNT NBR 6502:1995 é o “parâmetro definido como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade”. Para o cálculo do IP, esse é apresentado pela ABNT NBR 7180:2016.

Segundo Caputo (1988), o Índice de Plasticidade define a zona em que o terreno se encontra no estado plástico, sendo máximo para as argilas e nulo para as areias, de modo que o solo será mais plástico quanto maior for o IP, e, para as argilas, mais compressível será. Além disso, solos que possuem uma pequena porcentagem de matéria orgânica apresentam valores reduzidos para o IP, pois elevam o valor do limite de plasticidade sem elevar o limite de liquidez.

Quanto maior a proporção de argila no solo, maiores serão os valores de água absorvidos e, conseqüentemente, mais elevados serão os limites de Atterberg. Essa relação entre o limite de liquidez e de plasticidade tem grande aplicação na área geotécnica tanto para a avaliação do solo no uso de fundações e construções de estradas quanto para estruturas de armazenamento e retenção de água (SOUZA; RAFUL; VIEIRA, 2000).

2.4 Contribuições para a criação de um banco de dados

Com o objetivo de criar um banco de dados e também para futuras comparações a respeito da caracterização do solo de Toledo – PR, foram analisados outros trabalhos realizados nesse mesmo campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e compiladas as suas informações em tabelas, que serão apresentadas a seguir juntamente com a enumeração de cada trabalho realizado a fim de facilitar a compreensão dos dados.

Trabalho 1: Análise da interação solo-estrutura aplicada às fundações profundas na região oeste do Paraná (FREIRES, 2016).

Trabalho 2: Verificação do fenômeno do colapso em um solo típico de Toledo – PR (CATANEO, 2017).

Trabalho 3: Estudo experimental do solo do município de Toledo para aplicação na sub-base de um pavimento (SCHÖLER, 2018).

Trabalho 4: Estudo da influência da cal hidratada nas propriedades físicas e na compactação do solo (LEITE, 2018).

Trabalho 5: Estudo do melhoramento do solo de fundação com adição de pó de vidro silicato (WURZIUS, 2018).

2.4.1 Resultados da análise granulométrica

A Tabela 2 apresenta um compilado das porcentagens da distribuição granulométrica obtidas na literatura. Além disso, é importante ressaltar que para alguns dos trabalhos citados foram feitos ajustes em relação à dimensão dos grãos, uma vez que estavam em sistemas de classificação diferentes, de modo que estes estejam de acordo com a ABNT NBR 6502:1995 (Tabela 1).

Tabela 2 – Resultados da distribuição granulométrica do solo

| Trabalho | Argila (%) | Silte (%) | Areia (%) | | | Pedregulho Fino (%) |
|---------------|------------|-----------|-----------|-------|--------|---------------------|
| | | | Fina | Média | Grossa | |
| 1 - (FREIRES) | 79,31 | 11,75 | 6,61 | 1,69 | 0,62 | 0,02 |
| 2 - (CATANEO) | 80,00 | 12,00 | 6,00 | 2,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 - (SCHÖLER) | 75,13 | 16,09 | 4,69 | 3,32 | 0,77 | 0,00 |
| 4 - (LEITE) | 76,00 | 12,00 | 8,00 | 2,00 | 2,00 | 0,00 |
| 5 - (WURZIUS) | 78,00 | 14,00 | 5,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |

Nota: A Tabela apresenta os dados com duas casas decimais, no entanto, os trabalhos 2, 4 e 5 apresentaram números inteiros.

Fonte: Adaptado de Freires (2016); Cataneo (2017); Schöler (2018); Leite (2018) e Wurzius (2018)

Analisando a Tabela 2, é possível concluir que os valores da distribuição granulométrica tiveram uma baixa variação nos resultados, de modo que sejam esperados valores para as partes mais significativas do solo que são a Argila em torno

de 75 a 80%, o Silte de 11 a 17% e Areia fina de 4 a 8%. Para a Areia média, Areia grossa e o Pedregulho fino são esperadas quantidades pequenas ou nulas.

2.4.2 Resultados da massa específica dos grãos

De acordo com a ABNT NBR 6458:2017, o resultado final da determinação da massa específica dos grãos (ρ_s) é obtido pela média de no mínimo dois ensaios considerados satisfatórios e que não diferem em mais de $0,02 \text{ g/cm}^3$. A Tabela 3 expõe os resultados dos trabalhos analisados, onde Wurzius apresenta apenas o valor final.

Tabela 3 – Resultados da massa específica dos grãos

| Trabalho | ρ_s 1 (g/cm^3) | ρ_s 2 (g/cm^3) | ρ_s 3 (g/cm^3) | Média (g/cm^3) |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1 - (FREIRES) | 3,081 | 3,078 | - | 3,079 |
| 2 - (CATANEO) | 2,910 | 2,890 | - | 2,900 |
| 3 - (SCHÖLER) | 2,717 | 2,712 | - | 2,715 |
| 4 - (LEITE) | 2,585 | 2,583 | 2,584 | 2,584 |
| 5 - (WURZIUS) | 2,480 | - | - | 2,480 |

Fonte: Adaptado de Freires (2016); Cataneo (2017); Schöler (2018); Leite (2018) e Wurzius (2018)

Como previamente mencionado, os valores usuais para massa específica (ρ_s) do solo são de $2,6$ a $2,9 \text{ g/cm}^3$, mas que podem tanto aumentar na presença de metais pesados quanto reduzir na presença de matéria orgânica ou partículas mais leves.

Para o trabalho 1 que apresentou o valor de $3,079 \text{ g/cm}^3$ e pode ser considerado alto em relação aos demais, Freires (2016), autor do trabalho, comenta “Sendo que esse fato pode ser justificado, possivelmente, pela presença de Ferro na amostra, como verificado pela coloração avermelhada da mesma”.

2.4.3 Resultados dos limites de Atterberg

Para o limite de liquidez (LL), segundo ABNT NBR 6459:2017, deve-se obter o teor de umidade em porcentagem e aproxima-se para o número inteiro mais próximo, valor referente ao fechamento com 25 golpes da ranhura inferior no solo.

Conforme a ABNT NBR 7180:2016, o limite de plasticidade (LP) deve expressar o teor de umidade em porcentagem e aproximando para o inteiro mais

próximo, sendo o resultado da média de pelo menos três valores considerados satisfatórios e que não diferem mais de 5% da média. Quanto ao índice de plasticidade (IP), que corresponde à diferença entre os valores de LL e LP, também é expresso em porcentagem. A Tabela 4 apresenta os dados de LL, LP e IP referentes aos trabalhos.

Tabela 4 – Resultados dos limites de Atterberg

| Trabalho | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|---------------|--------|--------|--------|
| 1 - (FREIRES) | 61 | 51 | 10 |
| 2 - (CATANEO) | 55 | 42 | 13 |
| 3 - (SCHÖLER) | 56 | 44 | 12 |
| 4 - (LEITE) | 52 | 32 | 20 |
| 5 - (WURZIUS) | 58 | 40 | 18 |

Fonte: Adaptado de Freires (2016); Cataneo (2017); Schöler (2018); Leite (2018) e Wurzius (2018)

O índice de plasticidade define a zona em que o solo se encontra no estado plástico. Assim, Caputo (1988) e Almeida (2005) apresentam a classificação dos solos (Jenkins) de acordo com o IP, exposto na Tabela 5. Portanto, os trabalhos de referência tiveram as amostras classificadas conforme exposto na Tabela 6.

Tabela 5 – Definição conforme índice de plasticidade

| IP (%) | Definição |
|---------------|---------------------|
| $1 < IP < 7$ | Pouco Plástico |
| $7 < IP < 15$ | Mediamente Plástico |
| $IP > 15$ | Muito Plástico |

Fonte: Caputo (1988)

Tabela 6 – Classificação conforme índice de plasticidade

| Trabalho | IP (%) | Definição |
|---------------|--------|---------------------|
| 1 - (FREIRES) | 10 | Mediamente Plástico |
| 2 - (CATANEO) | 13 | Mediamente Plástico |
| 3 - (SCHÖLER) | 12 | Mediamente Plástico |
| 4 - (LEITE) | 20 | Muito Plástico |
| 5 - (WURZIUS) | 18 | Muito Plástico |

Fonte: Autor (2022)

Analisando a Tabela 6 é possível constatar que tiveram algumas variações em relação aos resultados, dessa forma, espera-se encontrar resultados dentro da variação apresentada, caracterizando o solo como sendo mediamente a muito plástico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

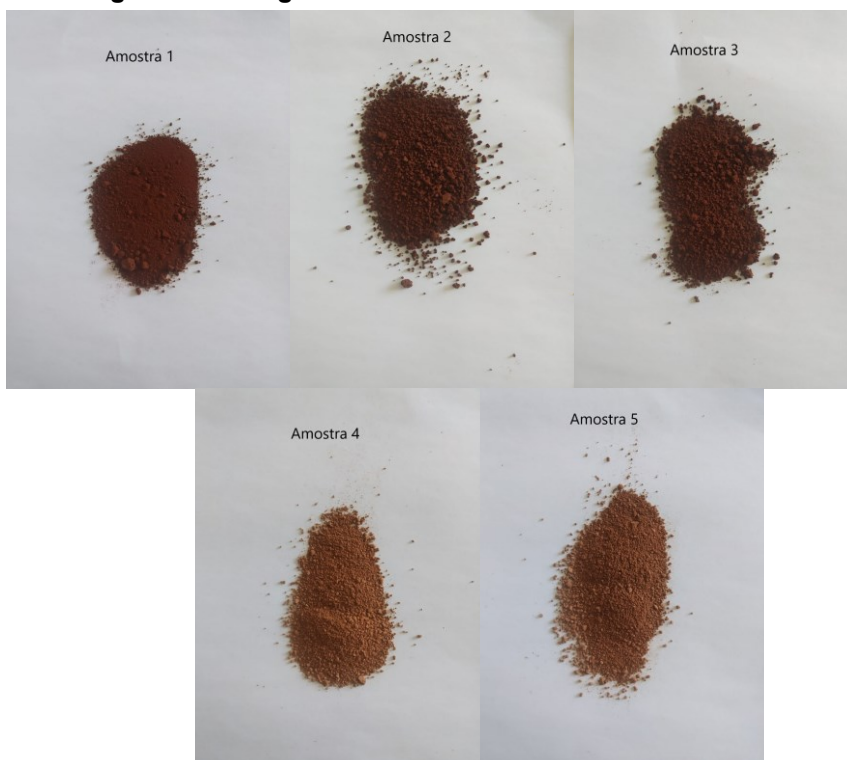
Os ensaios de caracterização de solos em laboratório seguem a metodologia apresentada pelas normas da ABNT referentes a cada ensaio, os quais foram realizados no laboratório de geotecnia do curso de Engenharia Civil da UTFPR campus Toledo. Também é importante lembrar os trabalhos de Freires, Cataneo, Scholer, Leite e Wurzius, que contribuíram com dados utilizados na criação das tabelas.

3.1 Amostras

Para os ensaios de caracterização foram coletadas amostras de solo de cinco pontos de Toledo, as fotografias são apresentadas na Figura 4 e sua localização na Figura 5. Além disso, evita-se a parte superficial do solo, coletando amostras com pelo menos um metro de profundidade, de modo a preservar a umidade natural e reduzir ou evitar a presença de impurezas e matéria orgânica na amostra, que naturalmente será evitada em qualquer obra de engenharia.

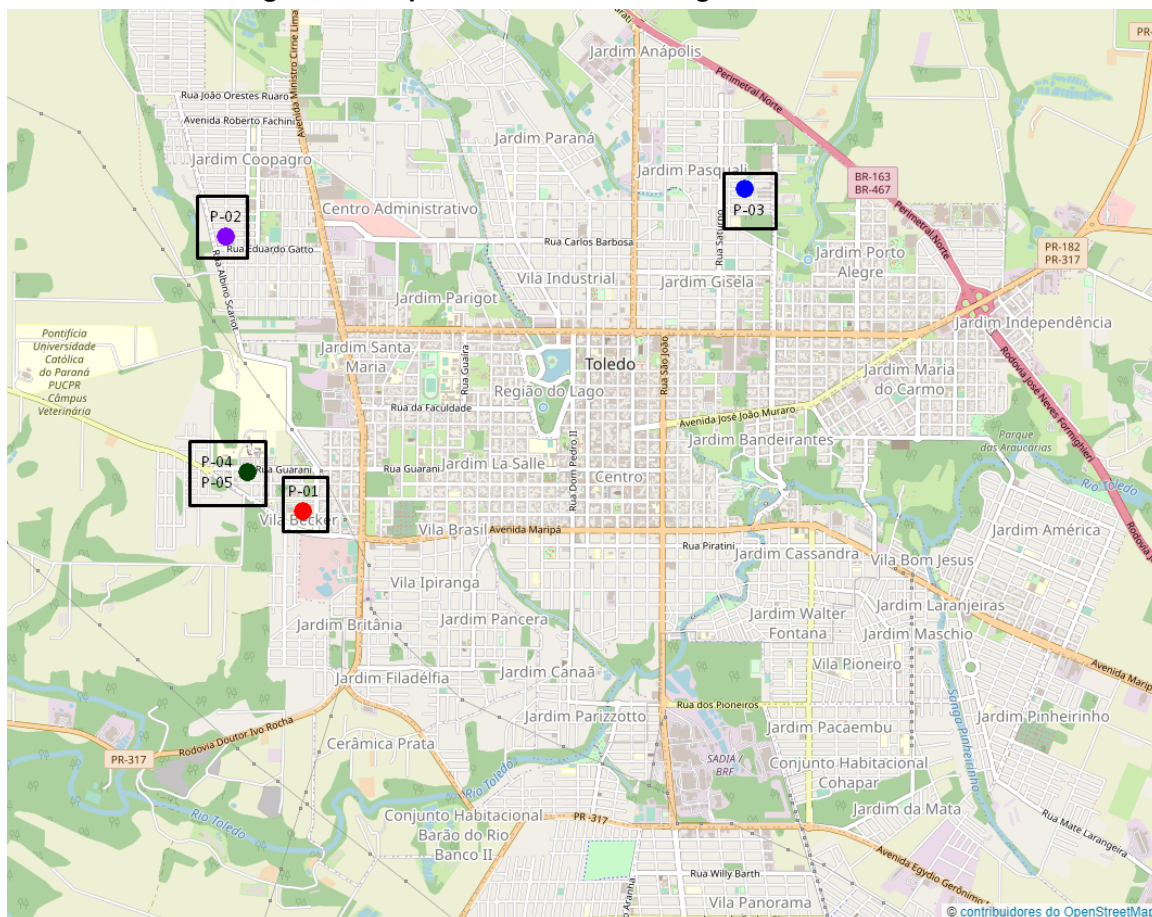
- Amostra 1 “P-01”: Coletada no campus da UTFPR Toledo – Profundidade 2 metros. Coordenadas: -24.733434, -53.764858.
- Amostra 2 “P-02”: Coletada na região do Jardim Coopagro – Profundidade 4 metros. Coordenadas: -24.713241, -53.770184.
- Amostra 3 “P-03”: Coletada na região do Jardim Gisela – Profundidade 4 metros. Coordenadas: -24.709550, -53.729424.
- Amostra 4 “P-04”: Coletada próximo ao campus da PUCPR Toledo – Profundidade 14 metros (Fornecida pela empresa Fundati – Engenharia Geotécnica). Coordenadas: -24.72986424186215, -53.76873498632755.
- Amostra 5 “P-05”: Coletada próximo ao campus da PUCPR Toledo – Profundidade 15 metros (Fornecida pela empresa Fundati – Engenharia Geotécnica). Coordenadas: -24.72986424186215, -53.76873498632755.

Figura 4 – Fotografias das amostras coletadas de 1 a 5



Fonte: Autor (2022)

Figura 5 – Mapa das Amostras na região de Toledo-PR



Fonte: Autor (2022)

No caso das amostras 4 e 5, foram obtidas pequenas quantidades de solo para a realização dos ensaios, aproximadamente 500 g de cada, de modo que para a determinação dos Limites de Liquidez e Plasticidade foi reutilizado o material da Massa específica dos grãos, fato que será abordado na apresentação dos resultados.

3.2 Preparação do Solo para Ensaios de Caracterização em laboratório

Quanto aos processos para a preparação das amostras, a ABNT NBR 6457:2016 especifica os procedimentos para então posteriormente seguir com os ensaios em laboratório de análise granulométrica, determinação da massa específica dos grãos, teor de umidade, limite de liquidez e de plasticidade.

São dois processos que podem ser utilizados para a preparação das amostras, um com secagem prévia e outro sem secagem prévia da amostra. Entretanto, no caso do ensaio de granulometria é necessária a secagem prévia, bem como para o ensaio do teor de umidade é necessário que a umidade seja mantida. Além disso, o processo sem secagem prévia só pode ser empregado quando a amostra apresentar no máximo 10% de material retido na peneira de 0,42 mm.

3.2.1 Preparação com secagem prévia

Toda a amostra foi seca ao ar até atingir valores próximos ao da umidade hidrocópica, umidade residual do solo, como apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Secagem da amostra ao ar



Fonte: Autor (2022)

Após a secagem, cerca de 3 dias ao ar livre, e evitando a quebra dos grãos, a amostra foi destorroada e homogeneizada, como apresentado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 – Destorroamento da amostra



Fonte: Autor (2022)

Figura 8 – Amostra Destorroada



Fonte: Autor (2022)

Então, utilizando o repartidor de amostras, reduziu-se a quantidade de material até obter uma amostra representativa e com quantidade suficiente para a realização dos ensaios, essas quantidades serão apresentadas adiante.

3.2.1.1 Amostra para análise granulométrica

Para o ensaio de análise granulométrica foi tomado uma fração da amostra obtida e passada na peneira de 76 mm, desprezando o material eventualmente retido. É tomado então uma quantidade do material passante em função da dimensão

estimada dos grãos maiores, determinada por observação visual, apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantidade de amostra para análise granulométrica

| Dimensões dos órgãos maiores contidos na amostra, determinadas por observação visual (mm) | Quantidade mínima a tomar (kg) |
|---|--------------------------------|
| < 5 | 1 |
| 5 a 25 | 4 |
| > 25 | 8 |

Nota 1: O material assim obtido constitui a amostra a ser ensaiada.

Nota 2: O valor da massa específica dos grãos, a ser utilizado no cálculo de análise granulométrica por sedimentação, é determinado a partir de cerca de 500 g de material passado na peneira de 2,0 mm.

Fonte: ABNT NBR 6457(2016)

Para as amostras utilizadas neste trabalho, as dimensões máximas foram inferiores a 5 mm.

3.2.1.2 Amostra para determinação dos limites de liquidez e plasticidade

Foi tomado uma fração da amostra e passado na peneira de 0,42 mm, de modo a obter cerca de 200 g de material passante, essa é a amostra a ser utilizada.

3.2.1.3 Amostra para determinação da massa específica dos grãos

Foi tomado uma fração da amostra e passado na peneira de 4,8 mm, de modo a se ter cerca de 500 g de material passante, essa é a amostra a ser utilizada no ensaio.

3.2.2 Preparação sem secagem prévia

A amostra é coletada, embalada e levada ao laboratório, evitando a perda de umidade. Segue-se então, evitando a quebra dos grãos e perda da umidade se possível, o processo de destorroamento e homogeneização desta, com o repartidor de amostra foi feita a redução da quantidade do material até se obter uma amostra representativa, tal qual feito na preparação com secagem prévia.

3.2.2.1 Amostra para determinação do teor de umidade

Para o teor de umidade natural, é tomada uma quantidade de material em função dos maiores grãos contidos na amostra, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Quantidade de material 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) | Balança a ser utilizada | |
|--|--|-------------------------|---------------|
| | | Capacidade Nominal (g) | Resolução (g) |
| < 2 | 30 | 200 | 0,01 |
| 2 a 20 | 30 a 300 | 1500 | 0,1 |
| 20 a 76 | 300 a 3000 | 5000 | 0,5 |

Fonte: ABNT NBR 6457 (2016)

No caso do teor de umidade para os ensaios de determinação dos limites de liquidez e plasticidade, é tomada uma quantidade de material indicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Quantidade de material para os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade

| Ensaio | Quantidade mínima de material (em massa úmida) a tomar (g) | Balança a ser utilizada | |
|------------------------|--|-------------------------|---------------|
| | | Capacidade Nominal (g) | Resolução (g) |
| Limite de liquidez | 8,0 ou 4,0 ^a | 200 | 0,01 |
| Limite de plasticidade | 1,5 ou 1,0 ^a | 200 | 0,01 |

Nota: ^a é para solos com limites elevados

Fonte: ABNT NBR 6457 (2016)

Com o objetivo de facilitar o entendimento em relação às quantidades necessárias para cada ensaio, a Tabela 10 foi elaborada, sendo considerados os resultados esperados para os ensaios.

Tabela 10 – Quantidade de material necessário para os ensaios de caracterização

| Ensaio | Quantidade de material (g) |
|------------------------------------|----------------------------|
| Análise Granulométrica | 1000 |
| Massa Específica dos Grãos | 500 |
| Teor de Umidade | 30 |
| Limites de Liquidez e Plasticidade | 200 |

Fonte: Autor (2022)

Como mencionado anteriormente, essas são as quantidades necessárias após o processo de redução para se obter uma amostra representativa.

3.3 Análise Granulométrica

A metodologia a ser seguida e os aparelhos necessários para a execução desse ensaio são descritos pela ABNT NBR 7181:2018. Como apresentado na Tabela 10, é tomado cerca de 1 kg de material seco em temperatura ambiente, pesado e anotado a massa da amostra (M_t). Esse material é então passado na peneira de 2,0 mm e se necessário, desmanchado no almofariz eventuais torrões existentes, assegurando que somente os grãos maiores fiquem retidos. Além disso, é utilizada a escova com cerdas metálicas para auxiliar a retirada dos grãos retidos nas malhas, sendo usada em todas as etapas de peneiramento.

O material retido na peneira de 2,0 mm é lavado para eliminar os finos aderentes, secado em estufa a 105 ou 110°C até massa constante (M_g) e então usado no peneiramento grosso.

É tomado cerca de 70 g do material que passar na peneira de 2,0 mm no caso de solos siltosos e argilosos, para então fazer o peneiramento fino e sedimentação. Determinado a massa desse material, anotado e tomado ainda cerca de 100 g para três determinações da umidade higroscópica (w) (Figura 9). Em posse desses valores, utiliza-se a Equação 1 para determinar a massa total da amostra seca. Onde a expressão para determinação da umidade (w) é apresentada no item 3.5.

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{(100 + w)} * 100 + M_g \quad (1)$$

Onde:

M_s : Massa total da amostra seca;

M_t : Massa da amostra seca em temperatura ambiente;

M_g : Massa do material seco retido na peneira de 2,0 mm;

w : Umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm.

Figura 9 – Amostra para Sedimentação e determinações de umidade



Fonte: Autor (2022)

O material é então transferido para um Béquer de 250 cm³ e adicionado 125 cm³ do defloculante (hexametáfosfato de sódio), agita-se o béquer para que todo o material fique imerso e então é deixado em repouso por no mínimo 12 horas, apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Amostra imersa no defloculante



Fonte: Autor (2022)

Após esse processo, é vertida a mistura no copo de dispersão e removido com o auxílio de uma bisnaga com água destilada o material que ficar retido no béquer. Então, é adicionado água ao copo de dispersão até pelo menos a metade e agitado mecanicamente por 15 minutos, apresentado na Figura 11.

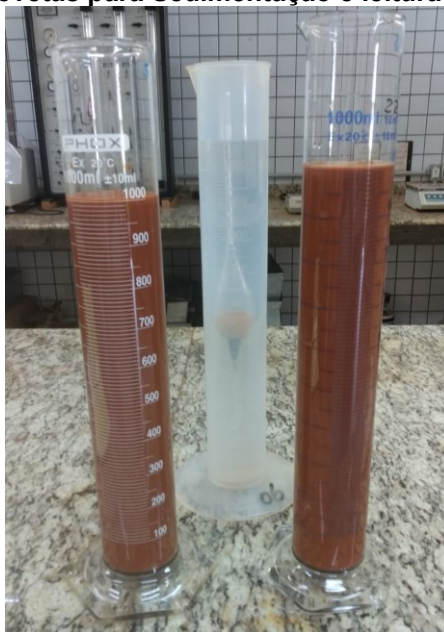
Figura 11 – Amostra no aparelho de dispersão



Fonte: Autor (2022)

É transferido todo o material do copo para uma proveta e adicionado água até a marca correspondente a 1000 cm^3 , apresentado na Figura 12. Essa solução é então agitada manualmente durante 1 minuto e imediatamente após, é mergulhado um densímetro e efetuado leituras correspondentes, inclusive de temperatura, aos tempos de 0,5 min, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, e de 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

Figura 12 – Provetas para Sedimentação e leitura do Densímetro



Fonte: Autor (2022)

Finalizadas as 24 horas, o material é vertido em uma peneira de 0,075 mm e lavado com água potável em pressão baixa, apresentado na Figura 13. O material

retido na peneira é levado para uma estufa à temperatura de 105 a 110 °C até completa secagem. Por fim, foi feito o peneiramento fino e utilizado o agitador mecânico apresentado na Figura 14, passando nas peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, e são anotadas as massas retidas.

Figura 13 – Material retido na peneira de abertura 0,075 mm



Fonte: Autor (2022)

Figura 14 – Peneiramento Fino utilizando o agitador mecânico



Fonte: Autor (2022)

Após todas as medições, através da Equação 2 foi determinada a porcentagem de material em suspensão nos instantes em que foram feitas as leituras.

Do mesmo modo, através da Equação 3 foi calculado o diâmetro máximo das partículas de solo em suspensão.

$$Q_s = N * \frac{\rho_s}{(\rho_s - \rho_{md})} * \frac{V * \rho_{wc}(L - L_d)}{\frac{M_w}{(100 + w)} * 100} \quad (2)$$

Onde:

Q_s : Porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;

V : Volume da proveta igual a 1000 cm³;

N : Porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm;

ρ_s : Massa específica dos grãos do solo, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

ρ_{md} : Massa específica do meio dispersor na temperatura de calibração do densímetro, de 20°C (em g/cm³);

ρ_{wc} : Massa específica da água na temperatura de calibração do densímetro (20°C), utilizando o valor de 1,000 g/cm³;

L : Leitura do densímetro na suspensão;

L_d : Leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura;

M_w : Massa do material úmido submetido à sedimentação (g);

w : Umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \mu}{\rho_s - \rho_{md}} * \frac{z}{t}} \quad (3)$$

Onde:

d : Diâmetro máximo das partículas em suspensão (mm);

μ : Coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura de ensaio, com valores tabelados (em g * s/cm²);

z : Altura de queda das partículas, com resolução de 0,1 cm, correspondente à leitura do densímetro (cm);

t : Tempo de sedimentação (em segundos).

Em posse de todos os valores anotados e calculados foram criadas as Curvas Granulométricas.

3.4 Determinação da Massa Específica dos Grãos

A metodologia a ser seguida e os aparelhos necessários para a execução desse ensaio são descritos pela ABNT NBR 6458:2017 Anexo B. Como apresentado na preparação de amostras e na Tabela 10, é necessário cerca de 500g de material passante pela peneira de 4,8 mm para esse ensaio.

É tomado cerca de 250 g da amostra e homogeneizado, o restante foi utilizado para o segundo ensaio. Pesado uma quantidade em massa seca em torno de 50 g e anotado, quantidade para solos argilosos e siltosos quando o picnômetro utilizado for de 500 cm³, se for de 1000 cm³ a quantidade de material será dobrada.

O material pesado é colocado em cápsula e imerso totalmente em água destilada por 24 horas, como apresentado na Figura 15, o restante do material é utilizado para a determinação da umidade.

Figura 15 – Amostra imersa em água destilada



Fonte: Autor (2022)

Passadas as 24 horas, foi transferida a amostra para o copo de dispersão, adicionado água até metade do volume do copo aproximadamente e dispersado por 15 minutos, como já apresentado na Figura 11. Logo após, a amostra é colocada com auxílio de um funil de vidro no picnômetro. Então, é adicionado água destilada até cerca de metade do volume do picnômetro e aplicado vácuo durante 15 minutos, como apresentado na Figura 16, agitando o picnômetro em intervalos regulares de 3 minutos.

Figura 16 – Aplicação de Vácuo em picnômetros de 1000 cm³ com metade do volume



Fonte: Autor (2022)

Adiciona-se água destilada no picnômetro até cerca de 1 cm abaixo da base do gargalo e então aplicar vácuo novamente por 15 minutos, como apresentado na Figura 17, agitando com cuidado nos mesmos intervalos de tempo.

Figura 17 – Aplicação de Vácuo em picnômetros de 1000 cm³



Fonte: Autor (2022)

Para o caso de solos muito argilosos em que não tenha sido removido todo o ar, os picnômetros são levados para o banho-maria em uma chapa aquecida, como apresentado na Figura 18. A chapa é então desligada e deixado o conjunto em repouso até atingir a temperatura ambiente, normalmente deixa-se de um dia para o outro. Para compensar a evaporação adiciona-se água destilada até preencher o volume dos picnômetros.

Figura 18 – Banho-maria em chapa aquecida



Fonte: Autor (2022)

É pesado o conjunto (picnômetro + solo + água) e anotado, logo em seguida determinada a temperatura do conteúdo do picnômetro e com esse valor obter na curva de calibração correspondente a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência e anotar. Esses valores serão utilizados para o cálculo da massa específica dos grãos, apresentado pela Equação 4.

$$\rho_s = \frac{M_1 * 100 / (100 + w)}{[M_1 * 100 / (100 + w)] + M_3 - M_2} * \rho_{w(T)} \quad (4)$$

Onde:

ρ_s : Massa específica dos grãos do solo (g/cm^3);

M_1 : Massa do solo úmido;

M_2 : Massa do picnômetro + solo + água, à temperatura T de ensaio;

M_3 : Massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, à temperatura T de ensaio;

w: Umidade inicial da amostra

$\rho_{w(T)}$: Massa específica da água, à temperatura T de ensaio.

3.5 Teor de Umidade

A metodologia a ser seguida e os aparelhos necessários para a execução desse ensaio são descritos pela ABNT NBR 6457:2016 Anexo A. Foi tomado uma cápsula com tampa que será utilizada para o ensaio e pesado o conjunto, anotando

esse valor como M_3 , em seguida, como apresentado na Tabela 10, tomado o equivalente a cerca de 30 g de material seco, destorroado, em estado fofo colocado em cápsulas metálicas, pesado e anotado como M_1 . As cápsulas para determinação do teor de umidade são apresentadas na Figura 19.

Figura 19 – Cápsulas para determinação do teor de umidade



Fonte: Autor (2022)

É removida a tampa para a secagem do material e colocada a cápsula na estufa à temperatura de 105 °C a 110 °C por 24 horas, dependendo do tipo de solo e da quantidade de umidade pode ser necessário um intervalo de tempo maior. Então, foi retirada a cápsula da estufa e transferida para o dessecador até atingir a temperatura ambiente, recolocada a tampa, pesado o conjunto e anotado como M_2 . São efetuadas no mínimo três determinações do teor de umidade por amostra, a Equação 5 apresenta o cálculo.

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} * 100 \quad (5)$$

Onde:

w: Umidade da amostra (%);

M_1 : Massa do Conjunto (cápsula + solo úmido) (g);

M_2 : Massa do Conjunto (cápsula + solo seco) (g);

M_3 : Massa da cápsula (g);

O procedimento da determinação do teor de umidade para os ensaios de limite de liquidez e de plasticidade seguem o mesmo método, contudo, a quantidade de material a ser usada é diferente, apresentada anteriormente na Tabela 9.

3.6 Limite de Liquidez

A metodologia a ser seguida e os aparelhos necessários para a execução desse ensaio são descritos pela ABNT NBR 6459:2017. Tomar metade da quantidade da amostra, apresentado na Tabela 10 como sendo cerca de 200 g de material seco, colocar na cápsula de porcelana e adicionar água destilada aos poucos, mexendo continuamente com auxílio de uma espátula, de modo a obter uma pasta homogênea, sendo o tempo de mistura variando entre 15 e 30 minutos de acordo com o teor de argila presente no solo.

Parte da mistura é então transferida para a concha de latão, formando uma parte central com espessura de aproximadamente 10 mm, apresentado na Figura 20. Com o cinzel, dividir a massa do solo em duas partes, fazendo-se uma ranhura do centro à parte inferior, como apresentado na Figura 21.

Figura 20 – Amostra colocada na concha de latão



Fonte: Autor (2022)

Figura 21 – Ranhura feita na Amostra

Fonte: Autor (2022)

Feita a ranhura, é girada a manivela, golpeando a concha contra a base do aparelho e anotado o número de golpes para que a ranhura se feche ao longo de aproximadamente 13 mm de comprimento, como apresentado na Figura 21. Essa parte do solo que se uniu é retirada e colocada em um recipiente para fazer a determinação da umidade.

Figura 22 – Fechamento da ranhura após golpes

Fonte: Autor (2022)

A mistura é transferida de volta à capsula de porcelana e adiciona-se água à amostra, homogeneizando por no mínimo 3 minutos, além de lavar e secar a concha e o cinzel. Parte da mistura é colocada novamente na concha e refeito o processo para obtenção do teor de umidade e do número de golpes. Esses processos são

repetidos até se obter pelo menos mais três pontos de ensaio dentro do intervalo de 15 a 35 golpes.

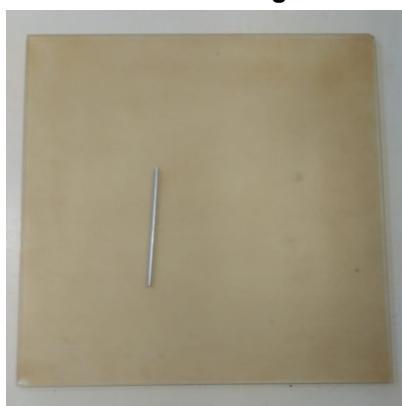
O limite de liquidez vai ser o valor do teor de umidade correspondente a 25 golpes, sendo obtido através de um gráfico que relaciona o teor de umidade com o número de golpes e uma reta ajustada aos pontos.

3.7 Limite de Plasticidade

A metodologia a ser seguida e os aparelhos necessários para a execução desse ensaio são descritos pela ABNT NBR 7180:2016. Foi tomado cerca de metade da quantidade dos 200 g, como apresentada na Tabela 10, colocado na cápsula de porcelana e adicionado água destilada aos poucos, mexendo com auxílio de uma espátula, até se obter uma pasta homogênea de consistência plástica, sendo de 15 a 30 minutos o intervalo de tempo de acordo com o teor de argila presente no solo.

Então, é tomado cerca de 10 g da amostra e formado uma pequena bola, rolando com a palma da mão sobre uma placa de vidro com o objetivo de formar um cilindro com dimensões de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, conforme gabarito. Se a amostra se fragmentar antes, retornar à cápsula e adicionar água destilada, homogeneizando por no mínimo 3 minutos e então é repetido o processo. A Figura 23 apresenta a placa de vidro e o gabarito cilíndrico para o ensaio.

Figura 23 – Placa de vidro e gabarito cilíndrico

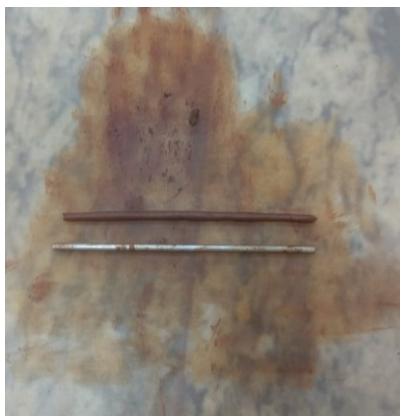


Fonte: Autor (2022)

Se a amostra atingir as dimensões solicitadas sem se fragmentar, amassar o material e repetir o procedimento, tomando 10 g da amostra novamente até o momento em que o cilindro se fragmentar ao atingir as dimensões solicitadas, como

apresentado na Figura 24. Nesse momento é transferido imediatamente para um recipiente adequado para fazer a determinação da umidade.

Figura 24 – Amostra em comparação com o gabarito



Fonte: Autor (2022)

O processo todo é repetido até se obter pelo menos três valores de umidade, no qual o resultado final é a média de pelo menos três valores, sendo considerados satisfatórios os valores obtidos quando não diferem mais que 5% dessa média.

Após realizados os ensaios e cálculos dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) do solo, é efetuado então o cálculo do Índice de Plasticidade (IP) através da Equação 6.

$$IP = LL - LP \quad (6)$$

Esse valor foi utilizado na definição do grau de plasticidade do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios de granulometria, massa específica dos grãos e limites de Atterberg para as amostras de solo analisadas. Além disso, esses resultados foram compilados juntamente com os dados apresentados anteriormente de outros trabalhos.

Com o objetivo de facilitar a análise e compreensão dos dados compilados nas tabelas que serão apresentadas posteriormente, são identificados e enumerados a seguir cada trabalho e amostras analisadas. Os trabalhos com identificação de 1 a 5 foram realizados por diferentes autores, enquanto os com identificação de 6 a 10, foram realizados pelo autor desse trabalho.

1: Trabalho: Análise da interação solo-estrutura aplicada às fundações profundas na região oeste do Paraná (FREIRES, 2016).

2: Trabalho: Verificação do fenômeno do colapso em um solo típico de Toledo – PR (CATANEO, 2017).

3: Trabalho: Estudo experimental do solo do município de Toledo para aplicação na sub-base de um pavimento (SCHÖLER, 2018).

4: Trabalho: Estudo da influência da cal hidratada nas propriedades físicas e na compactação do solo (LEITE, 2018).

5: Trabalho: Estudo do melhoramento do solo de fundação com adição de pó de vidro silicato (WURZIUS, 2018).

6: Amostra 1 “P-01”: Coletada no campus da UTFPR Toledo – Profundidade 2 metros. Coordenadas: -24.733434, -53.764858.

7: Amostra 2 “P-02”: Coletada na região do Jardim Coopagro – Profundidade 4 metros. Coordenadas: -24.713241, -53.770184.

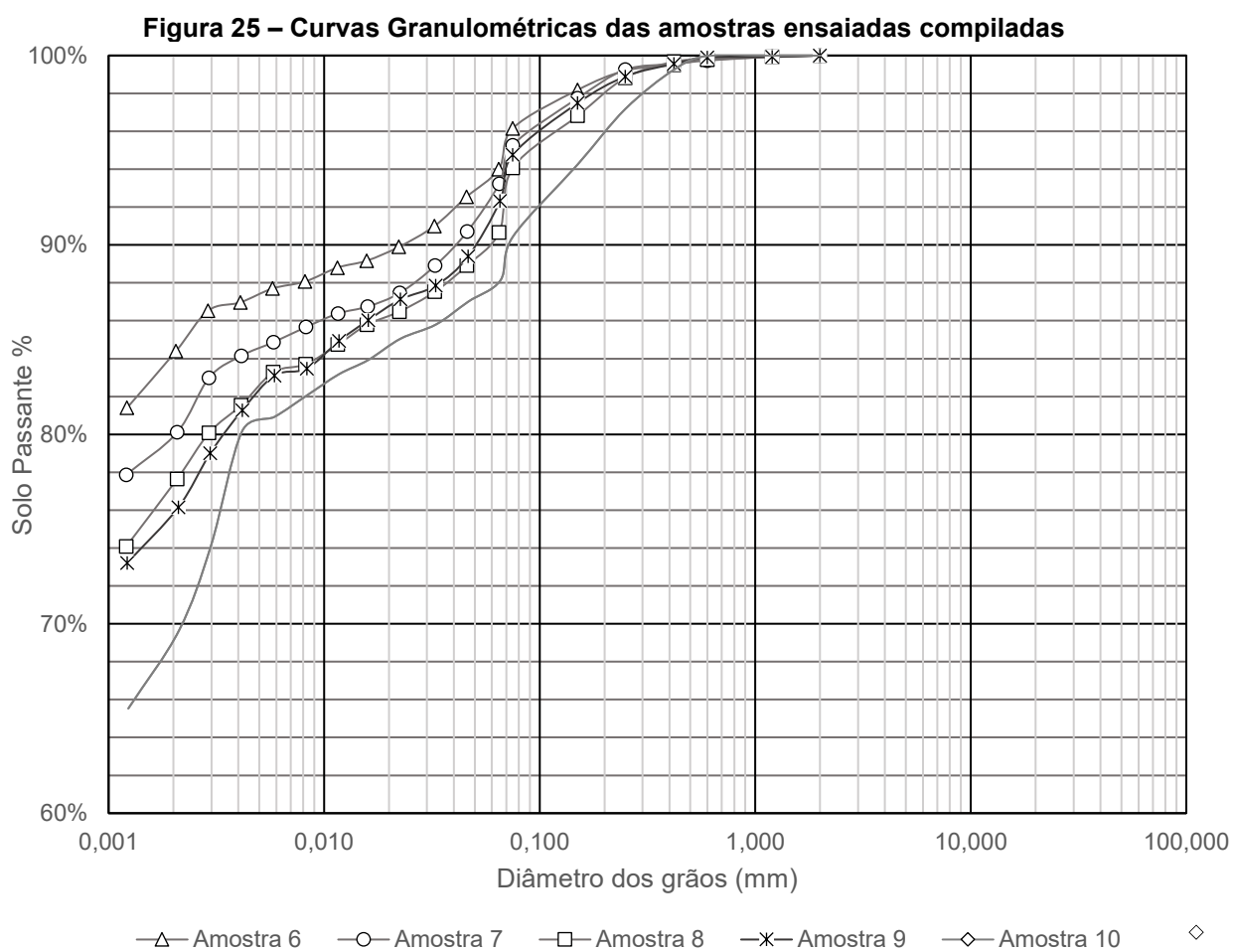
8: Amostra 3 “P-03”: Coletada na região do Jardim Gisela – Profundidade 4 metros. Coordenadas: -24.709550, -53.729424.

9: Amostra 4 “P-04”: Coletada próximo ao campus da PUCPR Toledo – Profundidade 14 metros (Fornecida pela empresa Fundati – Engenharia Geotécnica). Coordenadas: -24.72986424186215, -53.76873498632755.

10: Amostra 5 “P-05”: Coletada próximo ao campus da PUCPR Toledo – Profundidade 15 metros (Fornecida pela empresa Fundati – Engenharia Geotécnica). Coordenadas: -24.72986424186215, -53.76873498632755.

4.1 Resultados Compilados da Análise Granulométrica

A seguir são apresentadas na Figura 25 as Curvas Granulométricas referentes a cada amostra analisada em laboratório (6 a 10) para fins de comparação. Já a Tabela 11 apresenta todos os dados compilados, tanto dos trabalhos citados quanto das amostras analisadas.



Fonte: Autor (2022)

Tabela 11 – Resultados compilados da distribuição granulométrica do solo

| Identificação | Argila (%) | Silte (%) | Areia (%) | | | Pedregulho Fino (%) |
|---------------|------------|-----------|-----------|-------|--------|---------------------|
| | | | Fina | Média | Grossa | |
| 1 - (FREIRES) | 79,31 | 11,75 | 6,61 | 1,69 | 0,62 | 0,02 |
| 2 - (CATANEO) | 80,00 | 12,00 | 6,00 | 2,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 - (SCHÖLER) | 75,13 | 16,09 | 4,69 | 3,32 | 0,77 | 0,00 |
| 4 - (LEITE) | 76,00 | 12,00 | 8,00 | 2,00 | 2,00 | 0,00 |
| 5 - (WURZIUS) | 78,00 | 14,00 | 5,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 84,09 | 10,19 | 4,07 | 1,16 | 0,44 | 0,05 |
| 7 | 79,88 | 12,10 | 6,52 | 1,06 | 0,38 | 0,06 |
| 8 | 77,41 | 12,38 | 8,03 | 1,85 | 0,26 | 0,07 |
| 9 | 75,91 | 14,94 | 7,34 | 1,37 | 0,36 | 0,08 |
| 10 | 69,16 | 18,41 | 8,15 | 3,54 | 0,74 | 0,00 |

Fonte: Autor (2022)

Analisando os resultados obtidos, nota-se que os valores encontrados através dos ensaios (6 a 10) tiveram pequena variação em relação ao que era esperado para os teores de argila (70 a 80%). Sendo que todos apresentaram teores muito elevados de argila no solo, variando entre 69 e 85%, seguidos respectivamente de pequena parte composta por silte, de 10 a 20%, areia fina, inferior a 10%, e areia média, grossa e pedregulho, estes últimos em parcelas muito pequenas ou até mesmo nulas.

Durante os ensaios também foram encontrados pequenos grãos de Quartzo, sendo esses, os grãos que normalmente ficavam retidos na peneira de abertura 2 mm.

Ao analisar os valores extremos, o número 6, amostra com cerca de 2 metros de profundidade, apresentou teor de argila pouco superior aos 80%, com aproximadamente 4% para cima, já a respeito do número 10, amostra de solo coletada com profundidade de 15 metros, foi o único que apresentou valor levemente inferior a 70%, reduzindo aproximadamente 1%, elevando um pouco a proporção das outras granulometrias. Além disso, esse fato pode ter influenciado nos resultados da Massa específica dos grãos e Limites de Atterberg, que serão apresentados e comentados nos tópicos 4.2 e 4.3.

Em geral, pode-se afirmar que os valores obtidos para a Análise Granulométrica foram satisfatórios, caracterizando este solo como um Solo Argiloso.

4.2 Resultados Compilados da Massa Específica dos Grãos

A Tabela 12 apresenta os valores compilados dos trabalhos e amostras analisadas com relação aos valores da massa específica dos grãos. As informações necessárias para efetuar os cálculos dos números 6, 7, 8, 9 e 10 são apresentados no Apêndice A.

Tabela 12 – Resultados compilados da massa específica dos grãos

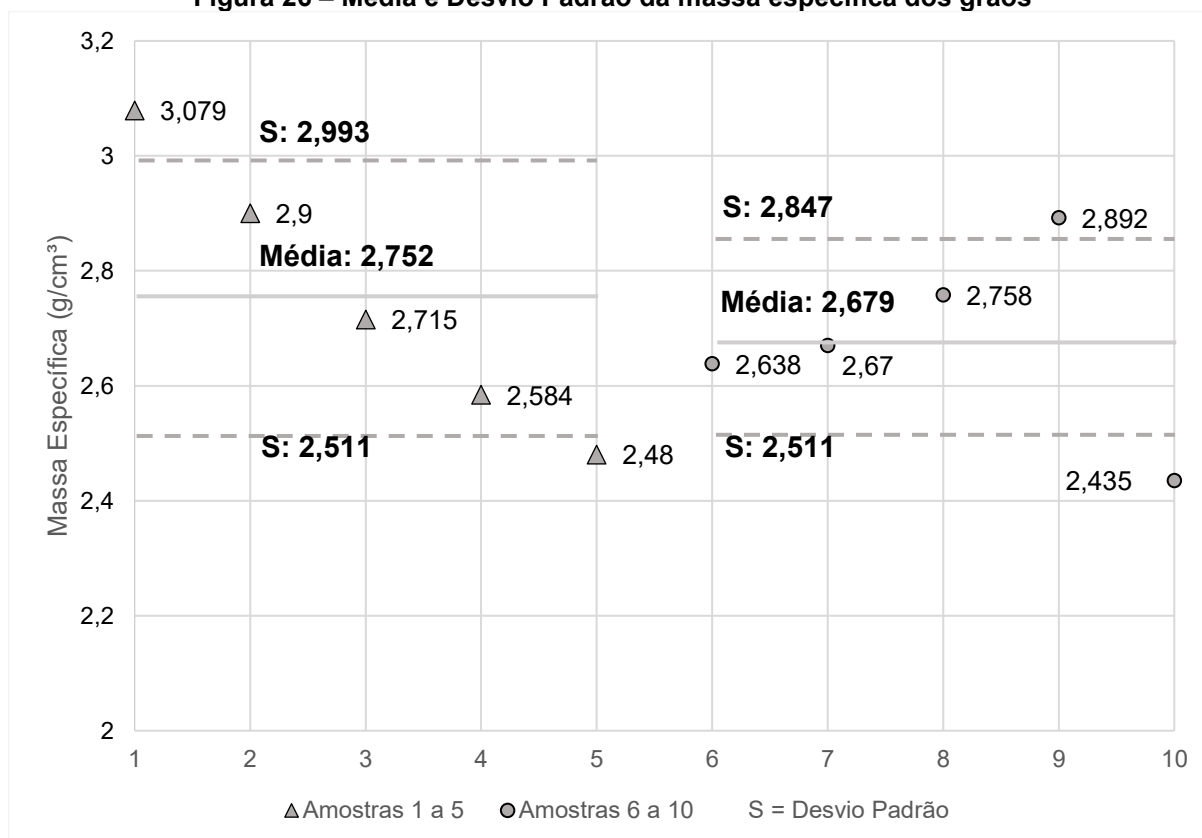
| Identificação | ρ_s 1 (g/cm ³) | ρ_s 2 (g/cm ³) | ρ_s 3 (g/cm ³) | ρ_s final (g/cm ³) |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1 - (FREIRES) | 3,081 | 3,078 | - | 3,079 |
| 2 - (CATANEO) | 2,910 | 2,890 | - | 2,900 |
| 3 - (SCHÖLER) | 2,717 | 2,712 | - | 2,715 |
| 4 - (LEITE) | 2,585 | 2,583 | 2,584 | 2,584 |
| 5 - (WURZIUS) | 2,480 | - | - | 2,480 |
| 6 | 2,639 | 2,636 | - | 2,638 |
| 7 | 2,663 | 2,677 | - | 2,670 |
| 8 | 2,753 | 2,762 | - | 2,758 |
| 9 | 2,893 | 2,891 | - | 2,892 |
| 10 | 2,437 | 2,433 | - | 2,435 |

Fonte: Autor (2022)

Visualizando os dados apresentados é possível perceber uma certa variação nos resultados, não apresentando um padrão aparente. Sendo que, como mencionado anteriormente, esses valores podem ser influenciados pela presença de minérios pesados na amostra, elevando os valores da massa específica ou então reduzindo esses valores na presença de matéria orgânica. Além disso, como mencionado, os resultados de identificação 1 a 5 foram conduzidos por diferentes operadores, já os de 6 a 10 foram conduzidos pelo Autor.

Com isso, foi criada a Figura 30 de modo a apresentar separadamente a média e desvio padrão dos resultados encontrados na literatura em comparação com os resultados encontrados através dos ensaios.

Figura 26 – Média e Desvio Padrão da massa específica dos grãos



Fonte: Autor (2022)

Para os resultados de 1 a 5, com desvio padrão de 0,241, houve uma maior dispersão dos dados se comparados com os de 6 a 10, que apresentaram desvio padrão de 0,168. Os possíveis motivos para isso referem-se justamente ao fato de terem sido desenvolvidos por diferentes operadores, podendo ou não ocorrer erros durante a realização, ou então pela própria coleta da amostra, de modo que o local interfira diretamente no resultado, principalmente se não for evitada a camada superficial do solo, que costuma conter maior quantidade de matéria orgânica por exemplo.

Ao analisar as amostras que foram ensaiadas em laboratório, especificamente as com identificação 6, 7 e 8, estas que se referem a amostras de 2 a 4 metros de profundidade, pode-se notar que os valores foram satisfatórios e diferem pouco entre si. Por outro lado, as amostras com identificação 9 e 10 referentes às profundidades de 14 e 15 metros respectivamente, apresentaram uma diferença significativa entre seus valores, que foi de 0,457 g/cm³. Fato interessante a apontar por conta da proximidade entre as profundidades coletadas, o que fortalece a ideia de que deve sempre ser feita uma boa investigação do subsolo devido à incerteza dos materiais presentes nessas camadas mais profundas.

Ainda assim, com exceção da amostra número 10, que apresentou valor consideravelmente inferior, de $2,435 \text{ g/cm}^3$, as demais se apresentam dentro do intervalo esperado para a massa específica dos solos, que como já mencionado, costuma variar de 2,6 a $2,9 \text{ g/cm}^3$. Isso pode ter acontecido devido a erros de execução do ensaio, perda de material da amostra durante a realização por conta de impregnações nos aparelhos, e a presença de matéria orgânica ou então compostos mais leves na amostra, mesmo que em pequenas quantidades.

De todo modo, os resultados a respeito da massa específica dos grãos tiveram dispersão considerável, principalmente para fins de comparação entre eles, o ensaio de Freires, por apresentar valor mais alto do que solos normalmente apresentam, com $0,179 \text{ g/cm}^3$ superior ao esperado. Já para os de Wurzius e a amostra 10, estes apresentaram valores consideravelmente inferiores aos esperados, de 0,12 e $0,165 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, mesmo com todos apresentando granulometria semelhante. Ainda, o trabalho de Leite também apresentou valor inferior, contudo, esse foi levemente abaixo do esperado, de apenas $0,016 \text{ g/cm}^3$.

4.3 Resultados Compilados dos Limites de Atterberg

A seguir são apresentados na Tabela 13 os dados de Limites de Liquidez e Plasticidade do solo, bem como os valores referentes ao Índice de Plasticidade e devida classificação. Além disso, para as identificações 6, 7, 8, 9 e 10, os gráficos e as informações necessárias para criá-los, bem como realizar os cálculos, são apresentados no Apêndice A, junto às informações referentes ao cálculo da Massa Específica dos grãos.

Tabela 13 – Resultados compilados dos limites de Atterberg

| Identificação | LL (%) | LP (%) | IP (%) | Definição |
|---------------|--------|--------|--------|---------------------|
| 1 - (FREIRES) | 61 | 51 | 10 | Mediamente Plástico |
| 2 - (CATANEO) | 55 | 42 | 13 | Mediamente Plástico |
| 3 - (SCHÖLER) | 56 | 44 | 12 | Mediamente Plástico |
| 4 - (LEITE) | 52 | 32 | 20 | Muito Plástico |
| 5 - (WURZIUS) | 58 | 40 | 18 | Muito Plástico |
| 6 | 58 | 30 | 28 | Muito Plástico |
| 7 | 55 | 31 | 24 | Muito Plástico |
| 8 | 53 | 28 | 25 | Muito Plástico |
| 9 | 105 | 82 | 23 | Muito Plástico |
| 10 | 100 | 86 | 14 | Mediamente Plástico |

Fonte: Autor (2022)

As amostras de identificação 9 e 10 serão comentadas mais adiante, de modo que todas as outras apresentaram pouca variação para os teores de umidade no Limite de Liquidez, com média de 56% e variando menos de 5% para mais e para menos. Quanto ao Limite de Plasticidade, esse pode ser considerado com maior proporção de divergência, com média de 37% e variando até 14% para mais e 9% para menos, e muito possivelmente deve-se ao fato de ser um ensaio extremamente manual e depender diretamente do operador.

O ensaio para o Limite de Plasticidade requer muitos cuidados na realização e muitas vezes é necessário repetir o processo várias vezes até se obter o cilindro com as dimensões requeridas. Isso acontece pois qualquer alteração na força e pequenos movimentos descoordenados podem apresentar a “quebra” do material, desse modo dando a impressão de que necessita de mais água para atingir o ponto ideal, e assim, elevando o teor de umidade.

Além disso, outro ponto importante já mencionado que pode influenciar no LP é a matéria orgânica, que eleva os valores de LP sem elevar os valores de LL, de modo que a diferença entre eles seja menor, resultando em um Solo aparentemente menos plástico do que deveria ser. Esse fato é comprovado principalmente em solos com alto teor de argila, que costumam apresentar características altamente plásticas.

Com isso, analisando os valores apresentados para o LP e IP, pode-se perceber certa variação, sendo que essa pode ser em decorrência dos fatores citados ou até mesmo da amostra selecionada para o ensaio. Entretanto, em geral, os solos apresentaram boa trabalhabilidade e alta plasticidade.

Quanto às amostras de identificação 9 e 10, estas foram obtidas em pequenas quantidades, retiradas de um amostrador SPT, de modo que a princípio seriam realizados apenas os ensaios de Granulometria e Massa específica dos grãos. Posteriormente, por apresentar algumas diferenças em relação as outras amostras analisadas, principalmente na coloração, foi analisada a possibilidade de reutilizar o material da massa específica através da secagem em estufa e destorroamento para a realização dos Limites de Atterberg.

Após esse processo para a reutilização, ao longo dos ensaios eram perceptíveis algumas diferenças em relação às amostras de profundidades menores, principalmente por apresentar maior dificuldade e demora para ocorrer a coesão dos grãos. Fato comprovado por apresentaram teores muito elevados de umidade tanto para o LL, quanto para o LP, que pode ter sido influenciado pela reutilização do material através da secagem em estufa, mas que apesar disso, ainda apresentavam boa trabalhabilidade e plasticidade, muito provavelmente em decorrência dos altos teores de argila presentes nas amostras.

Por fim, a amostra de número 10, que apresentou os menores valores para o teor de argila no solo, elevando os teores das outras granulometrias, apresentou também a menor massa específica dos grãos, que, pode ter sido causada pela possível presença de matéria orgânica na amostra. Essa constatação pode ainda ser evidenciada por ter elevado os valores do LP, sem elevar os valores de LL, dessa forma, reduzindo o Índice de Plasticidade e classificando o solo como Mediamente Plástico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da realização dos ensaios de caracterização do solo foi possível identificar e entender melhor o tipo de solo existente na cidade de Toledo-PR, este que pode ser definido como um solo Argiloso de plasticidade média a alta.

De modo geral, o resultado da granulometria para todas as amostras, tanto rasas quanto profundas, foi satisfatório, inclusive, algo interessante a notar é que até mesmo os solos profundos apresentaram granulometria dentro dos valores esperados. Entretanto, quanto à massa específica e o teor de umidade para os limites de Atterberg, os valores são significativamente diferentes.

Para a massa específica dos grãos, os valores apresentaram certa variação, dentre eles, os que resultaram em valores fora dos limites esperados para solos foram o trabalho de Freires (2016), com valor superior, e os de Leite (2018), Wurzius (2018) e a amostra 10, que apresentaram valores inferiores.

Quanto aos limites de Atterberg, os solos mais rasos apresentaram valores similares para o Limite de Liquidez e dispersaram um pouco no Limite de plasticidade, porém, se apresentaram como solos com boa trabalhabilidade e de plasticidade média a alta. Já os solos mais profundos apresentaram maior dificuldade para atingir a coesão entre as partículas e resultaram em teores de umidade bem elevados para se atingir os pontos necessários para os ensaios.

Outro ponto importante analisado foi a possível presença de matéria orgânica na amostra de identificação 10, com profundidade de 15 metros, essa que apresentou massa específica abaixo do esperado, bem como limite de plasticidade elevado em relação ao limite de liquidez, reduzindo o valor do índice de plasticidade e consequentemente sendo classificado como solo mediamente plástico.

Esse último ponto ressalta a importância e a necessidade de um bom estudo e sondagem do solo com o qual será trabalhado, visto que a amostra coletada com 14 metros de profundidade apresentou valores consideravelmente diferentes. Por esse motivo, através de um bom estudo a respeito do solo será possível identificar a presença de matéria orgânica ou outros materiais presentes que alterem as propriedades do solo, e assim, evitando eventuais problemas, como por exemplo o recalque.

Visto que ainda são poucos os estudos encontrados nessa área, recomenda-se para futuros trabalhos analisar outros pontos de Toledo, comparando dados e analisando possíveis relações ou diferenças entre as profundidades do solo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Gil Carvalho Paulo de. **Caracterização física e classificação dos solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/solos/livros/CARACTERIZACAO%20FISICA%20E%20CLASSIFICACAO%20DOS%20SOLOS.pdf>. Acesso em: 29 abril 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 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: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise granulométrica, Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BARNES, Graham. **Mecânica dos Solos – Princípios e Práticas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CATANEO, Marylise. **Verificação do fenômeno do colapso em um solo típico de Toledo-PR**. 2017. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017.
- DAS, Braja; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2019.
- DAS, Braja. **Princípios da engenharia de fundações**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016.
- DIRKSEN, Sophia Scharf. **Caracterização e classificação de solos da Bacia do Rio Pirai nas adjacências da área de implantação do campus da UFSC Joinville**. 2018. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Aspectos Agro e Zoocológicos. **Processo de formação do solo**. 2002. Disponível em:

<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Leite/LeiteCerrado/aspetos/processo.html>. Acesso em: 26 abril 2022.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF, 2018.

FREIRES, Lucas Santti. **Análise da interação solo-estrutura aplicada às fundações profundas na região oeste do Paraná**. 2016. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2016.

KER, João Carlos. Latossolos do Brasil: Uma Revisão. **Revista Geonomos**, Viçosa, v.5, n.1, p. 17-40, julho. 1997.

LEITE, Alexandre Haag. **Estudo da influência da cal hidratada nas propriedades físicas e na compactação do solo**. 2018. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, Jaime Alberto dos. **Ensaio de caracterização em solos**. Capítulo 2, 2002. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/jaime.santos/capitulo2.pdf>. Acesso em: 30 abril 2022.

SCHÖLER, Guilherme Giovane. **Estudo experimental do solo do município de Toledo para aplicação na sub-base de um pavimento**. 2018. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

SOUZA, Cristiano Márcio Alves de Souza; RAFUL, Leidy Zulys Leyva; VIEIRA, Luciano Baião. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, dez. 2000.

UFPR (Universidade Federal do Paraná); EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária); LMA (Laboratório de Monitoramento Ambiental). Programa Solo na Escola. **Mapa Simplificado de Solos do estado do Paraná**. 2012. Disponível em: http://www.escola.agrarias.ufpr.br/arquivospdf/mapa_solos_pr.pdf. Acesso em: 26 abril 2022.

UFPR (Universidade Federal do Paraná); SBCS (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo). Programa Solo na Escola. **Conhecendo os principais solos do Paraná: Abordagem para professores do ensino fundamental e médio**. 2012. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/janeiro2013/geografia_artigos/cartilha_principais_solos_parana_Final.pdf. Acesso em: 26 abril 2022.

WURZIUS, Jennifer Amanda Lamera. **Estudo do melhoramento do solo de fundação com adição de pó de vidro de silicato**. 2018. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

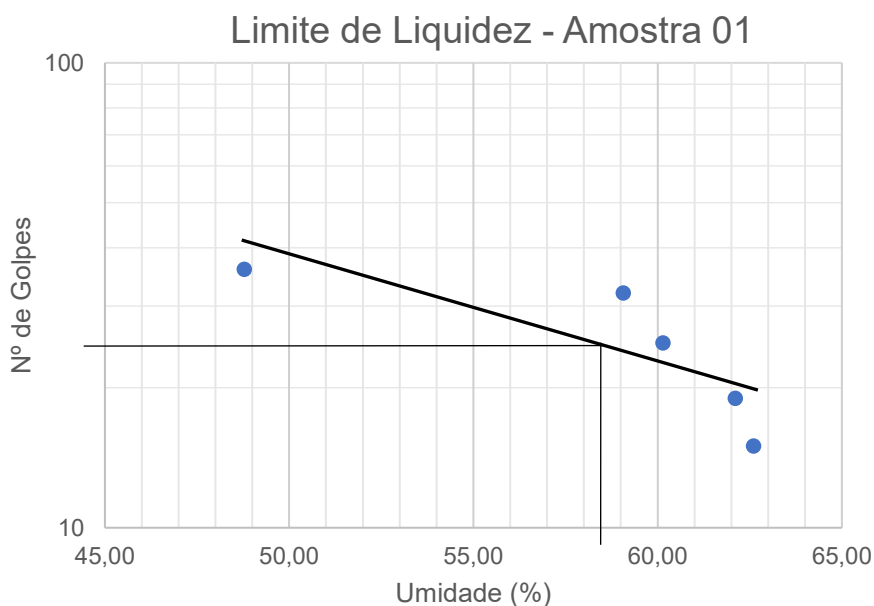
**APÊNDICE A - Informações e Determinações da Massa específica dos grãos e
Limites de Liquidez e Plasticidade**

Amostra: 01 – Profundidade: 02 metros – Identificação: 06

| Massa Específica dos Grãos - Amostra 01 | | | |
|--|----------|----------|--------------|
| Massa Solo Úmido (g) | 49,910 | 50,590 | |
| Massa do Picnômetro + Solo + água (g) | 1198,360 | 1210,810 | |
| Temperatura (°C) | 21,000 | 21,000 | |
| Massa do Picnômetro com água (g) | 1171,037 | 1183,129 | |
| Umidade Inicial (%) | 13,580 | 13,580 | |
| Massa Especifica da água (g/cm³) | 0,998 | 0,998 | |
| ρ_s (g/cm³) | 2,6388 | 2,6364 | 2,638 |

| Limite de Plasticidade - Amostra 01 | | | |
|--|-----------------|----------------|-------------|
| Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 9,42 | 10,98 | 10,65 | 26,83 |
| 10 | 11,83 | 11,37 | 33,58 |
| 9,5 | 11,45 | 11 | 30,00 |
| | | | 30 |

| Limite de Liquidez - Amostra 01 | | | | |
|--|------------------|-----------------|----------------|-------------|
| Nº de Golpes | Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 36 | 10,1 | 16,2 | 14,2 | 48,78 |
| 32 | 8,65 | 13,74 | 11,85 | 59,06 |
| 25 | 8,89 | 15,52 | 13,03 | 60,14 |
| 19 | 9,2 | 15,36 | 13 | 62,11 |
| 15 | 8,71 | 16,45 | 13,47 | 62,61 |
| | | | | 58 |



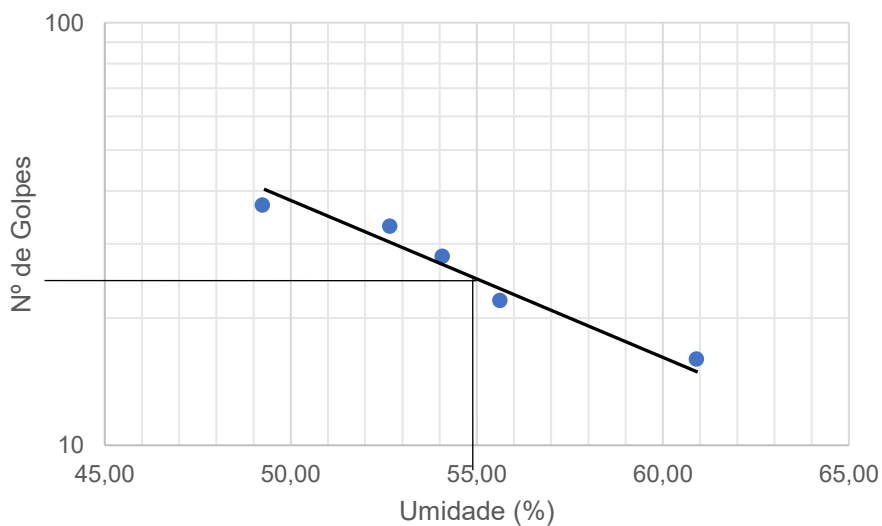
Amostra: 02 – Profundidade: 04 metros – Identificação: 07

| Massa Específica dos Grãos - Amostra 02 | | | |
|--|----------|----------|--------------|
| Massa Solo Úmido (g) | 49,530 | 51,350 | |
| Massa do Picnômetro + Solo + água (g) | 1218,060 | 1172,480 | |
| Temperatura (°C) | 22,000 | 22,000 | |
| Massa do Picnômetro com água (g) | 1190,050 | 1143,350 | |
| Umidade Inicial (%) | 10,574 | 10,574 | |
| Massa Especifica da água (g/cm³) | 0,9978 | 0,9978 | |
| ρ_s (g/cm³) | 2,6630 | 2,6770 | 2,670 |

| Limite de Plasticidade - Amostra 02 | | | |
|--|-----------------|----------------|-------------|
| Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 9,32 | 11,26 | 10,82 | 29,33 |
| 8,98 | 10,85 | 10,42 | 29,86 |
| 9,02 | 11 | 10,5 | 33,78 |
| | | | 31 |

| Limite de Liquidez - Amostra 02 | | | | |
|--|------------------|-----------------|----------------|-------------|
| Nº de Golpes | Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 37 | 9,97 | 15,82 | 13,89 | 49,23 |
| 33 | 8,57 | 14,02 | 12,14 | 52,66 |
| 28 | 10,24 | 16,11 | 14,05 | 54,07 |
| 22 | 8,88 | 14,28 | 12,35 | 55,62 |
| 16 | 9,02 | 15,81 | 13,24 | 60,90 |
| | | | | 55 |

Limite de Liquidez - Amostra 02



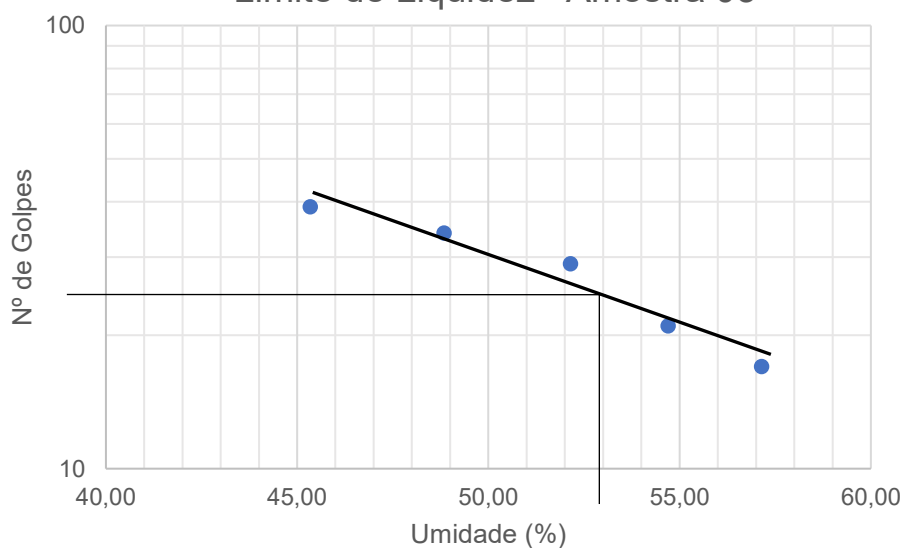
Amostra: 03 – Profundidade: 04 metros – Identificação: 08

| Massa Específica dos Grãos - Amostra 03 | | | |
|--|----------|----------|--------------|
| Massa Solo Úmido (g) | 50,120 | 51,730 | |
| Massa do Picnômetro + Solo + água (g) | 1201,220 | 1205,530 | |
| Temperatura (°C) | 22,000 | 22,000 | |
| Massa do Picnômetro com água (g) | 1170,835 | 1174,116 | |
| Umidade Inicial (%) | 5,175 | 5,175 | |
| Massa Especifica da água (g/cm³) | 0,9978 | 0,9978 | |
| ρ_s (g/cm³) | 2,7534 | 2,7616 | 2,758 |

| Limite de Plasticidade - Amostra 03 | | | |
|--|-----------------|----------------|-------------|
| Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 9,61 | 11,39 | 11,01 | 27,14 |
| 9,5 | 11,41 | 10,99 | 28,19 |
| 9,8 | 12,04 | 11,53 | 29,48 |
| | | | 28 |

| Limite de Liquidez - Amostra 03 | | | | |
|--|------------------|-----------------|----------------|-------------|
| Nº de Golpes | Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 39 | 10,02 | 14,86 | 13,35 | 45,35 |
| 34 | 9,23 | 14,35 | 12,67 | 48,84 |
| 29 | 8,71 | 14,02 | 12,2 | 52,15 |
| 21 | 8,66 | 14,09 | 12,17 | 54,70 |
| 17 | 9,78 | 15,06 | 13,14 | 57,14 |
| | | | | 53 |

Limite de Liquidez - Amostra 03

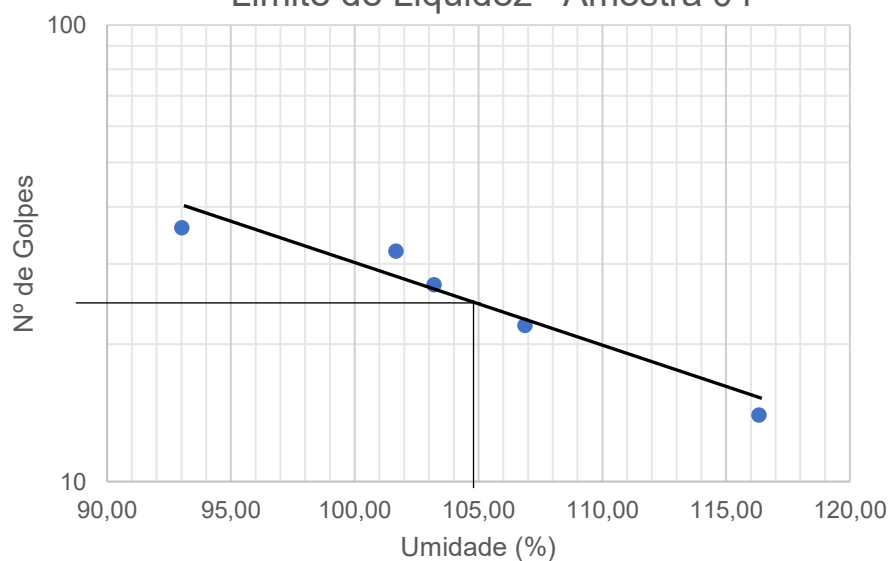


Amostra: 04 – Profundidade: 14 metros – Identificação: 09

| Massa Específica dos Grãos - Amostra 04 | | | |
|--|----------|----------|--------------|
| Massa Solo Úmido (g) | 48,680 | 50,650 | |
| Massa do Picnômetro + Solo + água (g) | 1220,950 | 1175,500 | |
| Temperatura (°C) | 22,000 | 22,000 | |
| Massa do Picnômetro com água (g) | 1190,050 | 1143,350 | |
| Umidade Inicial (%) | 3,186 | 3,186 | |
| Massa Especifica da água (g/cm ³) | 0,9978 | 0,9978 | |
| ρ_s (g/cm ³) | 2,8920 | 2,8919 | 2,892 |

| Limite de Plasticidade - Amostra 04 | | | |
|--|-----------------|----------------|-------------|
| Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 9,41 | 11,45 | 10,52 | 83,78 |
| 8,69 | 9,85 | 9,34 | 78,46 |
| 9,61 | 11,11 | 10,42 | 85,19 |
| | | | 82 |

| Limite de Liquidez - Amostra 04 | | | | |
|--|------------------|-----------------|----------------|-------------|
| Nº de Golpes | Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 36 | 9,01 | 13,43 | 11,3 | 93,01 |
| 32 | 9,44 | 13,07 | 11,24 | 101,67 |
| 27 | 9,23 | 13,03 | 11,1 | 103,21 |
| 22 | 8,65 | 13,16 | 10,83 | 106,88 |
| 14 | 9,8 | 12,98 | 11,27 | 116,33 |
| | | | | 105 |

Limite de Liquidez - Amostra 04

Amostra: 05 – Profundidade: 15 metros – Identificação: 10

| Massa Específica dos Grãos - Amostra 05 | | | |
|--|----------|----------|--------------|
| Massa Solo Úmido (g) | 48,600 | 50,170 | |
| Massa do Picnômetro + Solo + água (g) | 1198,650 | 1202,800 | |
| Temperatura (°C) | 22,000 | 22,000 | |
| Massa do Picnômetro com água (g) | 1170,835 | 1174,116 | |
| Umidade Inicial (%) | 3,186 | 3,186 | |
| Massa Especifica da água (g/cm³) | 0,9978 | 0,9978 | |
| ρ_s (g/cm³) | 2,4370 | 2,4333 | 2,435 |

| Limite de Plasticidade - Amostra 05 | | | |
|--|-----------------|----------------|-------------|
| Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 8,98 | 11,15 | 10,15 | 85,47 |
| 8,98 | 11,32 | 10,23 | 87,20 |
| 9,68 | 11,43 | 10,63 | 84,21 |
| | | | 86 |

| Limite de Liquidez - Amostra 05 | | | | |
|--|------------------|-----------------|----------------|-------------|
| Nº de Golpes | Peso Cápsula (g) | Massa Total (g) | Massa Seca (g) | Umidade (%) |
| 38 | 9,41 | 13,82 | 11,74 | 89,27 |
| 28 | 9,5 | 13,78 | 11,65 | 99,07 |
| 22 | 8,66 | 13,93 | 11,26 | 102,69 |
| 20 | 8,75 | 13,31 | 10,98 | 104,48 |
| 16 | 10,31 | 16,05 | 13,08 | 107,22 |
| | | | | 100 |

