

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL - GUARAPUAVA  
ENGENHARIA CIVIL**

**GUILHERME ALVES BONIFÁCIO**

**PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE UM SOLO RESIDUAL DE  
BASALTO NA REGIÃO DE GUARAPUAVA - PR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2021**

**GUILHERME ALVES BONIFÁCIO**

**PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE UM SOLO RESIDUAL DE  
BASALTO NA REGIÃO DE GUARAPUAVA - PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Marcela Maier Farias Czap

**GUARAPUAVA**

**2021**

## **ATA DE DEFESA**

Realizou-se no dia **17**, de **maio** de 2021, às **14 h 00 min**, no Campus Guarapuava da UTFPR, a defesa Trabalho de Conclusão de Curso, como requisito parcial para aprovação do aluno **Guilherme Alves Bonifácio**, na disciplina de TCC2 do Curso de Engenharia Civil intitulado: **Propriedades Geotécnicas de um solo residual de basalto na região de Guarapuava-PR.**

A Banca foi composta pelo Presidente:

**Marcela Maier Faria Czap** (Orientador), e pelos seguintes membros:

**Jean Lucas dos Passos Belo**

**Rodrigo Scoczynski Ribeiro**

Guarapuava, 17 de maio de 2021.

Dedico este trabalho à minha família,  
pelos momentos de ausência e pelo apoio  
durante essa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço à minha orientadora Prof. Msc. Marcela Maier Farias Czap, pelo apoio essencial e pela sabedoria com que me guiou desde o início nesta trajetória.

Ao Tiago de Rocco Czap, pela grande ajuda na coleta da amostra de solo no campus da UTFPR – Guarapuava.

Aos meus colegas de sala.

Aos amigos do curso que encontrei nessa jornada, o meu muito obrigado pelos momentos alegres que passamos juntos.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento aos meus pais pelo apoio financeiro durante a caminhada, mas deixo minha gratidão principalmente à minha avó materna pelo apoio financeiro e emocional, principalmente por me incentivar a seguir os meus sonhos, acredito que sem esse apoio seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

BONIFÁCIO, Guilherme Alves. **Propriedades Geotécnicas de um solo residual de basalto na região de Guarapuava - PR.** 2021. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

O solo é um material variável, heterogêneo, anisotrópico, suscetível às intempéries e aos processos de decomposição. Um estudo aprofundado das características geotécnicas de um determinado solo, permite mensurar essas variabilidades espaciais e, se corretamente interpretadas e utilizadas em projetos de Engenharia, garantem maior confiabilidade às soluções adotadas. Por isso, esse trabalho estuda a região de Guarapuava, município inserido no terceiro planalto paranaense, onde a formação basáltica é predominante. A literatura sobre a caracterização geotécnica da região é escassa e a pesquisa deste trabalho é precursora na coleta de dados com vistas a enriquecer os conhecimentos técnicos dos parâmetros do solo típico da região. Nesse contexto, este trabalho caracteriza o solo residual de basalto, na região de Guarapuava, e compara o seu comportamento com solos semelhantes de outras regiões, contribuindo com futuras pesquisas envolvendo os dados geotécnicos desse solo. A pesquisa tem caráter exploratório, com análise comparativa de outros trabalhos semelhantes. Aborda o estudo elementar da geologia da região, bem como dos processos de formação do solo residual de basalto. Um banco de dados, com resultados experimentais encontrados na literatura, para solos semelhantes, é construído. Amostras indeformadas e deformadas foram coletadas e submetidas à ensaios laboratoriais de granulometria, limites de consistência e peso específico do solo. Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR, campus Guarapuava.

**Palavras-chave:** Caracterização geotécnica. Solo residual de Basalto. Guarapuava.

## ABSTRACT

BONIFÁCIO, Guilherme Alves. **Geotechnical properties of a residual soil in the region of Guarapuava-PR**. 2021. 85 p. Work of Conclusion Course in Civil Engineering - Federal Technology University - Paraná. Guarapuava, 2021.

Soil is a variable, heterogeneous, anisotropic material, susceptible to weather and decomposition processes. An in-depth study of the geotechnical characteristics of a given soil, allows measuring these spatial variability and, if correctly interpreted and used in Engineering projects, guarantee greater reliability to the adopted solutions. For this reason, this work studies the region of Guarapuava, a municipality inserted in the third plateau of Paraná, where basaltic formation is predominant. The literature on the geotechnical characterization of the region is scarce and the research of this work is a precursor in the collection of data with a view to enriching the technical knowledge of the parameters of the typical soil of the region. In this context, this work characterizes the residual basalt soil, in the Guarapuava region, and compares its behavior with similar soils from other regions, contributing to future research involving the geotechnical data of that soil. The research has an exploratory character, with comparative analysis of other similar works. It addresses the elementary study of the geology of the region, as well as the formation processes of residual basalt soil. A database, with experimental results found in the literature, for similar soils, is built. Deformed and deformed samples were collected and subjected to laboratory tests of granulometry and soil consistency limits. The tests were carried out in the Soil Mechanics laboratory of UTFPR, Guarapuava campus.

**Keywords:** Geotechnical characterization. Basalt residual soil. Guarapuava.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da Methodi Ordinatio e utilização das TICs em cada etapa .....	14
Figura 2 – Mapa do Relevo do Paraná.....	15
Figura 3 – Compartimentos geológicos do Paraná .....	16
Figura 4 – Planaltos do Paraná .....	16
Figura 5 – Perfil típico de um solo residual .....	20
Figura 6 – Decomposição do Basalto.....	23
Figura 7 – Exemplo de Curva Granulométrica .....	25
Figura 8 – Peso específico submerso ( $\gamma'$ ) .....	26
Figura 9 – Peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ).....	27
Figura 10 – Limites de Atterberg .....	28
Figura 11 – Carta de Plasticidade .....	30
Figura 12 – Superfície de ruptura.....	32
Figura 13 – Forças normal e tangencial, a força resultante entre a normal e tangencial, e o ângulo de atrito formado .....	33
Figura 14 – Superfície de ruptura.....	35
Figura 15 – Curvas de Compactação típicas de solos brasileiros .....	36
Figura 16 – Cargas piezométrica, altimétrica e total para o fluxo de água através do solo.....	38
Figura 17 – Localização espacial do município de Guarapuava - PR .....	41
Figura 18 – Conjunto de peneiras .....	45
Figura 19 – Proveta de 1000 cm .....	46
Figura 20 – Ensaio de sedimentação .....	47
Figura 21 – Leitura do densímetro .....	48
Figura 22 – Ensaio Peso Específico.....	49
Figura 23 – Segunda parte do ensaio de Peso específico .....	49
Figura 24 – Amostras obtidas nas respectivas cápsulas.....	50
Figura 25 – Preparação das amostras .....	51
Figura 26 – Limite de Liquidez .....	52
Figura 27 – Ponto de coleta na UTFPR campus de Guarapuava .....	53
Figura 28 – Limite de Liquidez .....	54
Figura 29 – Carta Plástica (solo de Guarapuava) .....	56
Figura 30 – Gráfico da Curva Granulométrica de Guarapuava - PR.....	60
Figura 31 – Mapa com as localizações dos estudos envolvidos .....	62
Figura 32 – Ensaio Limites de consistência.....	63
Figura 33 – Ensaio Peso Específico do Solo.....	65
Figura 34 – Quantitativo de ensaios de Granulometria .....	66
Figura 35 – Quantitativos granulométricos encontrados na Literatura .....	69
Figura 36 – Quantitativo de ensaios de Cisalhamento Direto .....	70
Figura 37 – Comparativos cisalhamento direto do solo basáltico na literatura.....	71



Figura 38 – Quantitativo de ensaios de Compactação.....	72
Figura 39 – Comparativos compactação do solo basáltico na literatura .....	73
Figura 40 – Quantitativo de ensaios de Condutividade Hidráulica .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação Granulometria Brasileira .....	24
Tabela 2 – Classificação do índice de plasticidade .....	30
Tabela 3 – Valores médios dos índices de liquidez.....	31
Tabela 4 – Valores típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados .....	40
Tabela 5 – Tamanho de peneiras conforme padrão americano .....	44
Tabela 6 – Resultado para o Limite de Liquidez .....	54
Tabela 7 – Resultado para o Limite de Plasticidade .....	55
Tabela 8 – Índice de Consistência .....	57
Tabela 9 – Índice de Atividade .....	58
Tabela 10 – Resumo do ensaio de peneiramento .....	59
Tabela 11 – Resumo do ensaio de sedimentação .....	59
Tabela 12 – Resultado Distribuição Granulométrica de Guarapuava - PR .....	61
Tabela 13 – Relação de cidades encontradas na Literatura .....	61
Tabela 14 – Quantitativo de ensaios para o solo basáltico .....	62
Tabela 15 – Dados dos ensaios Limites de consistência .....	64
Tabela 16 – Dados dos ensaios de Peso Específico .....	65
Tabela 17 – Dados de ensaios de Granulometria .....	67
Tabela 18 – Dados de ensaios de Cisalhamento Direto .....	70
Tabela 19 – Dados de ensaios de Compactação.....	72
Tabela 20 – Dados de ensaios de Condutividade Hidráulica .....	74
Tabela 21 – Comparativo dos Limites de consistência de Guarapuava – PR.....	75
Tabela 22 – Comparativo dos dados de Peso Específico .....	76
Tabela 23 – Comparativo Granulometria de Guarapuava – PR.....	76

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	13
1.2.1 Objetivo Principal.....	13
1.2.2 Objetivos Secundários.....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1 GEOLOGIA DO PARANÁ.....	15
2.2 SOLO RESIDUAL DE BASALTO.....	17
2.2.1 Basalto.....	17
2.2.2 Classificação Geotécnica dos Solos.....	17
2.2.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO RESIDUAL BASÁLTICO.....	21
2.3 PARÂMETROS DO SOLO.....	23
2.3.1 Análise Granulométrica.....	23
2.3.2 Peso Específico.....	25
2.3.3 LIMITES DE ATTERBERG.....	27
2.3.4 Parâmetros de Resistência do Solo.....	31
2.3.5 Outros Parâmetros.....	35
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.2 BANCO DE DADOS.....	41
3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	42
3.3.1 Granulometria.....	42
3.3.2 Peso Específico.....	48
3.3.3 Limites de Atterberg.....	50
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO COLETADO EM GUARAPUAVA-PR.....	53
4.1.1 Limites de Atterberg.....	54
4.1.2 Peso Específico.....	58
4.1.3 Análise Granulométrica.....	58
4.2 DADOS DA LITERATURA.....	61
4.2.1 Limites de Atterberg.....	63
4.2.2 Peso específico.....	64
4.2.3 Granulometria.....	66
4.2.4 Cisalhamento Direto.....	70
4.2.5 Compactação.....	71
4.2.6 Permeabilidade.....	73
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA.....	75

4.3.1 Limites de Consistência .....	75
4.3.2 Peso Específico .....	75
4.3.3 Granulometria .....	76
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>77</b>
5.1 CONCLUSÃO.....	77
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O solo é um material variável espacialmente, modificável com o tempo e o clima. A geotecnia, segundo Das (2014), estuda o comportamento mecânico desse material tão heterogêneo, além de analisar e detalhar o comportamento das inúmeras rochas que compõe cada tipo de solo. Um estudo apropriado sobre as características geotécnicas de um determinado tipo de solo, garante menores incertezas associadas e, assim maior confiabilidade no que diz respeito aos diversos tipos de projetos envolvidos no âmbito da Engenharia civil.

O estudo foi desenvolvido na região de Guarapuava - PR, e de acordo com o Instituto de Terra, Cartografia e Geologia do Paraná (2011), a localização é inserida no terceiro planalto paranaense. Segundo dados da MINEROPAR (2016), o basalto é a rocha predominante no solo da região, e é caracterizado pela sua dureza, compactação e textura de granulação fina. A pesquisa é precursora na coleta de dados com vistas a enriquecer os conhecimentos técnicos dos parâmetros geotécnicos do solo típico da região.

As informações sobre a caracterização geotécnica do solo da região são escassas, e segundo Diemer *et. al.* (2008), não há muitos estudos ou trabalhos realizados na região para a obtenção de determinados dados. A falta de informações geotécnicas gera dificuldades na análise do comportamento de um solo, principalmente nos quesitos de parâmetros de resistência aliados aos dados topográficos e pluviométricos, fazendo com que o solo em questão, seja desconhecido, reduzindo a confiabilidade na execução de diversos projetos da engenharia civil. O noroeste do Rio Grande do Sul, possui um solo semelhante onde já se iniciaram estudos geotécnicos na região.

O enriquecimento no conhecimento dos parâmetros geotécnicos do solo residual de basalto se deu através de amostras coletadas *in situ* e submetidas à ensaios laboratoriais no laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR, campus Guarapuava.

Nesse contexto, a pesquisa visa caracterizar geotecnicamente o solo residual de basalto e comparar, de forma analítica, com solos semelhantes de outras regiões, além de contribuir com futuras pesquisas envolvendo os dados geotécnicos da região

de Guarapuava-PR, nortear futuras investigações geotécnicas e colaborar com diversos projetos de Engenharia Civil.

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A pesquisa delimita-se à elaboração de uma caracterização geotécnica de um solo residual de basalto na região de Guarapuava – PR.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão subdivididos em principal e secundários e são mostrados e explicados nos itens subsequentes.

### 1.2.1 Objetivo Principal

Caracterizar geotecnicamente o solo residual de basalto na região de Guarapuava-PR, a partir dos resultados de análises laboratoriais.

### 1.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

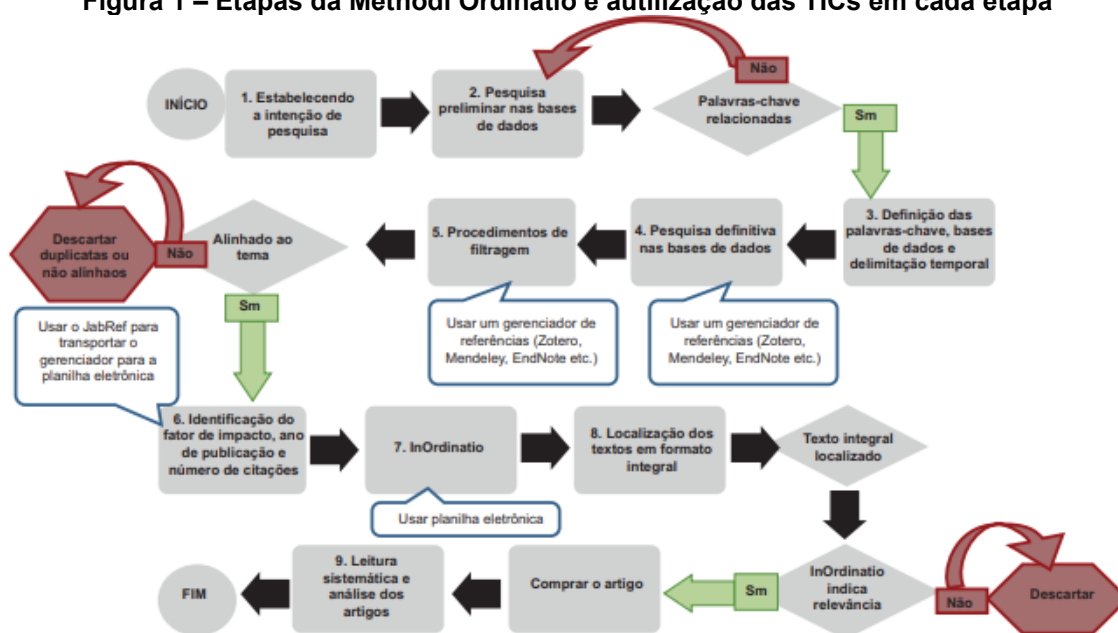
- a) comparar o comportamento do solo da região de Guarapuava-PR com solos semelhantes de outras regiões;
- b) construir um banco de dados com os dados geotécnicos de regiões onde possuem solo residual de basalto;
- c) determinar os limites de consistência do solo da região analisada;
- d) traçar a curva granulométrica do solo residual de basalto na região de estudo;
- e) determinar o peso específico do solo da região estudada;
- f) contribuir com futuras pesquisas envolvendo os dados geotécnicos do solo típico da região.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para a elaboração de um banco de dados de uma pesquisa exploratória, muitas vezes é necessária a realização de uma revisão sistemática sobre o assunto. A revisão deste trabalho é baseada na metodologia *Methodi Ordinatio*, onde segundo Paganini, *et.al* (2017), tem o intuito de qualificar os artigos obtidos em uma revisão bibliográfica sistematizada.

Essa metodologia leva em consideração três critérios de extrema importância: número de citações, o fator de impacto e ano de publicação. Com relação à sua composição, Paganini, *et.al* (2017) salienta que é composta por nove etapas, sintetizadas através da Figura 1. Em cada etapa são utilizadas ferramentas da tecnologia da informação e comunicação (TICs) para melhorar o processo de análise de informações.

Figura 1 – Etapas da *Methodi Ordinatio* e utilização das TICs em cada etapa



Fonte: Paganini, *et.al* (2017)

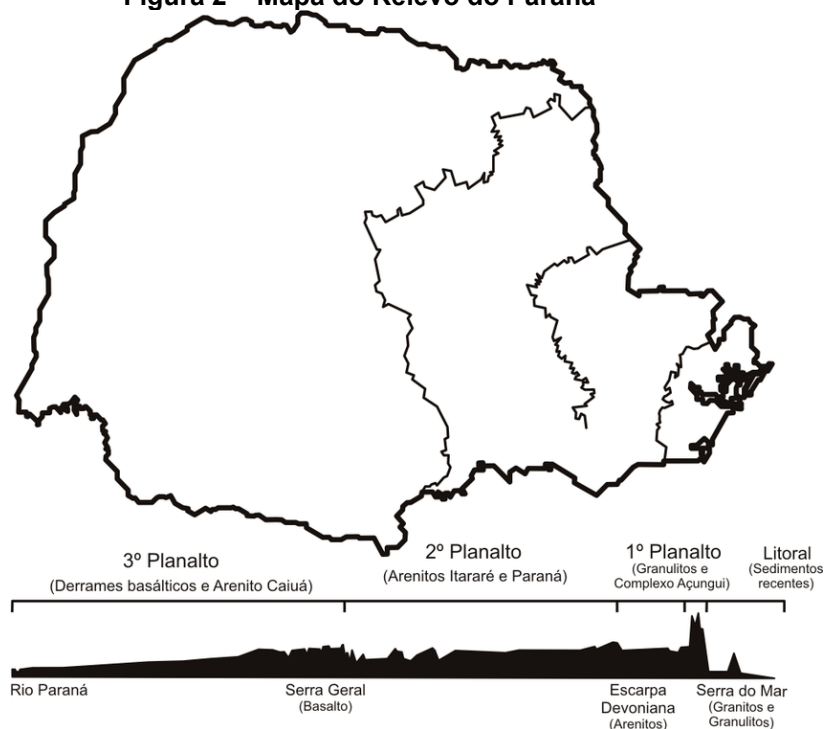
Através do método citado, a pesquisa de trabalhos acadêmicos se deu em torno dos temas: Geologia do Paraná, solo residual de basalto e sua caracterização. A explanação destes encontra-se a seguir.

## 2.1 GEOLOGIA DO PARANÁ

A abordagem geológica do estado do Paraná está intensamente ligada à sua evolução, que se deu há mais de dois milhões de anos. A princípio, a estrutura geológica do estado é analisada através de duas grandes unidades, o Escudo e a Bacia do Paraná (MINEROPAR, 2006).

A estrutura geomorfológica do Paraná, segundo Maack (2002), é subdividida, de acordo com a Figura 2, entre primeiro planalto, também conhecido como planalto de Curitiba; segundo planalto, conhecido como planalto de Ponta Grossa e por fim, o terceiro planalto, denominado como planalto de Guarapuava.

**Figura 2 – Mapa do Relevo do Paraná**



**Fonte: MAACK (2002)**

O primeiro planalto, juntamente com o litoral do estado, é onde se encontra o escudo geológico paranaense, visto que é onde se localiza as regiões geológicas mais antigas e também as mais elevadas do estado, sendo revestida essencialmente por rochas ígneas e metamórficas (MINEROPAR, 2006).

De uma forma geomorfológica, segundo Maack (2002), o Paraná se divide em dois compartimentos geológicos, o litoral e os planaltos do interior do estado, a



escarpa localizada na Serra do Mar é o divisor entre esses dois compartimentos geológicos do estado, como é mostrado na Figura 3.

**Figura 3 – Compartimentos geológicos do Paraná**



Fonte: Mineropar (2006)

A Bacia do Paraná possui cerca de 1.500.000 km<sup>2</sup>, abrangendo boa parte no território brasileiro, sua caracterização geológica se dá pela acumulação de grande espessura de sedimentos e derrames basálticos. (MINEROPAR, 2006)

**Figura 4 – Planaltos do Paraná**



Fonte: Nowatzki (2018)

Através da Figura 4, é possível observar que a região do segundo e terceiro planalto paranaense é inserida dentro da área da Bacia do Paraná, que por sua vez, segundo Melani (2004) recobre a maior parte territorial do estado e possui uma forma aproximada de uma elipse aberta para a região sudoeste.

## 2.2 SOLO RESIDUAL DE BASALTO

### 2.2.1 Basalto

Um dos principais tipos de rochas magmáticas, é o basalto, que também conhecida como uma rocha ígnea, pois a sua origem se dá pelo resfriamento e consolidação do magma vulcânico, material que se encontra em estado de fusão no interior da crosta terrestre, aliados sempre aos fatores importantes como pressão e temperatura (CHIOSSI, 2013).

Na região sul do país, a sua principal composição rochosa é representada pelos derrames basálticos, recobrando áreas extensas com sua granulação fina, e é comum a associação de outras rochas ao basalto (POPP, 2017).

As rochas intrusivas, são aquelas que se formam no interior da crosta terrestre, envolvendo um processo mais lento e totalmente dependente da estrutura geológica (CHIOSSI, 2013).

### 2.2.2 Classificação Geotécnica dos Solos

Cada tipo de solo, possui sua particularidade, e é extremamente importante o estudo aprofundado para a obtenção de informações que visam nortear futuras investigações geotécnicas. Na mecânica dos solos, são analisados cada comportamento e explorada cada característica dos diversos tipos de solo sempre levando em consideração as limitações de cada solo (PINTO, 2006).

Os solos, de uma maneira geral, segundo Vargas (1977), podem ser classificados geotecnicamente como solos residuais, transportados, orgânicos e pedogênicos. Também vale ressaltar que para se dar a classificação de um determinado tipo de solo, é preciso considerar o último fenômeno que o envolveu.

- Solos Transportados: Coluviões, aluviões, sedimentos e eólicos;
- Solos Orgânicos: areias ou argilas orgânicas e turfas;
- Solos Pedogênicos: solos porosos;
- Solos Residuais: Jovens ou Maduros.

### 2.2.2.1 Solos Transportados

Quanto aos solos transportados, Antunes et al. (2015) apresentaram a definição desse tipo de solo levando em consideração a deposição das partículas em diferentes ambientes, ou seja, esse tipo de material, sofreu transporte por condicionantes geológicos oriundos da sua localização original até o local no qual foram depositadas essas partículas, antes mesmo do processo de consolidação.

Massad (2016) aponta os principais tipos de solos transportados como: Solos de aluvião, coluvionares, eólicos e solos sedimentares, basicamente, a diferenciação entre esses tipos de solos se dá pelo meio de transporte das partículas envolvidas, sejam elas pela ação da gravidade, volumes expressivos de água ou pela ação eólica (ventos).

Ainda com relação aos solos transportados, o DNER (1996) comenta que de acordo com a capacidade do agente transportador, o solo transportado exhibe relevantes taxas de variações laterais e verticais na sua decomposição.

### 2.2.2.2 Solos Orgânicos

Devido a parcela significativa de material vegetal disperso nos solos orgânicos, Craig e Knappett (2018) explica que essa condição desse tipo de solo produz um certo odor e a coloração desse solo é caracterizada pelo marrom-escuro. Nesse grupo de solos, existe a turfa, que é conhecida pelo alto resíduo de plantas em sua decomposição.

As localidades da ocorrência desse tipo de solo, segundo DNER (1996), podem ser vistas em áreas geográficas e topograficamente bem localizadas, como por exemplo, em bacias e depressões continentais e baixadas litorâneas e marginais de rios.

Para Craig e Knappett (2018), o conteúdo orgânico é medido pela queima de uma amostra de solo a uma determinada temperatura, com o objetivo de obter a redução da massa que corresponde ao conteúdo orgânico.

### 2.2.2.3 Solos Pedogênicos

Um grande exemplo de um solo pedogênico, segundo Massad (2016), são os solos lateríticos, que são conhecidos devido à sua complexa formação química, física e biológica. Os solos pedogênicos são solos superficiais e bem drenados, ou seja, são situados acima do lençol freático e sofrem intensa ação de diversos processos de intemperismo.

### 2.2.2.4 Solos Residuais

Os solos residuais, de acordo com Caputo (2015), são aqueles que quando passam pelo processo de decomposição, permanecem no local de sua rocha mãe, ou seja, quando decompostos não são retirados do seu local de origem, também são chamados de solos de alteração.

Esse tipo de solo, é muito comum no Brasil, principalmente na região centro-sul, devido aos fatores climáticos e temporais (DNER, 1996). São diversos fatores que definem o tipo de solo resultante, tais como: topografia, climatologia, a própria rocha matriz e as condições orgânicas e de drenagem do respectivo solo (MASSAD, 2016).

O comportamento do solo residual se diferencia dos demais solos já estudados, devido à sua composição e comportamento. O material argiloso presente nesse tipo de solo se comporta como adensado ou pré-adensado, e com relação as areias, o comportamento destas está altamente ligado à massa específica (densidade). (CHOSSI, 2013).

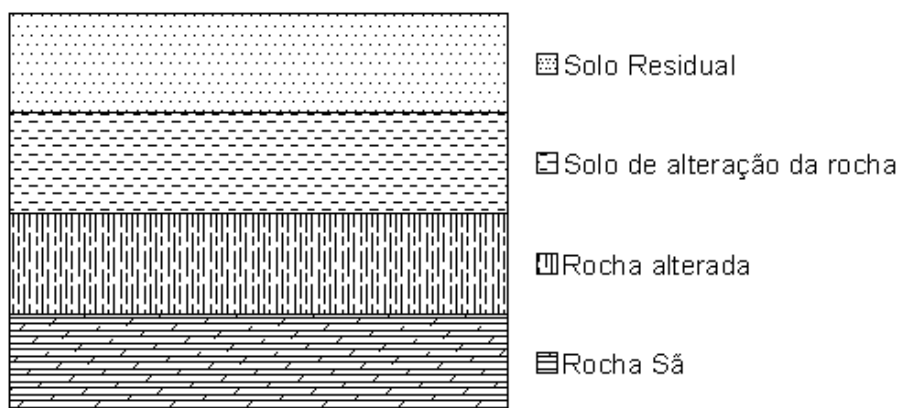
Os solos residuais, principalmente o solo residual jovem (saprolítico), segundo Massad (2016), apresentam, de forma geral, uma baixa resistência à erosão e precisam ser protegidos. Em contrapartida, apresentam elevada resistência ao cisalhamento.

Segundo o DNER (1996), realizando uma análise comparativa em relação à homogeneidade do solo, o solo residual é mais homogêneo ao transportado, devido a forma de ocorrer, analisando principalmente a sua rocha mãe.

O Departamento nacional de estradas e rodagem (DNER, 1996) ainda afirma que não existe um contato direto entre o solo e a rocha oriunda a esse solo, a ligação entre eles é dada por meio de duas faixas distintas; a camada de solo de alteração da

rocha e a camada de rocha decomposta. A ilustração da respectiva situação se dá pela Figura 5 – Perfil típico de um solo residual.

**Figura 5 – Perfil típico de um solo residual**



**Fonte: Autor (2020)**

O solo residual, pode ser dividido entre solo residual maduro e jovem, levando sempre em consideração o grau de decomposição dos minerais. O solo residual maduro não evidencia praticamente nenhuma relação com a sua rocha mãe, as especificações desse material como a estrutura e a composição mineral para cunho informativo são escassas, ou seja, geralmente não é possível observar os restos da estrutura rochosa que lhe deu origem.

- Solo residual jovem: Chamado também de solo saprolítico, é a camada onde o material ainda se encontra em processo de intemperismo, ou seja, os processos pedogênicos ainda estão instáveis, primários e limitados geologicamente. Com relação a cor, textura e composição mineralógica, é considerado um solo heterogêneo, isso ocorre devido ao arranjo dos minerais devido a rocha mãe;
- Solo residual maduro: Esse material apresenta características semelhantes e homogêneas, ou seja, possui um solo considerado homogêneo, constituído de estrutura porosa, com minerais secundários e primários que sobressaíram ao processo de intemperismo, e a sua granulometria varia de

acordo com as características rochosas de sua rocha mãe. Esse tipo de solo, perdeu boa parte da sua estrutura original (rocha mãe);

Para Massad (2016), o solo de alteração da rocha, apresenta algumas evidências geológicas de certos elementos mineralógicos e estruturas não decompostas. Ainda sobre a formação dos solos residuais, Chossi (2013) enuncia que a rocha alterada é caracterizada pela alta preservação da sua estrutura e composição mineralógica, mas com a sua resistência mecânica e dureza menor com relação à rocha sã. A rocha sã, é definida segundo o DNER (1996), como a rocha inalterada. Vale ressaltar a importância da análise dos fatores climáticos e da tipologia da rocha envolvida para se obter um parâmetro dessas camadas.

Para Chossi (2013), nas áreas em que as características climatológicas se mostram quentes e úmidas, a ação intensa do intemperismo químico ocasiona uma decomposição profunda das rochas, formando os solos residuais, cujas propriedades geotécnicas em geral são altamente dependentes da composição rochosa local.

### 2.2.3 Caracterização do Solo Residual Basáltico

De acordo com Santos (1997), solos residuais tendem a possuírem um perfil mais heterogêneo, anisotrópico e com uma grande variabilidade na composição mineral. Os solos residuais de basalto apresentam uma coloração avermelhada forte, devido a disponibilidade de ferro na rocha mãe (GEHLING, 1982).

Para Boehl (2011), os solos residuais de basalto podem ser caracterizados de uma forma granulométrica justamente por serem solos argilosos e apresentarem uma drenagem bem desenvolvida e as deformações plásticas dependentes do tempo.

Segundo Gerscovich (2012), normalmente a informação da rocha sã já mostra o tipo de solo gerado. O Quadro 1 relaciona rochas com seus respectivos solos residuais, onde pode-se observar que quando se trata de um solo residual de basalto, o solo será do tipo argiloso.

**Quadro 1 – Composição do solo residual em função da rocha sã**

<b>Rocha Sã</b>	<b>Tipo de Solo</b>
Basalto	Argiloso
Granito	Arenoargiloso (micáceo)
Calcário	Argiloso
Quartzito	Arenoso
Filito	Argiloso
Gnaisse	Siltoso ou micáceo

**Fonte: GERSCOVICH (2012)**

Chossi (2013) comenta que “praticamente todos os tipos de rocha formam o solo residual”, sempre levando em consideração o tipo de composição mineralógica da rocha que lhe deu origem.

No Paraná, segundo Souza et al. (2012), é possível encontrar uma enorme região que tem a característica do solo residual de basalto. É apontado também, que os solos residuais de basalto do Paraná são bem drenados e muito profundos, e apresentam também um alto índice de fertilidade, sendo bem usados como meios agrícolas. Os solos residuais basálticos apresentam, devido ao processo de ocupação do solo aliado aos fatores climáticos locais, um forte processo de degradação do solo da região, principalmente na questão dos fenômenos erosivos hídricos.

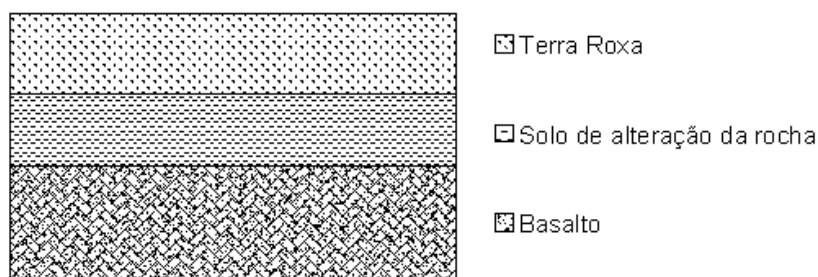
Moncada (2008), define o processo evolutivo do solo residual como se segue:

Independente do processo geológico de origem do solo, a porção superficial está submetida aos processos pedogenéticos que promovem a adição, perda, transformação e transporte do material do solo. Os principais processos são o de eluviação e iluviação, respectivamente, processos de perda e adição de material; a lixiviação, que remove sais solúveis e a podzolização e a laterização, processos que levam à concentração de sílica e ferro. O agente principal dos processos pedogenéticos é a movimentação da água no solo, através da infiltração de águas de chuva e evaporação.

(MONCADA, 2008, p. 21)

A decomposição do solo residual de basalto pode ser observada através da Figura 7, onde é possível ver que é caracterizado por uma “terra roxa”, segundo Pinto (2006), esse solo possui alta presença de sedimentos finos em sua composição granulométrica.

**Figura 6 – Decomposição do Basalto**



**Fonte: Autor (2020)**

## 2.3 PARÂMETROS DO SOLO

### 2.3.1 Análise Granulométrica

O estudo envolvendo os tamanhos das partículas de uma determinada amostra, segundo Craig e Knappett (2018), está altamente ligada a obtenção da porcentagem de massa de partículas em diferentes tamanhos. Para Ortigão (2007), a análise granulométrica de uma amostra visa obter uma curva granulométrica. Para que isso ocorra de forma correta, essa amostra em estudo precisa ser analisada através do peneiramento em uma “série-padrão de peneiras”. Em seguida é determinada a massa de material retido em cada peneira e por fim os resultados plotados em um gráfico. Em um determinado solo, as partículas que o compõem, possuem uma variedade muito grande no que diz respeito ao seus respectivos tamanhos, segundo Das (2014), essas partículas envolvidas se denominam areia, silte, argila ou pedregulho.

Ainda com relação aos conceitos envolvendo as análises granulométricas, Das (2014) comenta que “a análise granulométrica é a determinação do tamanho das partículas presentes em um solo, expressada como porcentagem do peso seco total”. São abordados dois métodos que são comumente utilizados para se obter a distribuição granulométrica de determinado solo, os ensaios de peneiramento e de sedimentação. O Quadro 2 apresenta a relação entre o tamanho das partículas em quatro sistemas de classificação. A classificação brasileira é apresentada na Tabela 1.



**Quadro 2 – Classificação do Tamanho das Partículas**

Organização	Tamanho do grão [mm]			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
MIT <sup>1</sup>	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	< 0,002
USDA <sup>2</sup>	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	< 0,002
AASHTO	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	< 0,002
Corps of Engineers	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Grãos finos (< 0,075)	

Fonte: DAS (2014)

**Tabela 1 – Classificação Granulometria Brasileira**  
**Escala Granulométrica Brasileira (ABNT)**

Argila	$\emptyset < 0,005 \text{ mm}$
Silte	$0,005 \text{ mm} < \emptyset < 0,05 \text{ mm}$
Areia Fina	$0,05 \text{ mm} < \emptyset < 0,425 \text{ mm}$
Areia Média	$0,425 \text{ mm} < \emptyset < 2,0 \text{ mm}$
Areia Grossa	$2,0 \text{ mm} < \emptyset < 4,80 \text{ mm}$
Pedregulho	$4,80 \text{ mm} < \emptyset < 76,0 \text{ mm}$

Fonte: ABNT NBR 7181 (2016)

Das (2014) salienta que a análise granulométrica pode ser feita por peneiramento ou por peneiramento e sedimentação. Essa última é realizada na passagem do material na peneira 2,0 mm, e com material que fica retido nessa peneira realiza-se o peneiramento grosso, e com o material que passa por ela realiza-se a sedimentação e depois o peneiramento fino para grãos que ficarem retidos na peneira 0,074mm.

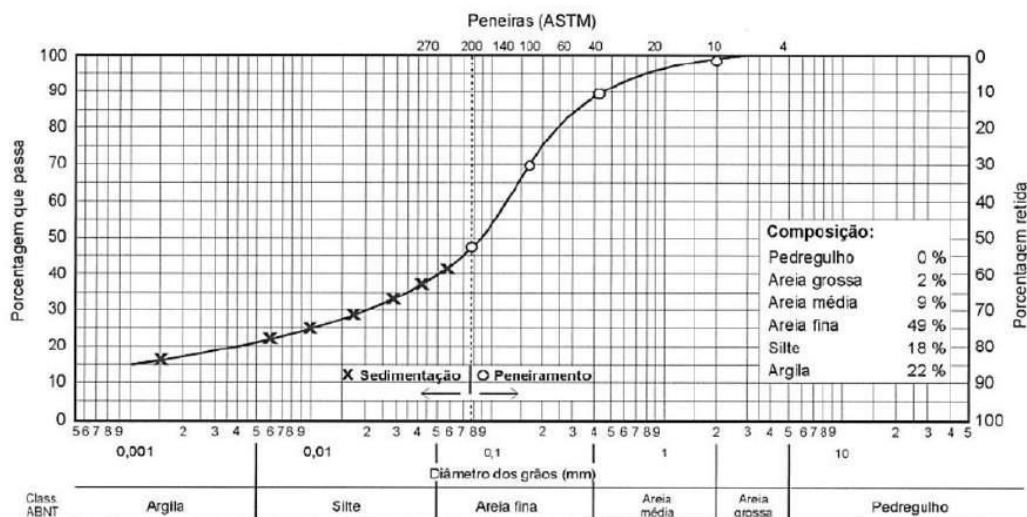
O ensaio de sedimentação, para Das (2014) tem como base o princípio da sedimentação dos grãos de solo em água. A velocidade das partículas pode ser expressa pela lei de Stokes, que para facilitar, assume que todas as partículas são esféricas, ou seja, que a partícula seja perfeitamente esférica com densidade pré-estabelecida e superfície lisa e regular.

Através da Figura 7, é apresentada um tipo de curva granulométrica, que apresenta a relação de porcentagem passante de solo com as respectivas peneiras, podendo ser observados os diâmetros dos grãos do solo no traçado.

<sup>1</sup> Instituto de Tecnologia de Massachussets

<sup>2</sup> Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

Figura 7 – Exemplo de Curva Granulométrica



Fonte: Pinto (2006)

É possível observar que na curva granulométrica representada pela Figura 7, a parte do ensaio de peneiramento dos grãos é representada a partir do diâmetro de 0,075 mm, e logo abaixo desse diâmetro, os resultados no traçado são alcançados por meio do ensaio de sedimentação dos grãos.

### 2.3.2 Peso Específico

Em um solo, Pinto (2006) salienta que somente uma parte do seu volume total é ocupado por partículas sólidas, o restante desse volume é ocupado por água ou ar. O comportamento de um determinado solo, vai depender da quantidade de cada um desses elementos, ou seja, do quantitativo presente de água, ar e sólidos. De acordo com Ortigão (2007), o peso específico de um solo, evidenciado através da Equação 1, é a relação entre o peso do solo e o respectivo volume.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Equação 1

Onde:

$\gamma$  é o peso específico de solo;

$W$  é o peso de solo;

$V$  é o volume de solo.

Bernardi (2006) enuncia o peso específico real como uma característica que relaciona a massa e o volume das partículas sólidas. Das (2014) define o peso específico relativo como “a razão do peso específico de determinado material pelo peso específico da água”.

O peso específico ( $\gamma g$ ) de uma partícula sólida, segundo Ortigão (2007), é a relação entre o peso da substância que a forma pelo volume que a ocupa. O peso específico de uma determinada partícula é a razão entre o peso seco e o seu respectivo volume, conforme a Equação 2.

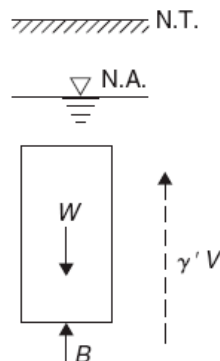
$$\gamma g = \frac{P_s}{V_s} \quad \text{Equação 2}$$

### 2.3.2.1 Peso específico submerso

Bodó e Jones (2017) define o peso específico submerso ( $\gamma'$ ) como o peso específico saturado do solo, ou seja, leva em consideração o fato da amostra saturada estar inserida abaixo do nível d'água e considerando também a capacidade de flutuar. Logo, uma força de levantamento é exercida em tal amostra de acordo com o Princípio de Arquimedes.

O peso específico submerso será levado em consideração quando forem realizadas as avaliações sobre as tensões induzidas no solo abaixo do nível d'água pelo carregamento na superfície, situações que envolvem a capacidade de carga do solo e as tensões efetivas. (DAS, 2014)

**Figura 8 – Peso específico submerso ( $\gamma'$ )**



Fonte: Bodó e Jones (2017)

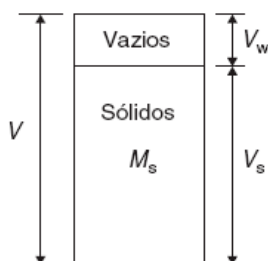
No caso de uma amostra de solo saturado, o peso específico é calculado pela mesma relação, ou seja, o peso de solo será o peso das partículas sólidas, somado com o peso da água.

### 2.3.2.2 Peso específico dos sólidos

O processo do peso específico dos sólidos é explicado através da Figura 9, onde se ocupa o volume  $V_s$ . Bodó e Jones (2017) aponta que em um determinado solo, podem surgir diversos tipos de partículas, das mais variadas possíveis, logo, se opta por determinar o peso específico médio das partículas sólidas que o compõem.

Os parâmetros normativos, de uma maneira geral, descrevem a obtenção do peso específico médio ou da densidade média das partículas menores que um tamanho especificado, ou maiores que um tamanho fixado.

**Figura 9 – Peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ )**



**Fonte: Bodó e Jones (2017)**

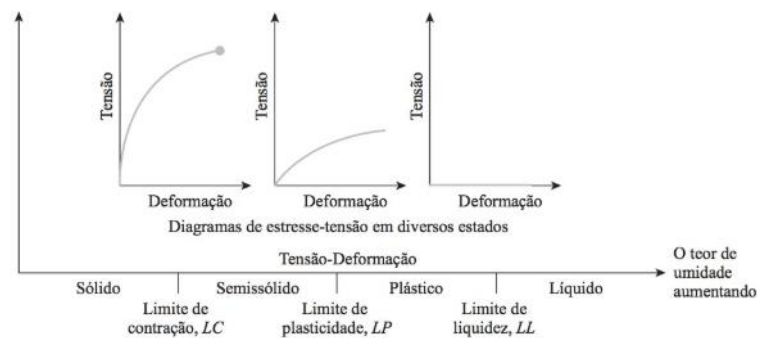
### 2.3.3 LIMITES DE ATTERBERG

Os solos argilosos, de uma forma genérica, quando apresentam umidade, o seu comportamento é caracterizado semelhante a um líquido, ou seja, quando perdem uma determinada quantidade de água, se tornam plásticos, quando isso ocorre eles se tornam quebradiços. Segundo Bernardi (2006), para determinar cada fase desses tipos de comportamentos, é necessário utilizar os índices de consistência, que são determinados através dos ensaios de limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP).

A determinação do limite de liquidez (LL) e do limite de plasticidade (LP) é chamada de ensaios de consistência e, também podem ser denominados de limites de Atterberg. São de grande importância para os estudos da engenharia civil, principalmente no que diz respeito ao comportamento dos solos (GEHLING, 1982).

Segundo Massad (2016), o uso dos limites de Atterberg (LL e LP) já foram utilizados na Mecânica dos Solos experimental, através de Terzaghi, na parte introdutórias de suas pesquisas em campo. Tais limites são teores de umidade que permitem caracterizar e diferenciar as mais diferentes formas de estado de uma massa achatada solo. A Figura 10 representa essa relação com a umidade (h) crescente.

**Figura 10 – Limites de Atterberg**



**Fonte: Braja (2014)**

Como é possível observar através da Figura 8, quando observamos os teores de umidade, temos que:

- Se o teor de umidade é muito baixo: o solo se comporta como um sólido;
- Se o teor de umidade for elevado: o solo tem um comportamento de um fluido.

Mas para valores intermediários de teor de umidade, o solo pode possuir quatro tipos de comportamentos: sólido, semissólido, plástico e líquido.

Das (2014) ainda estabelece os parâmetros dos limites de Atterberg como: Limite de contração (LC), Limite de plasticidade (LP) e Limite de liquidez (LL), todos são expressos em termos percentuais:

- Limite de contração (LC): Ocorre quando o teor de umidade se direciona do estado sólido para o semissólido;
- Limite de plasticidade (LP): O teor de umidade transita do estado semissólido para o estado plástico;
- Limite de liquidez (LL): Quando o teor de umidade é direcionado do estado plástico até o estado líquido.

### 2.3.3.1 Limite de Plasticidade

Das (2014) define o limite de plasticidade (LP), como o teor de umidade expresso em porcentagem, em que o solo fissura quando é submetido à uma moldagem em cilindro de 3,2 mm de diâmetro, ou seja, o limite de plasticidade é o limite inferior ao do intervalo de plasticidade do solo.

Massad (2016) aponta que o limite de plasticidade (LP), é a umidade em que a água livre começa a existir em excesso, em outras palavras, quando em uma determinada quantidade maior do que aquela necessária para satisfazer a admissão forte.

Pode ser interpretada também, segundo Das (2014), como o teor de umidade limite, abaixo no qual o solo perde a plasticidade, ou seja, se deformando com a mudança de volume e ocorrendo o trincamento do solo.

Dentro desse contexto, Das (2014) ainda afirma que existe o índice de plasticidade (IP), que pode ser definido pelo autor como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade de um solo, essa definição pode ser expressada através da Equação 3.

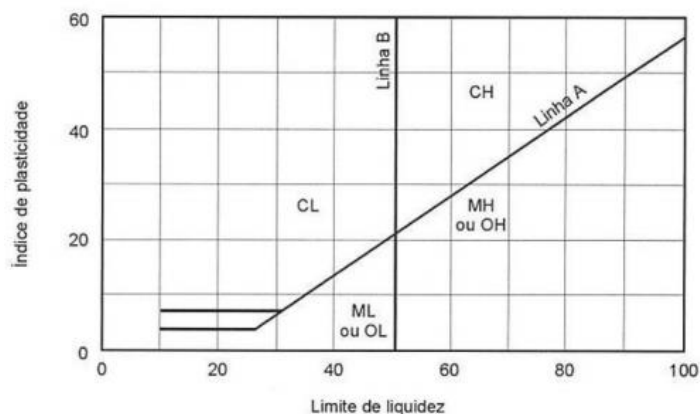
$$IP = LL - LP$$

Equação 3

De acordo com Craig e Knappett (2018), o índice de plasticidade é de extrema importância, pois serve como parâmetro na classificação dos solos granulares finos, esse índice também é essencial para a obtenção do gráfico de plasticidade de Casagrande.

A classificação unificada do solo (SUCS), é feita através do ábaco de Casagrande mostrado na Figura 11, onde após a obtenção dos dados de índice de plasticidade e limite de liquidez, é possível realizar a classificação.

**Figura 11 – Carta de Plasticidade**



**Fonte: Pinto (2006)**

Na Tabela 2, podemos encontrar a classificação do índice de plasticidade qualitativamente.

**Tabela 2 – Classificação do índice de plasticidade**

IP	Descrição
0	Sem plasticidade
01 a 05	Plasticidade leve
05 a 10	Plasticidade baixa
10 a 20	Plasticidade média
20 a 40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

**Fonte: Burmister (1949)<sup>3</sup> apud. Das (2014)**

### 2.3.3.2 Limite de Liquidez

Segundo Bodó e Jones (2017), quando uma pasta de um determinado solo, que possui umidade suficiente para fluir sob o próprio peso é ressecada, ela se torna uma massa plástica, esse teor de umidade que originou a esta mudança é chamado

<sup>3</sup>Burmister Concepts in Soil Mechanics, 1949, Universidade de Columbia.

também de limite de liquidez (LL), o volume do solo diminui e o solo possui um grau de saturação de 100%, logo considerado um solo saturado neste estágio.

O ensaio de limite de liquidez, de acordo com Das (2014) pode ser realizado através do aparelho Casagrande, que é composto por uma concha de latão e uma base de borracha rígida. Essa concha de latão é submetida a um número de golpes contra a base pelo comando acionado por uma manivela.

O teor de umidade obtido em unidades percentuais e o número de golpes correspondentes são plotados em um gráfico para posterior consulta. A tabela 3 apresenta alguns valores médios do limite de liquidez (LL) de acordo com alguns solos.

**Tabela 3 – Valores médios dos índices de liquidez**

areia arenosa	15% < LL < 20%
solo siltoso	20% < LL < 50%
argila	40% < LL < 80%

**Fonte: Bodó (2017)**

Nesse contexto, Ortigão (2007) aponta que um índice de liquidez pode ser determinado com o intuito de classificar as argilas. Esse índice pode ser determinado através da Equação 4, onde é relacionado os fatores de teor de umidade ( $w$ ), limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP).

$$LL = \frac{w - LP}{IP} \quad \text{Equação 4}$$

#### 2.3.4 Parâmetros de Resistência do Solo

##### 2.3.4.1 Modelo de Mohr-Coulomb

O estado de tensão em um elemento de um determinado solo pode ser definido sob análise de tensões normais e tensões cisalhantes que podem ser devidamente aplicadas em seu contorno (CRAIG, 2018).

Das (2014) comenta que “a teoria afirmava que um material se rompe em decorrência da combinação entre as tensões normal e de cisalhamento, e não em razão das tensões máxima, normal ou de cisalhamento isoladamente”.



Há várias teorias referentes à ruptura de um solo sob carregamento. Entre elas, as combinações das teorias de Mohr e de Coulomb, que são precisas o suficiente para fins de engenharia, uma vez que foram modificadas para se considerar o efeito da poropressão na resistência ao cisalhamento.

(BODÓ E JONES, 2017, p. 203)

As tensões atuantes na superfície, que estão inclinadas de acordo com uma angulação  $\Phi$  com relação à horizontal, que pode ser representada pela Equação 5 e também graficamente pela Figura 12, a resistência ao cisalhamento de qualquer plano.

$$\tau = c + \sigma_n(\operatorname{tg} \phi)$$

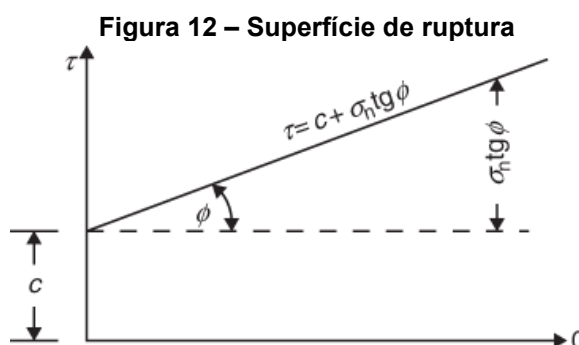
Equação 5

Onde:

$c$  é a coesão do solo

$\phi$  é o ângulo de atrito

$\sigma$  é tensão normal efetiva na superfície potencial de ruptura.



Fonte: Bodó e Jones (2017)

#### 2.3.4.2 Atrito

A resistência por atrito entre as partículas envolvidas, segundo Viceli (2003) depende muito do coeficiente de atrito. Essa resistência pode ser definida como a

força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano, em outro paralelo a este plano.

O atrito, segundo Craig e Knappett (2018) é a função oriunda da interação entre as duas superfícies na região de contato em si. A resistência devido ao atrito pode ser explicada e demonstrada através da analogia do deslizamento de um determinado corpo sobre uma certa superfície plana horizontal.

A equação de Coulomb, mostrada através da Equação 5, define a tensão cisalhante em termos de ângulo de atrito  $\phi$  e o intercepto de coesão  $c$ . Estas são constantes empíricas apenas, dependendo do estado natural do solo, assim como do método de ensaio. Elas indicam, entretanto, que a resistência ao cisalhamento de solos depende muito do atrito entre as partículas e sua coesão.

Em solos em que a granulometria predominante é a grossa, Bodó e Jones (2017) aponta que a resistência ao cisalhamento vai depender muito de determinados fatores como rugosidade da superfície dos grãos, estado de compactação e magnitude das pressões de contato.

**Figura 13 – Forças normal e tangencial, a força resultante entre a normal e tangencial, e o ângulo de atrito formado**



Fonte: Vicieli (2003)

O ângulo formado entre a forças normal e a resultante das forças é denominado ângulo de atrito ( $\Phi$ ), como é possível observar na Figura 13.

#### 2.3.4.3 Coesão

A coesão, segundo Das (2014), consiste na parcela de resistência de um determinado solo independente de existir quaisquer tensões aplicadas, e se mantém, mesmo não sendo em tempo a longo prazo, se todas as tensões aplicadas forem removidas.

De acordo com Bodó e Jones (2017), em solos, onde a predominância granulométrica é a fina, a resistência ao cisalhamento é altamente dependente da umidade do solo; a forma, o tamanho e o arranjo das partículas; adesão devido à fina camada de água entre as superfícies de contato.

A coesão pode ter várias origens, Craig e Knappett (2018) salientam que a cimentação entre as partículas oriundas de todas as formas de substâncias, é responsável pelo alto valor de coesão. Vale lembrar que os agentes cimentantes podem ser oriundos do próprio solo, após o processo de intemperismo

Existe ainda, um outro tipo de coesão, que Bodó e Jones (2017) denominam como coesão aparente, que é bem comum na natureza e não é oriunda da cimentação e tão pouco das forças intrínsecas de atração. Normalmente, esse tipo de coesão ocorre em solos parcialmente saturados e desaparece quando o solo possui grau de saturação de 100% ou totalmente seco e a sua intensidade aumenta na medida em que diminui o tamanho das partículas envolvidas.

Uma das grandes razões das areias se manterem unidas, é devido a esse tipo de coesão, que é causada pela tensão superficial da água, atuando nos bordos da fina camada de água entre as superfícies de contato dos solos de granulometria fina e solos úmidos.

Os solos são referenciados, com relação à sua coesão da seguinte forma:

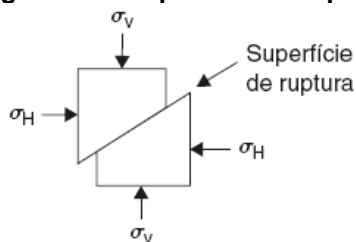
- Solo  $\Phi$ : quando a coesão é igual a zero ( $c=0$ );
- Solo  $c$ : quando o ângulo de atrito é igual a zero ( $\Phi=0$ );
- Solo  $c-\Phi$ : quando o ângulo de atrito e coesão são nulos;

#### 2.3.4.4 Resistência ao Cisalhamento

A capacidade dos solos de suportar cargas depende da resistência de cisalhamento. Caputo (2015) define essa resistência pela máxima tensão que pode atuar no solo em que ocorra ruptura, assim como a limitação das deformações excessivas.

Através da Figura 14, podemos ter a representação da resistência ao cisalhamento dos solos, ou seja, representando a máxima resistência às tensões cisalhantes.

**Figura 14 – Superfície de ruptura**



**Fonte: Bodó e Jones (2017)**

Vicieli (2003) define o cisalhamento dos solos pela máxima tensão que um determinado solo pode suportar antes da ocorrência da ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que estiver a ruptura estiver ocorrendo.

A resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área específica que essa massa pode oferecer para resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de qualquer plano em seu interior. É preciso compreender a natureza da resistência ao cisalhamento para que seja possível analisar os problemas de estabilidade do solo, tais como capacidade de carga, estabilidade de taludes e pressão lateral em estruturas de contenção de terra.

(DAS, 2014, p. 355)

Silva (2015) aponta que o ensaio de cisalhamento direto é uma metodologia que pode ser empregada com vistas a determinar as propriedades de resistência ao corte ou ao cisalhamento do solo. Os dados principais que podem ser obtidos através desse ensaio são o de ângulo de atrito e a coesão do solo.

### 2.3.5 Outros Parâmetros

#### 2.3.5.1 Compactação dos Solos

Para Craig e Knappett (2018), a compactação é um processo que tem por objetivo aumentar a densidade (massa específica) de um determinado solo, adensando (agrupando) as partículas envolvidas com a redução dos índices de vazios, ou seja, a redução no volume de ar.

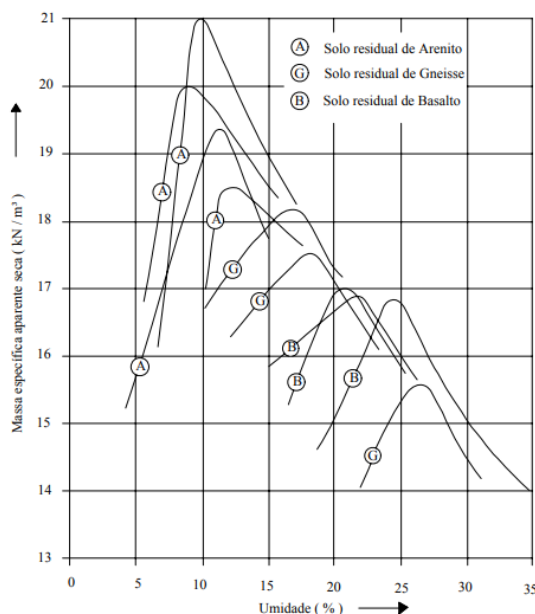
Como princípio básico da compactação dos solos, Das (2014) aponta que de uma forma geral, a compactação requer energia mecânica, e o grau de compactação

de um determinado solo é obtido tendo o peso específico seco como referência para a sua análise. Quando é adicionado água ao solo estudado, ela tem como objetivo de atuar como um agente externo no amolecimento das partículas envolvidas, logo, essas partículas se deslizam entre si e se movem para uma posição densamente compactada. Em seguida, após essa compactação, o peso específico seco aumenta em função do aumento da umidade aplicada.

Com relação ao principal fator que afeta a compactação de um solo, Das (2014) aponta que o tipo de solo exerce enorme influência sobre o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo. De acordo com a Figura 15, é possível observar curvas de compactação normal, elas mostram uma análise comparativa das curvas de compactação típicas obtidas de alguns tipos de solos brasileiros.

Se a argila for compactada com teor de umidade no ramo seco do lado esquerdo do teor de umidade ótimo, ela vai obter uma estrutura floclada. Esse tipo de estrutura ocorre quando em baixos teores de umidade as camadas duplas difusas de íons ao redor das partículas de argila podem não estar totalmente desenvolvidas (DAS, 2014).

**Figura 15 – Curvas de Compactação típicas de solos brasileiros**



Fonte: Adaptado de Vargas (1977)

### 2.3.5.2 Permeabilidade dos Solos

De acordo com Craig e Knappett (2018), os solos são materiais permeáveis, e a água é um elemento muito presente nos solos, ocupando parcialmente, senão totalmente, do volume de vazios dele. Ou seja, os solos são permeáveis devido à existência de vazios interconectados no material, facilitando a passagem do fluido. Quando a água fica submetida a diferenças de potenciais ela percorre em direção ao interior ao solo, originando distintos tipos de tensões. O sentido do fluxo sempre parte dos pontos de maior energia para os pontos de menor energia.

Das (2014) salienta a importância do estudo do fluxo da água no solo. Seu estudo fornece uma estimativa em relação a quantidade de fluxo subterrâneo e, analisa, através de diversos pontos de vista, as suas respectivas condições hidráulicas. Tem como intuito investigar os mais variados problemas geológicos envolvidos com bombeamento de água nas construções subterrâneas, na análise de estabilidade de barragens, estruturas de contenção e os mais diversos projetos de engenharia envolvendo as forças de percolação.

A percolação é controlada por um dos parâmetros físicos mais importantes que analisa a taxa de percolação no solo, que Massad (2016) denomina condutividade hidráulica ( $k$ ) e coeficiente de permeabilidade.

A poropressão (pressão da água nos poros do solo), segundo Craig e Knappett (2018), pode ser obtida através da medição em relação à pressão atmosférica. Logo abaixo do nível d'água, o solo em questão é considerado totalmente saturado, mesmo na presença de minúsculos volumes de ar confinados, tornando o grau de saturação sempre inferior a 100%.

Ainda sobre a condição do solo abaixo do lençol freático, Craig e Knappett (2018) ainda afirmam que a água presente nos poros de um determinado solo pode ser apresentada de forma estática, com a pressão hidrostática dependendo da profundidade ou percorrendo no decorrer do solo através de um gradiente hidráulico.

Craig e Knappett (2018) comentam que “o teorema de Bernoulli pode ser aplicado à água dos poros, mas as velocidades de percolação em solos normalmente são tão pequenas que a carga cinética pode ser ignorada”. Dessa forma, através da Equação 6.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

Equação 6

Onde:

$h$  é a carga total (carga hidráulica)

$u$  é a poropressão

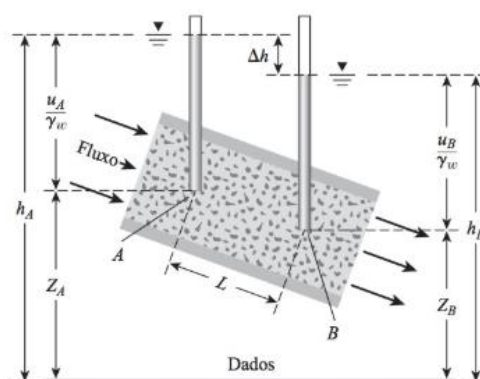
$\gamma_w$  é o peso específico da água

$z$  é carga altimétrica acima de um referencial escolhido

De acordo com DAS (2014), denomina-se carga piezométrica a altura da coluna vertical da água presente em um piezômetro instalado em ponto de interesse. Sendo que piezômetros são tubos abertos posicionados verticalmente com o objetivo de identificação da carga piezométrica, como os exemplificados nos pontos A e B da Figura 16.

Através da Figura 16, podemos observar a relação entre as cargas piezométrica, altimétrica e total para o fluxo de água através do solo.

**Figura 16 – Cargas piezométrica, altimétrica e total para o fluxo de água através do solo**



Fonte: Braja (2014)

Vale lembrar que a perda de carga ( $\Delta h$ ) entre dois pontos, A e B pode ser determinada pela diferença entre  $h_A$  e  $h_B$ . Um gradiente hidráulico ( $i$ ), pode ser determinado através da Equação 7, onde  $L$  é a distância entre os pontos A e B.

Equação 7

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Caputo (2015) salienta que a condutividade hidráulica é um coeficiente oriundo da Lei de Darcy, que detalha o percurso da água em meios mais porosos. A respectiva lei é expressa através da Equação 8.

$$v = k.i \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

$v$  é a velocidade;

$i$  é o gradiente hidráulico dado pela relação  $h/L$  ou seja, carga a ser dissipada (altura de coluna d'água) por distância no qual a carga se dissipa e;

$k$  é a constante de permeabilidade, dada pela velocidade de percolação ( $V_s$ ) através de uma área unitária por um gradiente unitário.

Outro fenômeno que pode ser ocasionado pelo fluxo de água no interior do solo é a erosão. Bodó e Jones (2017) denomina alguns termos para essa erosão, como por exemplo, “*piping*”, erosão retro regressiva e areia movediça. Essa erosão é causada pelo fluxo d'água de baixo para cima sob velocidade crítica na areia fina, nesse estado, o solo não tem capacidade de carga, ou seja, a sua capacidade em suportar estruturas é comprometida.

Para evitar o fenômeno de “*piping*”, Bodó e Jones (2017) salienta que é preciso aumentar o fator de segurança através da instalação do material de filtro sobre a determinada zona e aumentar o comprimento das linhas de fluxo.

Em relação a condutividade hidráulica ( $k$ ), Das (2014) aponta que para determina-la vai depender de diversos fatores como viscosidade do fluido, distribuição granulométrica, índices de vazios, rugosidade e grau de saturação do solo, em solos argilosos, a estrutura desse solo tem função primordial na condutividade hidráulica, além da concentração iônica e a espessura das camadas de água retidas nas partículas argilosas.



**Tabela 4 – Valores típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados**

<b>Tipo de solo</b>	<b>k (cm/s)</b>
Pedregulho limpo	100 - 1,0
Areia grossa	1,0 - 0,01
Areia fina	0,01 - 0,001
Areia com silte	0,001 - 0,00001
Argila	< 0,000001

**Fonte: DAS (2014)**

Para a determinação da condutividade hidráulica, são utilizados dois ensaios: Ensaio de carga constante e ensaio de carga variável.

A Tabela 4, apresenta os valores típicos de condutividade hidráulica encontradas em solos saturados. É possível observar que a condutividade hidráulica para solos argilosos é extremamente baixa.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A região de onde foram retiradas as amostras de solo residual de basalto é a de Guarapuava, localizada no terceiro planalto paranaense. O município conta com uma área da unidade territorial de 3.168,087 km<sup>2</sup> e com uma população de 181.504 habitantes. (IBGE, 2019)

**Figura 17 – Localização espacial do município de Guarapuava - PR**



**Fonte: GUARAPUAVA (2002)**

A localização espacial do município de Guarapuava pode ser observada através da Figura 17.

De acordo com o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Guarapuava (1992), margeando o sudeste do município, os basaltos afloram em dois derrames com espessuras médias de 30 metros, formando a base da “serra” (escarpa) do Jordão.

#### 3.2 BANCO DE DADOS

A construção do banco de dados geotécnicos de um solo residual de basalto se deu pela metodologia Methodi Ordinatio, onde foram seguidas as etapas descritas

através da Figura 1. Inicialmente foi definida a intenção da pesquisa, realizada a pesquisa preliminar com as palavras-chaves na base de dados, foi definida a combinação dessas palavras-chaves e das bases de dados utilizadas e realizada uma busca definitiva de dados.

Em seguida, foram aplicados os procedimentos de filtragem, onde são filtrados os estudos coerentes de acordo com as intenções da pesquisa, após isso, houve a identificação do fator de impacto e o número de citações.

A sétima etapa foi a ordenação de relevância científica utilizando o InOrdinatio, a utilização se dá através da equação 9, utilizando a ferramenta do Excel para a elaboração da planilha dos cálculos e na ordenação dos artigos.

$$InOrdinatio = \left( \frac{Fi}{1000} \right) + \left( \alpha \cdot (10 - (AnoPesq - AnoPub)) \right) + (Ci) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

(Fi) é o Fator de Impacto

( $\alpha$ ) é o valor que se atribui ao ano

(AnoPesq) é o ano onde a pesquisa está sendo realizada

(AnoPub) é o ano que o artigo foi publicado

(Ci) total de citações localizadas

Após essa ordenação dos artigos científicos, é realizada a localização dos estudos em formato integral, diretamente no Google Scholar. A última etapa foi a leitura e análise atenta de cada artigo. Foram atribuídos os critérios como localização do solo e ensaios realizados levando em consideração a ordenação já realizada em etapas anteriores, utilizando a relevância dos estudos envolvidos.

### 3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

#### 3.3.1 Granulometria

A análise granulométrica faz parte dos procedimentos dos ensaios de caracterização física do solo.

Caracterizado como um solo argiloso, o solo residual de basalto vai ser submetido a duas metodologias de ensaios: Peneiramento e Sedimentação. Ambas foram realizadas respeitando os parâmetros normativos da NBR 7181:2016, versão corrigida de 2018. Além disso, as amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457:2016.

Com relação à aparelhagem necessária para a execução do ensaio de granulometria, basicamente se consiste em:

- Estufa, capaz de manter a temperatura variando entre 105°C e 110°C;
- Balanças com sensibilidades compatíveis;
- Recipientes adequados, para conter as amostras;
- Aparelho de dispersão e copo munido de chicanas;
- Provetas de vidro, com capacidade de 1000 cm<sup>3</sup> e 250 cm<sup>3</sup>;
- Densímetro de bulbo simétrico, calibrado a 20°C e com resolução de 0,001 mm graduado de 0,995 a 1,050;
- Termômetro graduado em 0,1°C;
- Relógio com indicação de segundos;
- Béquer de vidro, com capacidade de 250 cm<sup>3</sup>;
- Peneiras indicadas na Tabela 1;

### 3.3.1.1 Ensaio de peneiramento

Consiste na agitação constante de uma determinada amostra de solo em um conjunto de peneiras que tenham aberturas decrescentes, ou seja, a primeira peneira possui uma abertura maior e as demais aberturas vão diminuindo de diâmetro. A relação de peneiras, com as suas respectivas aberturas são mostradas na Tabela 5, no qual segue o padrão americano ASTM (DAS, 2014).

**Tabela 5 – Tamanho de peneiras conforme padrão americano**

Nº da peneira	Abertura (mm)	Nº da peneira	Abertura (mm)
4	4,750	35	0,500
5	4,000	40	0,425
6	3,350	50	0,355
7	2,800	60	0,250
8	2,360	70	0,212
10	2,000	80	0,180
12	1,700	100	0,150
14	1,400	120	0,125
16	1,180	140	0,106
18	1,000	170	0,090
20	0,850	200	0,075
25	0,710	270	0,053
30	0,600		

**Fonte: ASTM (2010)**

Esse ensaio, segundo Das (2014), é aplicável para partículas com diâmetros maiores que 0,075 mm, ou seja, usado em casos das partes mais grosseiras do solo estudado. Subdividido em peneiramento grosso e peneiramento fino.

Para dar início ao processo de peneiramento grosso, o material foi passado na peneira de 2,0 mm, tendo a precaução de desmanchar os torrões eventualmente encontrados. Em seguida, foi lavada essa parte retida na peneira e encaminhada à estufa com temperatura variando de 105°C e 110°C.

O processo seguinte foi a pesagem do material para o peneiramento grosso, para em seguida levar ao agitador mecânico contendo as peneiras de aberturas de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm, anotando as porcentagens retidas em cada peneira.

Os grãos retidos em cada peneira são recolhidos cuidadosamente para análise, as massas retidas em cada peneira somando-se com a massa retida no prato deverá ter a massa total aproximadamente igual ao da amostra.

A Figura 18 mostra o equipamento utilizado no ensaio de peneiramento para análise granulométrica.

**Figura 18 – Conjunto de peneiras**

Fonte: Autor (2020)

Para o processo de peneiramento fino, o material foi levado à peneira de 0,075 mm, a parte retida foi lavada e levada para a estufa. Após a secagem desse material, foi encaminhado para o agitador mecânico contendo as seguintes aberturas das peneiras: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, anotando as porcentagens retidas em cada peneira.

Após a realização do ensaio de peneiramento, uma curva granulométrica foi elaborada a partir dos resultados obtidos no respectivo ensaio compatibilizada com os resultados do ensaio de sedimentação.

### 3.3.1.2 Ensaio de sedimentação

Para Massad (2016), quando se há um interesse em determinar a distribuição granulométrica da parte mais fina do solo, o ensaio de sedimentação é aplicável, pois é usado quando os diâmetros das partículas sejam menores que 0,075 mm. Essa técnica consiste basicamente no princípio da sedimentação dos grãos de solo na água, ou seja, quando é dispersada na água essa amostra do solo estudado, as partículas envolvidas sedimentam em diferentes velocidades, esse princípio é baseado na lei de Stoke, as partículas desse solo são consideradas circulares e que essa velocidade é baseada na respectiva lei (DAS, 2014).

A lei de Stokes, segundo Massad (2016), “permite a determinação da velocidade limite de esferas em queda livre num fluido viscoso”, ou seja, a velocidade ( $v$ ) oriunda da queda das partículas, consideradas esféricas, em um determinado

fluido alcança um valor limite que está ligado com a massa específica do material da esfera ( $\gamma_s$ ), da massa específica do fluido ( $\gamma_w$ ), com a viscosidade do fluido ( $\mu$ ), e do diâmetro da esfera ( $D$ ), conforme a Equação 10.

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D \quad \text{Equação 10}$$

Essa técnica consiste em colocar 70 gramas de solo dispersa em um béquer com um litro de água contendo agente antifloculante durante 24 horas com a finalidade de desagregar as partículas do solo, para que essas partículas envolvidas fiquem suspensas na água.

Essa quantidade de solo foi justificada pelo tipo de solo, pois a norma já traz essa quantidade para solos argilosos, que é o solo estudado na presente pesquisa.

Realizado esses procedimentos iniciais, o solo foi colocado em um copo de dispersão e agitado durante 15 minutos e inserido na proveta de aproximadamente 1 litro, como mostra na Figura 19.

**Figura 19 – Proveta de 1000 cm**

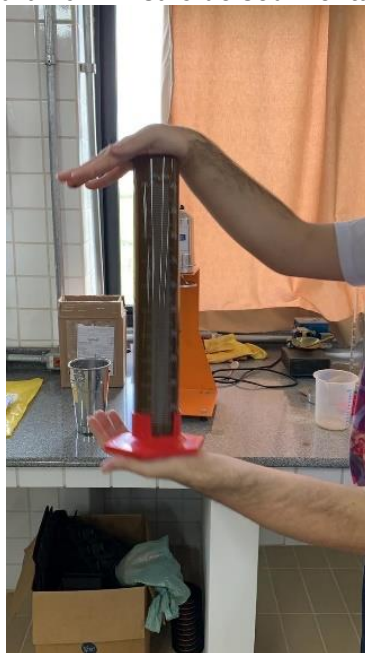


**Fonte: Autor (2021)**

Em seguida, como mostra na Figura 20, a proveta foi fortemente agitada durante 1,0 minuto e colocada sobre a mesa, imediatamente foi acionado o cronômetro e inserido o densímetro na suspensão para realizar as leituras iniciais com

um tempo inicial de 0,5 min, 1,0 min e 2,0 min. A norma recomenda a repetição dessas três primeiras leituras para eventuais mudanças.

**Figura 20 – Ensaio de sedimentação**



**Fonte: Autor (2021)**

Após a etapa inicial, foram realizadas as leituras subsequentes à 4,0 min, 8,0 min, 15,0 min e 30,0 min e 1,0 h, 2,0 h, 4,0 h, 8,0 h e 24,0 h a contar do início de sedimentação.

Foi necessário cautela na retirada do densímetro, pois a norma exige que seja realizada de maneira lenta e com movimento giratório. Na Figura 21 podemos observar o densímetro inserido durante a realização da leitura.

Após cada leitura, excetuadas as duas primeiras, foi medida a temperatura da dispersão.

Ao final da última leitura, o material foi vertido da proveta na peneira 0,075 mm, removendo com água de todo o material que tenha ficado nas paredes da peneira. O material foi encaminhado para a estufa e após a secagem foi levado ao agitador mecânico com as peneiras de aberturas de: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, anotando as porcentagens retidas em cada peneira.

Os dados obtidos em laboratório foram plotados em um gráfico compatibilizado com os resultados do ensaio de peneiramento.



**Figura 21 – Leitura do densímetro**

Fonte: Autor (2021)

A distribuição granulométrica, para Craig (2018), é apresentada através de um gráfico semilogarítmico, levando em consideração o diâmetro dos grãos e a porcentagem passante.

### 3.3.2 Peso Específico

A realização do ensaio para a obtenção do peso específico foi feita em conformidade com a NBR 6458:2016, versão corrigida de 2017.

Onde foram utilizados os seguintes aparelhos:

- Estufa, capaz de manter a temperatura variando entre 105°C e 110°C;
- Balanças com sensibilidades compatíveis;
- Recipientes adequados, para conter as amostras;
- Picnômetro ou balão volumétrico;
- Bomba a vácuo;
- Funil de vidro;

Inicialmente foi colocada a amostra de solo, através do funil de vidro no picnômetro, em seguida foi inserida a água no respectivo recipiente para ser levado até a bomba a vácuo, onde seriam retiradas as bolhas de dentro da solução, ou seja,

o ar presente seria retirado para em seguida ser pesado na balança. Esse processo pode ser visto através da Figura 22.

**Figura 22 – Ensaio Peso Específico**



**Fonte: Autor (2021)**

Em seguida, observando através da Figura 23, com o auxílio do funil de vidro, foi inserida a água no picnômetro e pesada na balança, o processo da retirada de ar presente na água foi parecido com o descrito anteriormente, levado até a bomba a vácuo para a retirada do ar.

**Figura 23 – Segunda parte do ensaio de Peso específico**



**Fonte: Autor (2021)**

### 3.3.3 Limites de Atterberg

Para determinação dos limites de consistência do solo residual de basalto da região de Guarapuava, foram utilizados os ensaios envolvendo os limites de Atterberg, como o ensaio de limite de liquidez (LL) e o ensaio de limite de plasticidade (LP). Para a determinação dos limites de consistência, foram utilizados os parâmetros normativos das NBR 6459 e NBR 7180.

#### 3.3.3.1 Ensaio limite de plasticidade

Após o preparo da amostra, foi separada da pasta uma quantidade de 10 g e feito uma forma geométrica esférica, em seguida, essa amostra foi colocada sobre a mesa para iniciar uma rolagem da amostra até se formar em um cilindro.

A aparelhagem utilizada para a elaboração do ensaio é composta por:

- Estufa, capaz de manter a temperatura variando entre 105°C e 110°C;
- Balanças com sensibilidades compatíveis;
- Recipientes adequados, para conter as amostras;
- Espátula de lâmina flexível;
- Placa de vidro;

**Figura 24 – Amostras obtidas nas respectivas cápsulas**



**Fonte: AUTOR (2020)**

Cada amostra retirada, após a realização de cada ensaio, foi inserida em uma determinada cápsula, ao todo, foram utilizadas cinco cápsulas para cada ensaio, como é possível observar na Figura 24, as respectivas cápsulas foram nomeadas de A1 até

A5, para o ensaio de limite de liquidez, e nomeadas de B1 até B5 para os ensaios de limite de plasticidade.

Durante o ensaio foi necessário ter muito cuidado e observar atentamente a superfície rolada, quando ocorrer o aparecimento de fissuras, determina-se o teor de umidade das partes da amostra que já se encontram fissuradas, o procedimento é repetido até que se tenha um mínimo de 5 pontos que satisfaçam as condições previamente solicitadas.

O Limite de plasticidade foi definido como a média dos teores de umidade obtidos em ensaio para 5 determinações.

### 3.3.3.2 Ensaio limite de liquidez

Para a realização do ensaio de limite de liquidez foram utilizados os parâmetros normativos indicados pela NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do limite de liquidez, versão corrigida de 2017.

A Figura 25 indica a preparação das amostras para o ensaio dos limites de consistência do solo.

**Figura 25 – Preparação das amostras**



**Fonte: AUTOR (2020)**

A relação de aparelhos utilizados para a elaboração do ensaio é composta por:

- Estufa, capaz de manter a temperatura variando entre 105°C e 110°C;
- Balanças com sensibilidades compatíveis;

- Recipientes adequados, para conter as amostras;
- Espátula de lâmina flexível;
- Aparelho de Casagrande;
- Cinzel;

Esse ensaio consistiu basicamente em determinar o teor de umidade necessário para se fechar a ranhura de um solo residual de basalto da região de Guarapuava, essa amostra de solo foi inserida sobre uma concha, que se chama aparelho de Casagrande, esse material não ocupa mais que a  $2/3$  desse aparelho, em seguida, foram aplicados um número de golpes necessários para o fechamento da ranhura no aparelho, a realização do ensaio pode ser observada através da Figura 26.

**Figura 26 – Limite de Liquidez**



Fonte: AUTOR (2020)

Foram realizadas um número mínimo de tentativas, cada uma com um diferente teor de umidade, sempre registrando o número de golpes executados para se “fechar” a ranhura realizada antes do ensaio por um cinzel. Em seguida os dados obtidos desse ensaio são interpolados correspondendo aos 25 golpes aplicados, se obtendo o valor do Limite de liquidez do solo estudado.

## 4 RESULTADOS

O programa experimental dessa pesquisa foi realizado por meio da coleta de amostras em campo e submetidas a alguns tipos de ensaios de caracterização geotécnica. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Guarapuava.

Com relação a classificação do estudo, a pesquisa é caracterizada como bibliográfica, quantitativa e descritiva, visto que foi realizado o levantamento bibliográfico sobre o assunto e será realizada a coleta de amostras de solo em campo *in situ* e a submissão dessas amostras a ensaios laboratoriais e serão analisadas as descrições dos resultados obtidos.

As amostras deformadas e indeformadas foram retiradas de um ponto do município, localizado no Campus da UTFPR, como mostra a Figura 27, com dimensões próximas de 50x50x50 cm.

**Figura 27 – Ponto de coleta na UTFPR campus de Guarapuava**



**Fonte: AUTOR (2020)**

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO COLETADO EM GUARAPUAVA-PR

A caracterização do solo de Guarapuava se deu pelos ensaios envolvendo os limites de consistência (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade) e a análise por granulometria (Peneiramento e Sedimentação).

#### 4.1.1 Limites de Atterberg

##### 4.1.1.1 Limite de Liquidez

O limite de liquidez encontrado foi de 44,67%, a Tabela 6 mostra os dados obtidos em laboratório das amostras nas cinco cápsulas.

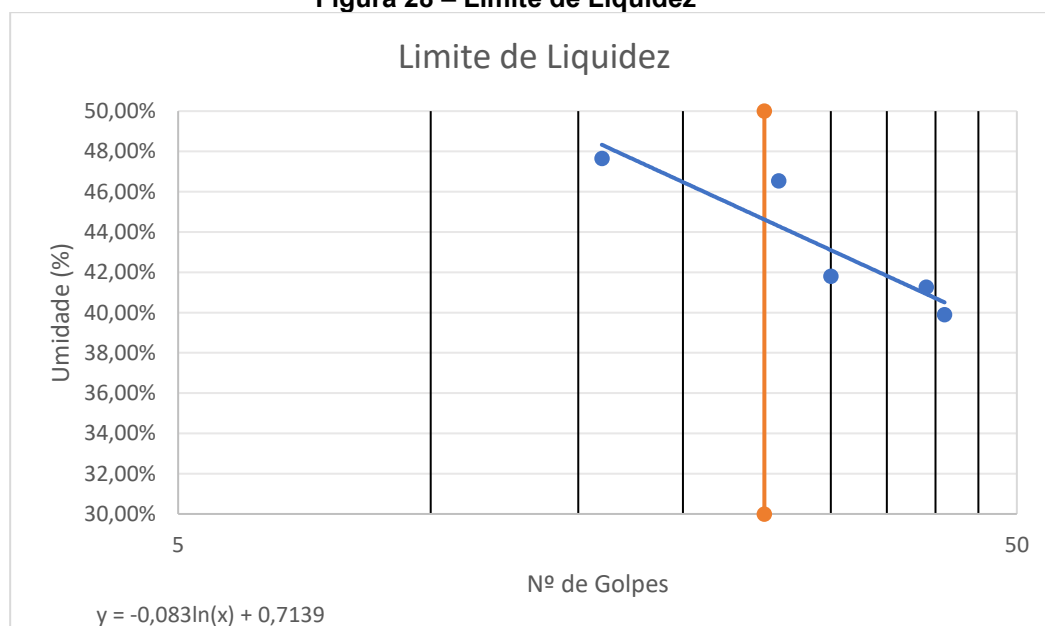
**Tabela 6 – Resultado para o Limite de Liquidez**

Limite de Liquidez							
Cápsula	Tara Cápsula (g)	Peso Úmido (g)	Peso Seco (g)	Ww (g)	Ws(g)	Umidade	Nº de Golpes
A-1	16,29	26,67	23,71	2,96	7,42	39,89%	41
A-2	17,09	31,23	27,10	4,13	10,01	41,26%	39
A-3	16,23	31,80	27,21	4,59	10,98	41,80%	30
A-4	17,11	35,09	29,38	5,71	12,27	46,54%	26
A-5	16,11	36,59	29,98	6,61	13,87	47,66%	16

Fonte: Autor (2020)

Após a obtenção dos dados em laboratório, um gráfico foi elaborado com o intuito de encontrar o limite de liquidez, esse gráfico pode ser visto através da Figura 28. Com o ajuste de uma reta, encontramos a Equação 11 mostrada no próprio gráfico.

**Figura 28 – Limite de Liquidez**



Fonte: Autor (2020)

Com a equação ajustada do gráfico pode-se, finalmente, encontrar o valor de Limite de Liquidez (LL), que é o valor do teor de umidade no qual o número de golpes é 25. Portanto, resolvendo a equação, tem-se:

$$y = -0,083 \ln(x) + 0,7139 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$y$  é o número de golpes;

$x$  é o Limite de Liquidez;

Logo, obtemos o valor de 44,64%, classificando a amostra, de acordo com Bodó (2017), como um solo argiloso, pois o limite de liquidez se encontra na média entre 40% e 80%.

#### 4.1.1.2 Limite de Plasticidade

O ensaio de limite de plasticidade resultou em 37,09%. Esse resultado se deu pelo cálculo dos valores obtidos em laboratório, mostrados através da Tabela 7, onde a média das 5 determinações do teor de umidade é 0,3656. O resultado obtido na cápsula A-5 se afasta em mais de 5% da média aritmética na variação dos resultados, portanto seu valor é desconsiderado para o cálculo do LP.

**Tabela 7 – Resultado para o Limite de Plasticidade**

<b>Limite de Plasticidade</b>						
Cápsula	Tara Cápsula (g)	Peso Úmido (g)	Peso Seco (g)	Ww (g)	Ws(g)	Umidade
A-1	17,21	20,10	19,31	0,79	2,10	37,62%
A-2	17,09	21,05	20,01	1,04	2,92	35,62%
A-3	17,49	20,79	19,88	0,91	2,39	38,08%
A-4	17,01	19,71	18,98	0,73	1,97	37,06%
A-5	16,96	20,59	19,66	0,93	2,70	34,44%

**Fonte: Autor (2020)**

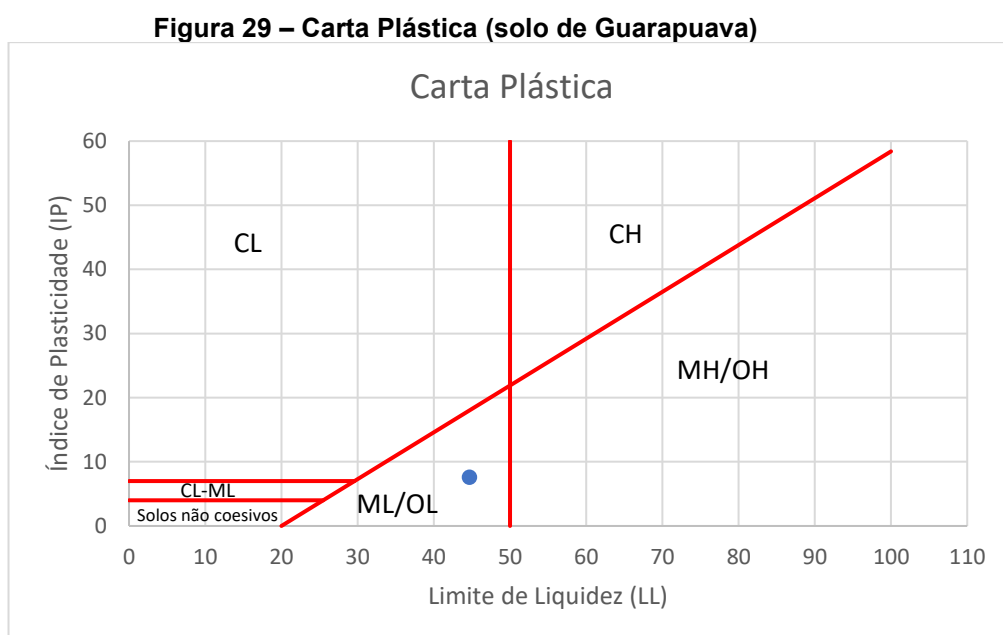


#### 4.1.1.3 Índice de Plasticidade (IP)

Se obtemos os resultados dos limites de liquidez e de plasticidade, podemos calcular o índice de plasticidade, que como mostra a Equação 9, é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

Com esses valores encontrados, obtemos o Índice de Plasticidade de 7,58%, classificando o solo, de acordo com a Tabela 3, como um solo de plasticidade baixa, pois sua classificação se enquadra entre 5% a 10%.

Após encontrar o Índice de Plasticidade e o Limite de Liquidez, pode-se classificar o solo, pela classificação unificada (SUCS), através do ábaco de Casagrande por regiões, evidenciado através da Figura 29. Analisando o ábaco, podemos observar que os resultados se enquadram na região ML, correspondente a um solo silteoso inorgânico de compressibilidade mediana ou siltes orgânicos.



Fonte: Autor (2020)

#### 4.1.1.4 Índice de Consistência (IC)

De acordo com a NBR 6502:1980, o Índice de Consistência pode ser encontrado através da Equação 12, onde é necessário já se ter obtido os limites de liquidez e plasticidade.

$$IC = \frac{LL - w}{IP} \quad \text{Equação 12}$$

O teor de umidade (w) foi de 37%, encontrada através da razão entre o peso do solo e o peso da água medidos.

Logo, o Índice de Consistência encontrado foi de 0,2067, classificado de acordo com a Tabela 8, como um solo argiloso mole, pois apresenta IC entre 0 e 0,50.

**Tabela 8 – Índice de Consistência**

Classificação IC	
muito moles	IC < 0
moles	0 < IC < 0,5
médias	0,5 < IC < 0,75
rijas	0,75 < IC < 1
duras	IC > 1

Fonte: Autor (2020)

#### 4.1.1.5 Índice de Atividade

De acordo com DAS (2014), o índice de atividade do solo é definido como a inclinação que relaciona o Índice de Plasticidade com o percentual de grãos finos envolvidos no solo, esse índice pode ser encontrado através da Equação 13. Esse índice mostra a capacidade da argila presente no solo de transmitir plasticidade e o seu resultado fornece uma indicação mineralógica sobre a parte argilosa do solo.

$$IA = \frac{LL - LP}{\% \text{ Argila}} \quad \text{Equação 13}$$

Através do ensaio de granulometria, obtivemos o teor de argila no solo estudado de 40,66%. Logo, o Índice de Atividade encontrado foi de 0,1864.

A Tabela 9 apresenta a classificação o índice de atividade, com o resultado obtido, o índice de atividade do solo de Guarapuava se classifica como de grande atividade, devido ao alto teor de argila presente no solo.

**Tabela 9 – Índice de Atividade**

<b>Atividade</b>	<b>Valor</b>
Normal	IA < 0,7
Média	0,7 < IA < 1,5
Grande	IA > 1,5

**Fonte: Rodrigo Vieira Luciano et. al. (2012)**

#### 4.1.2 Peso Específico

O peso específico dos grãos, também chamado de massa específica dos sólidos, é uma característica que expressa a relação entre a massa das partículas e o seu volume, expresso pelo símbolo  $\gamma_s$ .

No ensaio realizado, foi obtido o valor de 2,91 g/cm<sup>3</sup>, ou 29,10 KN/m<sup>3</sup>, para o peso específico dos grãos do solo residual de basalto da região de Guarapuava - PR.

#### 4.1.3 Análise Granulométrica

A análise por granulometria se deu pela realização dos ensaios de peneiramento e sedimentação, compilando os resultados obtidos na elaboração do traçado granulométrico.

##### 4.1.3.1 Peneiramento

Através da Tabela 10, é possível obter um resumo dos dados coletados em laboratório durante o ensaio de granulometria por peneiramento, onde são especificadas as massas retidas em cada peneira e a porcentagem dos tamanhos das partículas que compõem o solo.

**Tabela 10 – Resumo do ensaio de peneiramento**

Abertura das peneiras (mm)	Massa do solo retido em cada peneira (g)	Percentual de solo retido em cada peneira	Percentual retida acumulada	Percentual de solo que passa na peneira
9,75	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
4,75	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
2,36	1,91	0,71%	0,71%	99,29%
1,18	15,5	5,73%	6,44%	93,56%
0,6	23,7	8,77%	15,21%	84,79%
0,425	19,3	7,14%	22,34%	77,66%
0,212	21,3	7,88%	30,22%	69,78%
0,15	19,1	7,06%	37,29%	62,71%
0,075	66,12	24,46%	61,74%	38,26%
Fundo	103,44	38,26%	100,00%	0,00%
<b>Total</b>	<b>270,37</b>	<b>100,00%</b>	-	-

Fonte: Autor (2020)

#### 4.1.3.2 Sedimentação

A Tabela 11 resume os dados coletados através do ensaio granulométrico de sedimentação do solo.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios de granulometria se deu em momentos diferentes, pois não é necessária a realização dos ensaios de peneiramento e sedimentação simultaneamente.

A Figura 30 mostra o traçado da curva granulométrica do solo residual de basalto de Guarapuava – PR.

**Tabela 11 – Resumo do ensaio de sedimentação**

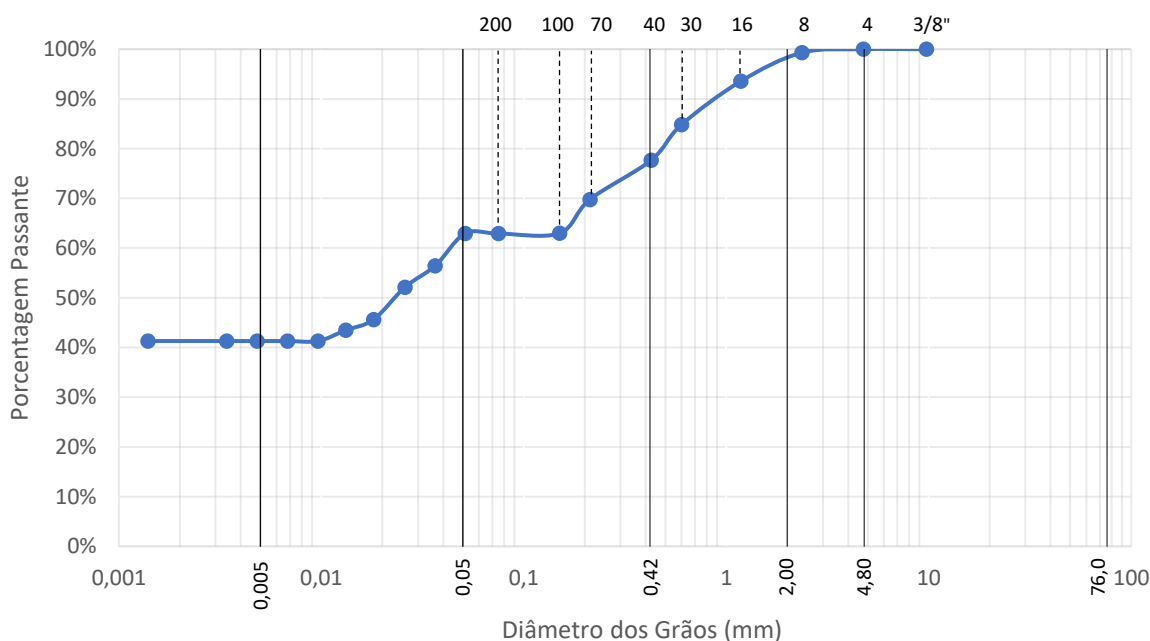
Tempo (min)	Temperatura (°C)	L (g/cm <sup>3</sup> )	Ld (g/cm <sup>3</sup> )	Qs (%)	Tempo (s)	$\mu$ (g.s/cm <sup>2</sup> )	ps (g/cm <sup>3</sup> )	pwc (g/cm <sup>3</sup> )	pmd (g/cm <sup>3</sup> )	a e a' (cm)	d (mm)
0,5	21,7	1,032	1,0029	62,92%	30	9,56E-06	2,91	1	0,9978	17,5	0,072453
1,0	21,7	1,032	1,0029	62,92%	60	9,56E-06	2,91	1	0,9978	17,5	0,051232
2,0	21,7	1,029	1,0029	56,44%	120	9,56E-06	2,91	1	0,9978	17,75	0,036484
4,0	21,8	1,027	1,0029	52,11%	240	9,56E-06	2,91	1	0,9978	17,8	0,025835
8,0	21,8	1,024	1,0029	45,62%	480	9,56E-06	2,91	1	0,9978	17,5	0,018113
15,0	21,8	1,023	1,0029	43,46%	900	9,56E-06	2,91	1	0,9978	17,4	0,01319
30,0	21,8	1,022	1,0029	41,30%	1800	9,56E-06	2,91	1	0,9978	18,5	0,009617
60,0	21,9	1,022	1,0029	41,30%	3600	9,56E-06	2,91	1	0,9978	18,5	0,0068
120,0	21,9	1,022	1,0029	41,30%	7200	9,56E-06	2,91	1	0,9978	18,5	0,004809
240,0	21,9	1,022	1,0029	41,30%	14400	9,56E-06	2,91	1	0,9978	18,5	0,0034
1440,0	21,9	1,022	1,0029	41,30%	86400	9,56E-06	2,91	1	0,9978	18,5	0,001388

Fonte: Autor (2021)

Após a elaboração do traçado da curva granulométrica, foi realizada a distribuição dos componentes granulométricos do solo estudado.

Na Figura 30, também é representada graficamente a composição granulométrica do solo de Guarapuava – PR, para essa classificação foi levada em consideração os parâmetros da NBR 7181:2016, onde estão representadas através da Tabela 1.

**Figura 30 – Gráfico da Curva Granulométrica de Guarapuava - PR**



**Fonte: Autor (2021)**

O resumo dos resultados encontrados na composição granulométrica é apresentado através da Tabela 12, onde podemos concluir que o solo residual de basalto da cidade de Guarapuava é um solo argiloso, devido a relevante presença de argilas e siltes no solo.

É possível observar que se trata de um solo argiloso com grande presença de siltes e também presença de grãos de areia.

**Tabela 12 – Resultado Distribuição Granulométrica de Guarapuava - PR**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Argila	41,30%
Silte	21,62%
Areia Fina	14,74%
Areia Média	20,93%
Areia Grossa	1,11%
Pedregulho	0,00%

Fonte: Autor (2021)

É possível observar que se trata de um solo argiloso com grande presença de siltes e também presença de grãos de areia.

#### 4.2 DADOS DA LITERATURA

O presente item tem como objetivo fazer uma análise comparativa sobre os dados obtidos nessa pesquisa, com alguns dados encontrados na literatura sobre o assunto, além de comparar os resultados encontrados entre as demais regiões. Cabe destacar que é o primeiro estudo realizado sobre os parâmetros geotécnicos na região de Guarapuava-PR, ou seja, não existem dados locais para comparação.

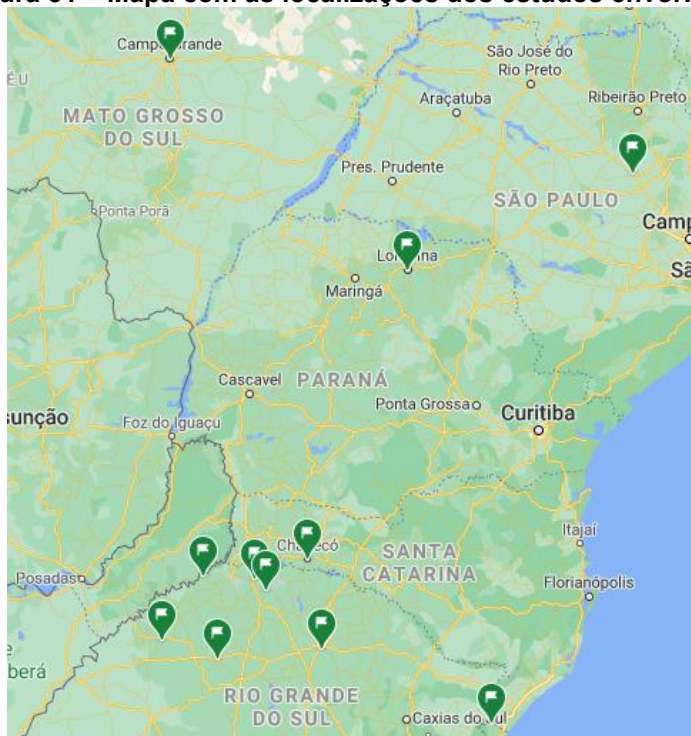
**Tabela 13 – Relação das cidades encontradas pela Revisão Sistemática**

<b>Localizações</b>	<b>Quantidade</b>
Ijuí - RS	3
Londrina - PR	2
Passo Fundo - RS	5
Chapecó - SC	4
Frederico Westphalen - RS	1
Campo Grande - MS	1
Praia Grande - SC	1
Cerro Largo - RS	1
Pinhal - RS	1
Alto Uruguai - RS	1
Vanini - RS	1
São Carlos - SP	1
Interior - SC	1
<b>Total</b>	<b>23</b>

Fonte: Autor (2021)

Ao todo, foram encontrados 23 artigos publicados que tratam sobre a caracterização geotécnica do solo residual de basalto, envolvendo 13 municípios espalhados pela região Sul, parte da região sudeste e centro-oeste. A relação de municípios e artigos pode ser observada através da Tabela 13.

**Figura 31 – Mapa com as localizações dos estudos envolvidos**



Fonte: Google Maps (2021)

A Tabela 14 apresenta o quantitativo de ensaios realizados na literatura voltados para o solo em estudo.

**Tabela 14 – Quantitativo de ensaios para o solo basáltico**

Ensaio	Quantidade
Limites de Consistência	39
Granulometria	38
Compactação	15
Cisalhamento Direto	13
Permeabilidade	11

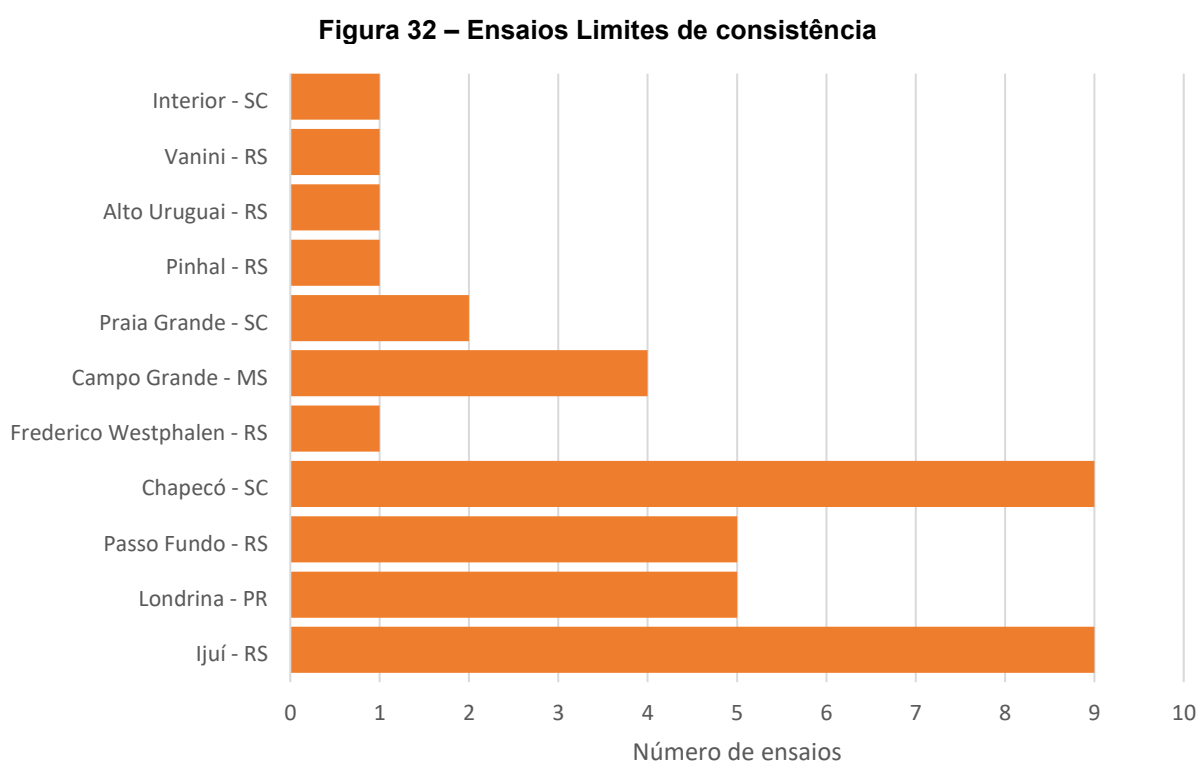
Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.1 Limites de Atterberg

Foram encontrados 39 estudos com resultados interessantes para o solo residual de basalto envolvendo os limites de consistência.

Os locais das amostras obtidas estão espalhados pela região sul e parte da região sudeste e centro-este, em 11 cidades.

A apresentação dos dados obtidos na literatura dos limites de consistência do solo estudado é observada através da Tabela 15, onde é relacionada a localização das amostras extraídas e os respectivos resultados.



**Fonte: Autor (2021)**

Os dados apresentados na Tabela 15 mostram os valores do limite de liquidez, limite de plasticidade e as suas respectivas médias aritméticas e os cálculos do desvio padrão dos dados agrupados em uma mesma localização.



Tabela 15 – Dados dos ensaios Limites de consistência

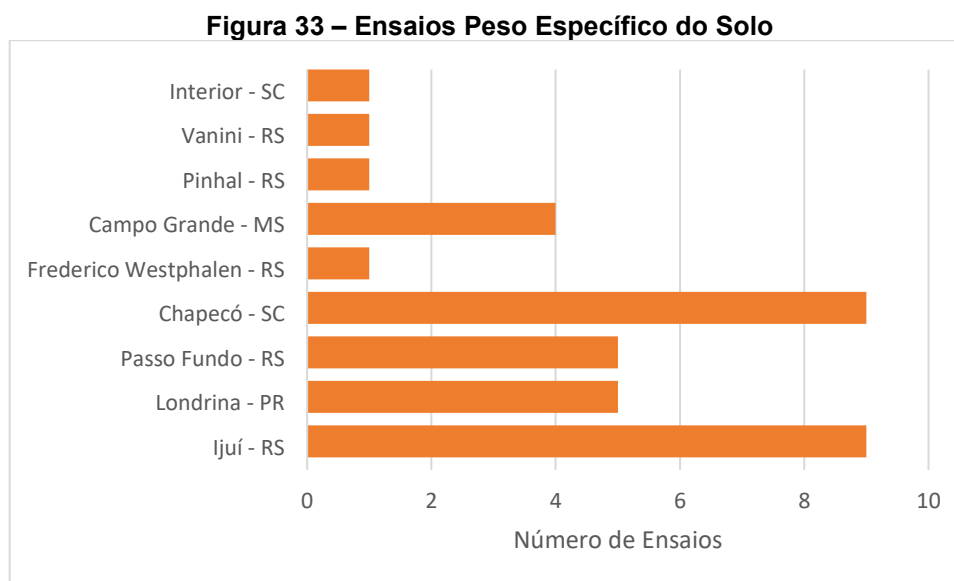
Localização	LL (%)	Média	Desvio Padrão	LP (%)	Média	Desvio Padrão
Ijuí - RS	71	64,67	8,83	23	38,44	11,69
	59			48		
	81			60		
	75			43		
	61			47		
	57			25		
	66			38		
	60			36		
Londrina - PR	52	68,20	4,53	26	49,00	3,41
	61			45		
	67			45		
	67			50		
	74			53		
Passo Fundo - RS	72	53,00	-	52	42	0
	53			42		
	53			42		
	53			42		
	53			42		
Chapecó - SC	53	59,37	5,68	39	41,32	4,00
	53,3			39,9		
	55			38		
	59			38		
	54			39		
	63			42		
	68			51		
	68			45		
61	40					
Frederico Westphalen - RS	54	54,00	-	36	36,00	-
Campo Grande - MS	44	47,50	3,77	34	38,25	4,26
	44			34		
	49			43		
	53			42		
Praia Grande - SC	65,5	57,05	8,45	47,10	39,55	7,55
	48,6			32,00		
Pinhal - RS	65	65,00	-	33,00	33,00	-
Alto Uruguai - RS	56	56,00	-	50,00	50,00	-
Vanini - RS	63	63,00	-	41,99	41,99	-
Interior de SC	76	76,00	-	56,00	56,00	-

Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.2 Peso específico

Foram encontrados 36 ensaios de peso específico realizados sobre o solo residual de basalto. Os locais das amostras obtidas estão espalhados pela região sul e centro-este, em 9 cidades.

A Figura 33 mostra a relação das cidades e o quantitativo de ensaios de peso específico encontrados na literatura.



Fonte: Autor (2021)

Os dados obtidos na literatura dos pesos específicos do solo estudado são apresentados através da Tabela 16, onde é relacionada a localização das amostras extraídas, os respectivos resultados com os valores das médias e desvio padrão.

<b>Tabela 16 – Dados dos ensaios de Peso Específico (continua)</b>			
Localização	$\gamma_s(\text{g/cm}^3)$	Média	Desvio Padrão
Ijuí - RS	2,83	2,84	0,04
	2,85		
	2,90		
	2,77		
	2,81		
	2,86		
	2,83		
	2,82		
	2,87		
Londrina - PR	3,00	3,05	0,04
	3,06		
	3,07		
	3,10		
	3,01		
Passo Fundo - RS	2,67	2,67	0,00
	2,67		
	2,67		
	2,67		
	2,67		

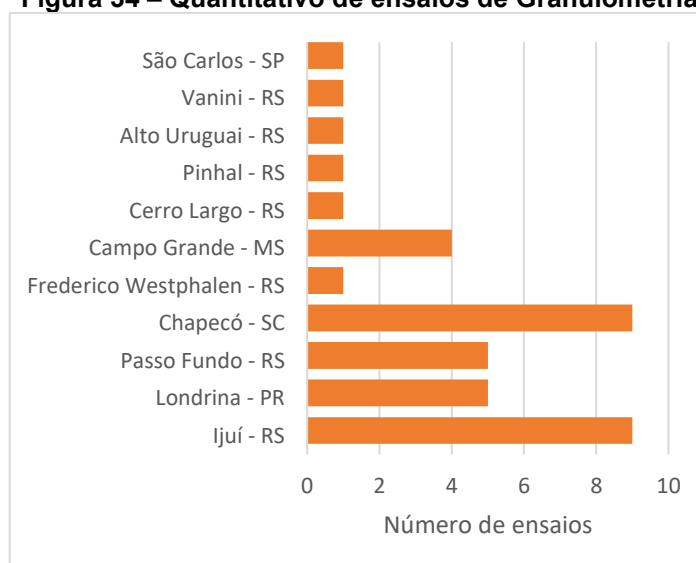
**Tabela 17 – Dados dos ensaios de Peso Específico (conclusão)**

Localização	$\gamma_s(\text{g/cm}^3)$	Média	Desvio Padrão
Chapecó - SC	2,76	2,77	0,02
	2,76		
	2,77		
	2,75		
	2,74		
	2,77		
	2,79		
	2,79		
Frederico Westphalen - RS	2,81	3,00	-
Campo Grande - MS	3,00	2,86	0,05
	2,81		
	2,82		
Pinhal - RS	2,86	2,90	-
	2,93		
Vanini - RS	2,90	2,49	-
Interior de SC	2,49	2,49	-
	2,69	2,69	-

Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.3 Granulometria

Os estudos com resultados para o solo residual de basalto envolvendo a análise granulométrica foram encontrados e apresentados na Figura 34, que mostra a relação das cidades e a quantidade de ensaios de granulometria encontrados na literatura, com 11 cidades e 38 ensaios realizados.

**Figura 34 – Quantitativo de ensaios de Granulometria**

Fonte: Autor (2021)

A apresentação dos dados obtidos na literatura das análises granulométricas do solo estudado é observada através da Tabela 17, onde é relacionada a localização das amostras extraídas e os respectivos resultados.

**Tabela 18 – Dados de ensaios de Granulometria**

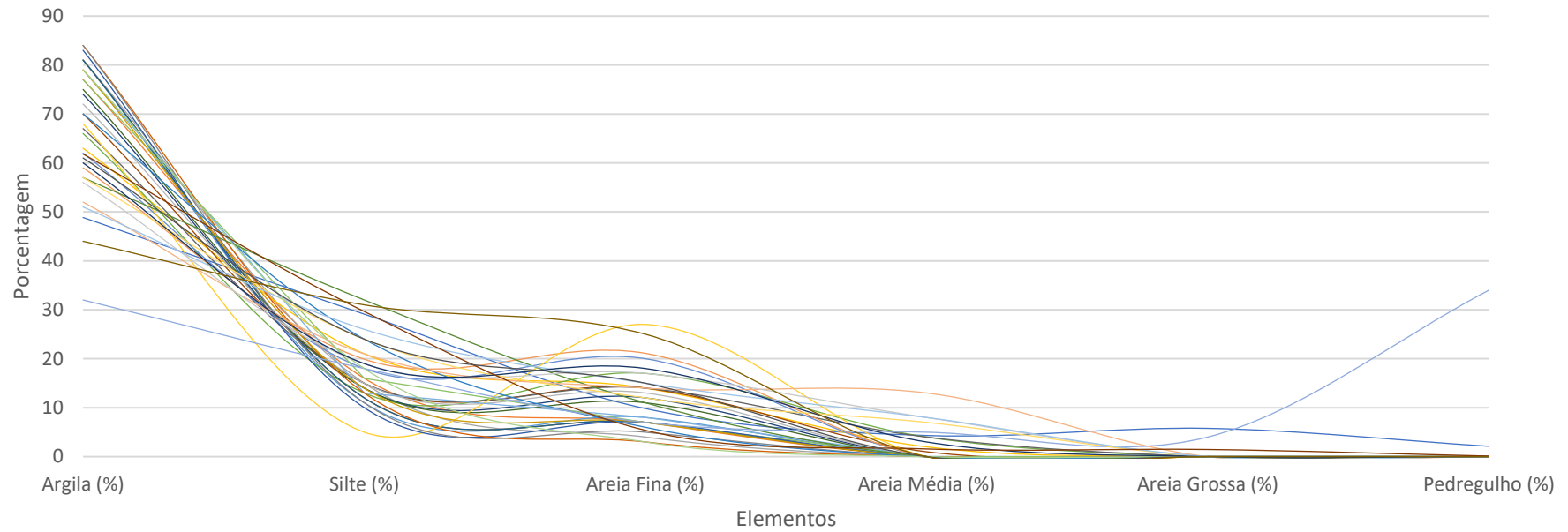
<b>Localização</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Areia Fina (%)</b>	<b>Areia Média (%)</b>	<b>Areia Grossa (%)</b>	<b>Pedregulho (%)</b>	<b>Classificação</b>
Ijuí - RS	48,85	29,10	9,82	4,32	5,78	2,12	Solo argiloso
	77,00	16,00	7,00	-	-	-	Solo argiloso
	81,00	15,00	4,00	-	-	-	Solo argiloso
	63,00	21,00	14,00	2,00	-	-	Solo argiloso
	81,00	11,00	8,00	-	-	-	Solo argiloso
	66,00	13,00	17,00	4,00	-	-	Solo argiloso
	74,00	14,00	12,00	-	-	-	Solo argiloso
	70,00	15,00	14,00	1,00	-	-	Solo argiloso
	67,00	15,00	14,00	4,00	-	-	Solo argiloso
Londrina - PR	81,00	12,00	7,00	-	-	-	Solo argiloso
	81,00	12,00	7,00	-	-	-	Solo argiloso
	75,00	14,00	11,00	-	-	-	Solo argiloso
	69,00	17,00	15,00	-	-	-	Solo argiloso
	62,00	18,00	20,00	-	-	-	Solo argiloso
Passo Fundo - RS	59,00	19,90	21,10	-	-	-	Solo argiloso
	72,00	15,00	13,00	-	-	-	Solo argiloso
	68,00	5,00	27,00	-	-	-	Solo argiloso
	68,00	5,00	27,00	-	-	-	Solo argiloso
	68,00	5,00	27,00	-	-	-	Solo argiloso
Chapecó - SC	79,00	13,00	8,00	-	-	-	Solo argiloso
	79,00	13,00	8,00	-	-	-	Solo argiloso
	77,00	16,00	7,00	-	-	-	Solo argiloso
	83,00	10,00	7,00	-	-	-	Solo argiloso
	84,00	13,00	3,00	-	-	-	Solo argiloso
	84,00	11,00	5,00	-	-	-	Solo argiloso
	79,00	14,00	7,00	-	-	-	Solo argiloso
	70,00	24,00	6,00	-	-	-	Solo argiloso
57,00	32,00	11,00	-	-	-	Solo argiloso	
Frederico Westphalen - RS	32,00	18,00	7,00	5,00	4,00	34,00	Solo argiloso
Campo Grande - MS	52,00	21,00	14,00	13,00	-	-	Solo argiloso
	56,00	19,00	17,00	8,00	-	-	Solo argiloso
	57,00	24,00	12,00	7,00	-	-	Solo argiloso
51,00	26,00	15,00	8,00	-	-	Solo argiloso	
Cerro Largo - RS	79,00	18,00	3,00	-	-	-	Solo argiloso
Pinhal - RS	60,00	19,00	18,00	3,00	-	-	Solo argiloso
Alto Uruguai - RS	61,82	29,65	5,38	1,57	1,46	0,12	Solo argiloso
Vanini - RS	61,00	24,00	15,00	-	-	-	Solo argiloso
São Carlos - SP	44,00	31,00	25,00	-	-	-	Solo argiloso

**Fonte: Autor (2021)**

Através da Figura 35 é possível observar o traçado das diversas curvas granulométricas dos diversos estudos referentes ao solo residual de basalto.

Os traçados granulométricos desses estudos indicam uma padronização com relação a quantidade de argila presente no solo, ou seja, é possível notar a alta presença de argila, o que confirma mais um dos parâmetros indicativos de solos argilosos, característica clássica de um solo residual de basalto.

**Figura 35 – Quantitativos granulométricos de solos da Literatura**



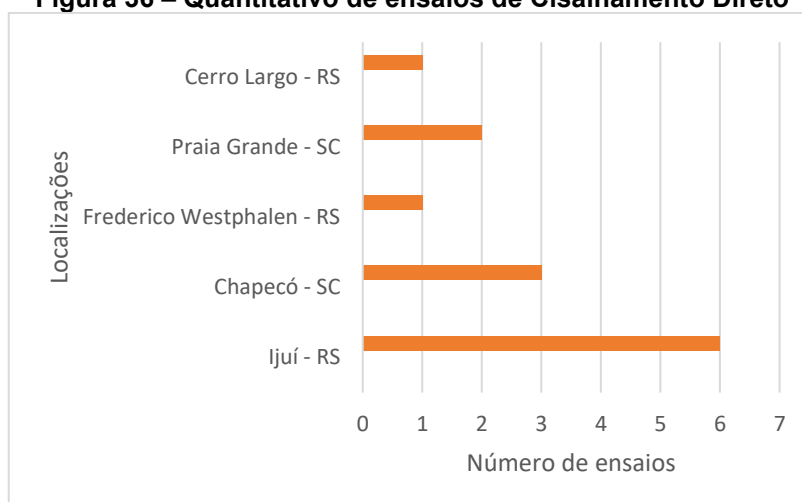
- |                                  |                          |                          |                          |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| — Ijuí-RS (2012)                 | — Ijuí-RS (2008)         | — Ijuí-RS (2008)         | — Ijuí-RS (2008)         |
| — Ijuí-RS (2008)                 | — Ijuí-RS (2008)         | — Ijuí-RS (2008)         | — Ijuí-RS (2008)         |
| — Ijuí-RS (2008)                 | — Londrina-PR (2005)     | — Londrina-PR (2006)     | — Londrina-PR (2006)     |
| — Londrina-PR (2006)             | — Passo Fundo-RS (2020)  | — Passo Fundo-RS (2016)  | — Passo Fundo-RS (2015)  |
| — Chapecó-SC (2019)              | — Chapecó-SC (2016)      | — Chapecó-SC (2016)      | — Chapecó-SC (2016)      |
| — Chapecó-SC (2016)              | — Chapecó-SC (2016)      | — Chapecó-SC (2016)      | — Chapecó-SC (2016)      |
| — Frederico Westphalen-RS (2019) | — Campo Grande-MS (2019) | — Campo Grande-MS (2019) | — Campo Grande-MS (2019) |
| — Campo Grande-MS (2019)         | — Cerro Largo-RS (2017)  | — Pinhal-RS (2016)       | — Alto Uruguai-RS (2016) |
| — Vanini-RS (2015)               | — São Carlos-SP (2010)   |                          |                          |

**Fonte: Autor (2021)**

#### 4.2.4 Cisalhamento Direto

Os resultados obtidos para o solo residual de basalto envolvendo o ensaio de cisalhamento direto do solo foram encontrados e apresentados na Figura 36, que mostra a relação das cidades envolvidas e a quantidade de ensaios encontrados na literatura, com 5 cidades envolvidas e 13 ensaios realizados.

**Figura 36 – Quantitativo de ensaios de Cisalhamento Direto**



Fonte: Autor (2021)

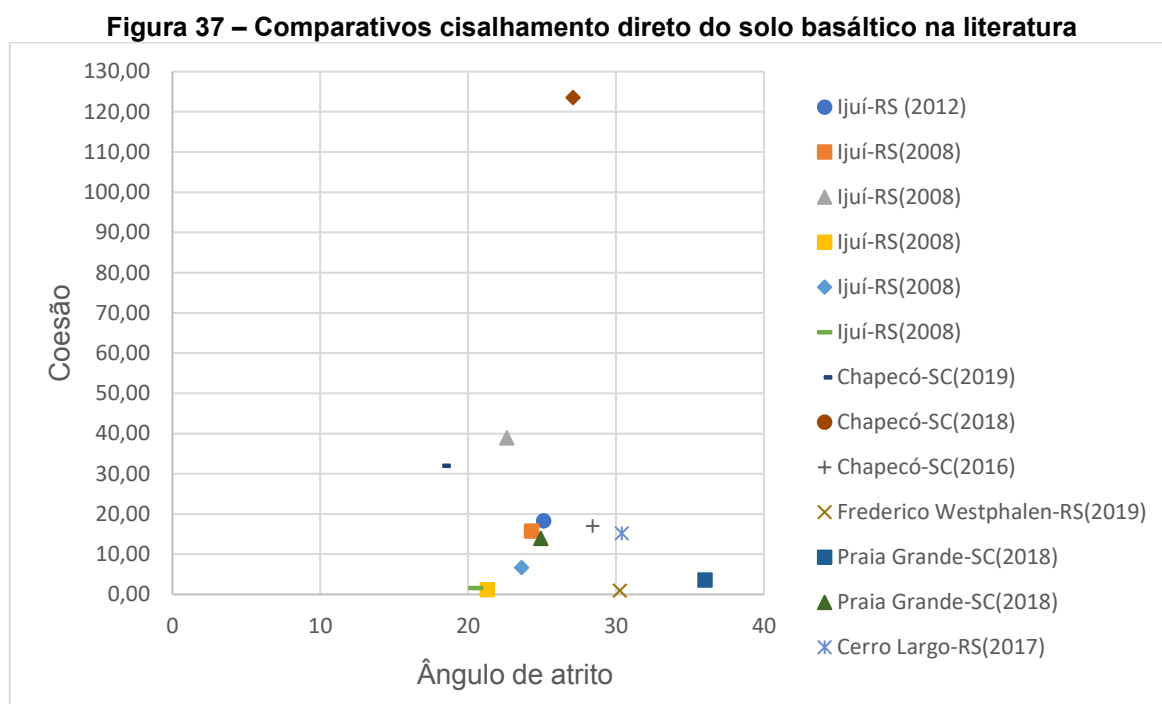
**Tabela 19 – Dados de ensaios de Cisalhamento Direto**

Localização	Ângulo de atrito ( $\phi^\circ$ )	Coesão (Kpa)
Ijuí - RS	25,1	18,30
	24,27	15,8
	22,6	38,9
	21,3	1,22
	23,6	6,68
	20,5	1,63
Chapecó - SC	18,3	32
	27,1	123,5
	28,4	17
Frederico Westphalen - RS	30,24	0,93
Praia Grande - SC	36	3,6
	24,9	13,9
Cerro Largo - RS	30,38	15,22

Fonte: Autor (2021)

A apresentação dos dados obtidos na literatura dos resultados para o cisalhamento direto do solo é observada através da Tabela 18, onde é relacionada a localização das amostras extraídas e os respectivos resultados.

A representação gráfica dos dados obtidos na literatura dos resultados para o cisalhamento direto do solo é realizada através da Figura 37, onde é relacionada a localização das amostras extraídas e os resultados.

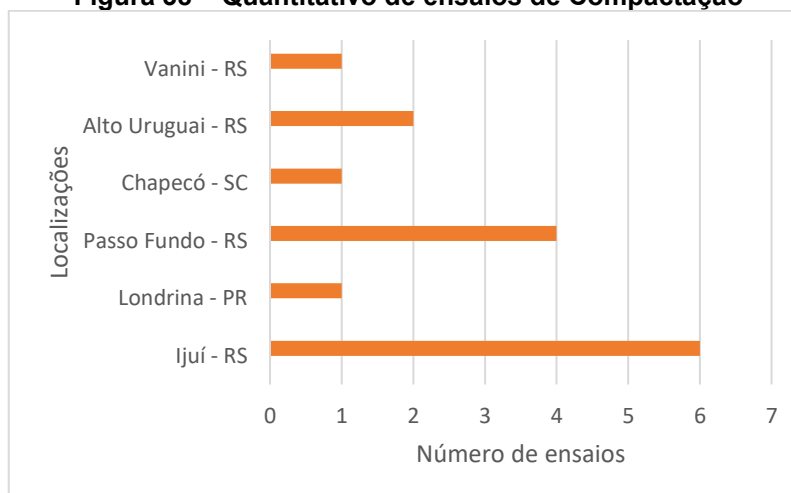


Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.5 Compactação

Os resultados obtidos para o solo residual de basalto envolvendo o ensaio de compactação do solo foram encontrados e apresentados na Figura 38, que mostra a relação das cidades envolvidas e a quantidade de ensaios encontrados na literatura, com 6 cidades envolvidas e 15 ensaios realizados.



**Figura 38 – Quantitativo de ensaios de Compactação**

Fonte: Autor (2021)

A apresentação dos dados obtidos na literatura dos resultados para a compactação do solo é observada através da Tabela 19, onde é relacionada a localização das amostras extraídas e os respectivos resultados.

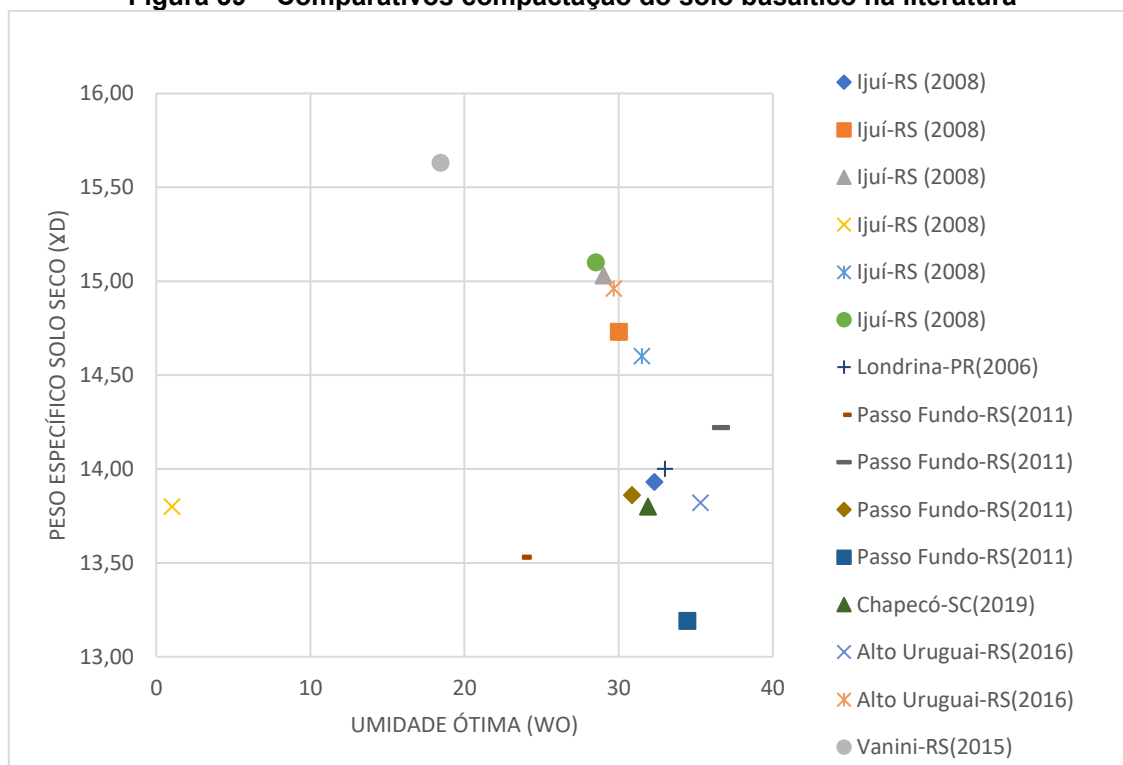
**Tabela 20 – Dados de ensaios de Compactação**

Localização	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	Umidade ótima
Ijuí - RS	13,93	32,3
	14,73	30
	15,03	29
	13,8	36
	14,6	31,5
	15,1	28,5
Londrina - PR	14,0	33
Passo Fundo - RS	13,53	23,76
	14,22	36,63
	13,86	30,85
	13,19	34,45
Chapecó - SC	13,8	31,9
Alto Uruguai - RS	13,82	35,29
	14,96	29,66
Vanini - RS	15,63	18,43

Fonte: Autor (2021)

A comparação dos dados obtidos na literatura dos resultados para a compactação do solo é ilustrada através da Figura 39, onde é relacionada a localização das amostras extraídas e os respectivos resultados de peso específico seco e umidade ótima.

**Figura 39 – Comparativos compactação do solo basáltico na literatura**

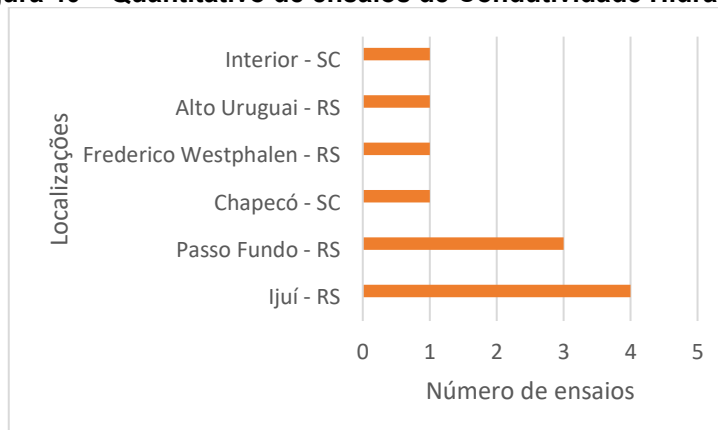


Fonte: Autor (2021)

#### 4.2.6 Permeabilidade

Os resultados obtidos para o solo residual de basalto envolvendo o ensaio de permeabilidade do solo foram encontrados e apresentados na Figura 40, que mostra a relação das cidades e a quantidade de ensaios encontrados na literatura, com 6 cidades envolvidas e 11 ensaios realizados.

**Figura 40 – Quantitativo de ensaios de Condutividade Hidráulica**



Fonte: Autor (2021)

A apresentação dos dados obtidos na literatura dos resultados para a permeabilidade do solo é observada através da Tabela 20, onde é relacionada a localização das amostras extraídas e os respectivos resultados.

**Tabela 21 – Dados de ensaios de Condutividade Hidráulica**

<b>Localização</b>	<b>k (cm/s)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Ijuí - RS	5,35E-09	1,70E-07	2,8818E-07
	1,96E-09		
	3,17E-09		
	6,69E-07		
Passo Fundo - RS	1,39E-03	4,63E-04	0,00065523
	8,20E-09		
	9,02E-08		
Chapecó - SC	4,00E-07	4,00E-07	-
Frederico Westphalen - RS	7,81E-08	7,81E-08	-
Alto Uruguai - RS	6,94E-07	6,94E-07	-
Interior de SC	4,50E-07	4,50E-07	-

**Fonte: Autor (2021)**

### 4.3 ANÁLISE COMPARATIVA

#### 4.3.1 Limites de Consistência

A Tabela 21, apresenta de forma compilada os resultados obtidos dos Limites de Atterber (Limite de Liquidez e Plasticidade) do solo de Guarapuava e os resultados encontrados na literatura.

**Tabela 22 – Comparativo dos Limites de consistência de Guarapuava – PR**

Parâmetros	Guarapuava	Literatura
Limite de Liquidez (LL)	44,67%	59,01%
Limite de Plasticidade (LP)	37,09%	41,59%
Índice de Plasticidade (IP)	7,58%	17,42%
Umidade (w)	36,99%	33,59%
Índice de Atividade (IA)	0,1864	0,29
Índice de Consistência (IC)	0,2067	-

**Fonte: Autor (2021)**

Os resultados encontrados indicam que os valores dos limites de consistência são 14,34% abaixo da média encontrada para o limite de liquidez e 4,5% abaixo da média para o limite de plasticidade em solos semelhantes em outros estudos. A umidade possui uma diferença de 3,4% acima da média encontrada na literatura e o índice de plasticidade possui valor de 9,84% abaixo da média encontrada em solos semelhantes. A diferença pode ser explicada devido a localização do município de Guarapuava, no início do Terceiro Planalto paranaense, com a possibilidade de haver resquílios geológicos da região do Segundo Planalto no solo estudado.

#### 4.3.2 Peso Específico

Na análise comparativa do ensaio de peso específico do solo, a Tabela 22 mostra o comparativo entre os dados da literatura e o resultado do ensaio realizado em Guarapuava-PR.

Os resultados encontrados no ensaio de peso específico para o solo de Guarapuava indicam que os valores são 0,09 acima da média encontrada em solos semelhantes em outras pesquisas.

**Tabela 23 – Comparativo dos dados de Peso Específico**

<b>Localização</b>	<b>Valor</b>
Guarapuava - PR	2,91
Literatura	2,82
Diferença	0,09

Fonte: Autor (2021)

A diferença encontrada é baixa e coerente para solos, essa diferença pode ser explicada por vários motivos, como por exemplo, a presença de matéria orgânica no solo.

#### 4.3.3 Granulometria

Diante do que foi visto na literatura, é possível observar que o solo residual de basalto da cidade de Guarapuava possui os resultados clássicos do solo típico estudado.

Contudo, o diferencial do solo de Guarapuava é notado a partir da análise quantitativa de argila presente, pois comparando com os demais estudos, a presença de argila no solo guarapuavano é 26,51% mais baixa com relação aos demais solos estudados. A análise dessa diferenciação nos resultados pode se dar pela localização do município, pois Guarapuava se encontra na região limítrofe entre o planalto de Ponta Grossa (Segundo Planalto) e o planalto de Guarapuava (Terceiro Planalto). O Segundo Planalto é caracterizado, segundo o Instituto Água e Terra do Paraná (IAT-PR), pela faixa de afloramento dos sedimentos paleozóicos da Bacia do Paraná, ou seja, se dá pelo aumento da presença de areais e siltes e pela baixa presença de argilas.

Mas de forma geral, o solo do município de Guarapuava é classificado como argiloso, mesmo com algumas diferenciações quantitativas em sua composição granulométrica com os demais, como mostra a Tabela 23.

**Tabela 24 – Comparativo Granulometria de Guarapuava – PR**

<b>Localização</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Areia Fina (%)</b>	<b>Areia Média (%)</b>	<b>Areia Grossa (%)</b>	<b>Pedregulho (%)</b>	<b>Classificação</b>
Guarapuava - PR	41,30	21,62	14,74	20,93	1,11	-	Solo argiloso
Literatura	67,81	17,04	12,32	1,60	0,29	0,95	Solo argiloso
Diferença:	26,51	4,58	2,42	19,33	0,82	0,95	-

Fonte: Autor (2021)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÃO

O trabalho procurou trazer informações sobre o solo residual de basalto para a região de Guarapuava, localizada no terceiro planalto paranaense. Com os resultados encontrados, foi revelado que o solo da região estudada se enquadra nas características clássicas de um típico solo residual de basalto.

O solo de Guarapuava é argiloso, com grande presença de silte. Na realização da análise comparativa com solos semelhantes, foi visto que mesmo se enquadrando como um solo residual de basalto, o solo estudado apresenta alguns diferenciais em sua análise granulométrica. Essas diferenças se mostram na porcentagem de argila inferior quando comparada aos demais estudos, com isso foi possível observar que a localização geográfica do município, na região limítrofe entre o segundo e terceiro planalto paranaense, pode ter exercido influência nos resultados.

Os resultados encontrados nos limites de consistência confirmaram que o solo de Guarapuava é argiloso, pois o limite de liquidez encontrado foi de 44,64%. O limite de plasticidade encontrado foi de 37,09%, que indicou o limite entre o estado plástico e o estado semi-plástico do presente solo. Da mesma forma que a análise granulométrica, a localização geográfica do município estudado pode ter interferido nos resultados dos limites de consistência.

O índice de plasticidade encontrado, oriundo da diferença entre os limites líquido e plástico, foi de 7,58%, concluindo que o solo de Guarapuava-PR possui baixa plasticidade, pois sua classificação se dá entre 5% e 10%.

O índice de plasticidade e o limite de liquidez mostram através do ábaco de Casagrande, que pela classificação unificada (SUCS), o solo de Guarapuava se classifica como ML, ou seja, um solo argiloso e siltoso inorgânico de compressibilidade mediana e siltes orgânicos.

O índice de consistência classificou o solo estudado como um solo argiloso mole, pois variou entre 0 e 0,5. O índice de atividade encontrado mostrou que o solo de Guarapuava se classifica com um índice de atividade grande, devido ao alto teor de argila presente no solo.

Diante dos resultados, é possível concluir que um solo pode ser mutável em relação aos fatores de clima e espaço. Ademais, embora as classificações dos solos se enquadrem nas mesmas nomenclaturas diante da Geologia e da Engenharia, é possível observar o quão variáveis podem ser e ao longo de sua formação geomorfológica, evidenciando a importância de sua completa caracterização nos projetos de engenharia e obras de terra.

Ademais, a metodologia utilizada neste trabalho pode servir de parâmetro para a estimativa de outros parâmetros geotécnicos do solo da região de Guarapuava. Parâmetros estes que podem ser utilizados como auxílio em pré-dimensionamento de obras geotécnicas da região.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Caracterização da condutividade hidráulica do solo residual de basalto da região de Guarapuava-PR;
- Análise comparativa entre os estudos de resistência ao cisalhamento do solo de Guarapuava com outros solos semelhantes;
- Caracterização geotécnica mais abrangente do solo do terceiro e do segundo planaltos para confirmar a interferência da localização do município nos resultados encontrados para essa pesquisa;
- Estudo da resistência ao cisalhamento de misturas do solo da região com resíduos, por exemplo: borracha de pneus, RCCs, microesferas de vidro, etc.

## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6457**: Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **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, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2017.

ANTUNES, O., POLIVANOV, H., PORTOCARRERO, H., CAMPOS, T. M. P. Solos: Subsídio Para Estudos de Geologia de Engenharia. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro (RJ), v. 38, n. 11, p. 180-198, dez. 2015.

Braroni, M.; et al. Construção de estruturas de contenção utilizando pneus insersíveis: análise numérica e caso de obra. **REM: R. Esc Minas**, Ouro Preto (MG), v. 65, n. 4, p. 449-457, out/dez. 2012.

BERNARDI, J. **Caracterização de jazidas de solo residual de basalto visando seu emprego em barragens de terra**. 2006. 159 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Ijuí, 2006.

BODÓ, B.; JONES, C. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.



BOEHL, P. E. G. **Algumas observações sobre as propriedades geotécnicas de solos estruturados derivados de granito da grande Florianópolis**. 2011. 227 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Florianópolis, 2011.

BOEHL, P. E. G. O.; et al. Parâmetros Geotécnicos de um Solo Residual Basáltico da Região do Alto Uruguai/RS. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Belo Horizonte (MG), p. 19-22, out. 2016.

CAPUTO, H. P; **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARISSIMO, D.; et al. Análise da contribuição da adição de cimento nas características de um solo argiloso. **Impacto científico e social na pesquisa**, Passo Fundo (RS), p. 1-9, abr. 2015.

CECCHIN, I.; et al. Aplicação de Nanoremediação Através de Ferro Zero Valente em um Solo Residual de Basalto Contaminado com Biodiesel. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Belo Horizonte (MG), p. 19-22, out. 2016.

CHIOSSI, N. J. **Geologia aplicada à Engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CRAIG, R. F.; KNAPPETT, J. A. **Mecânica dos Solos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7 ed. Cenage Learning, São Paulo, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER**: Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 1996.

DIEMER, F.; et. al. Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Ijuí (RS), n. 12, p. 25-36, out. 2008.

DIEMER, F.; et. al. Estudo da permeabilidade do solo da região de Ijuí-RS percolando água e óleo diesel. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Ijuí (RS), n. 16, p. 29-41, out. 2010.

FERREIRA, M. C.; et al. Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Curitiba (PR), n. 18, p. 1-12, nov. 2011.

GEHLING, W. Y. Y. **Estudo Dos Solos Residuais Do Planalto Meridional Do Rio Grande Do Sul**. 1982. 185 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1982.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

GONÇALVES, M.; et al. Adaptação de métodos semi-empíricos para estimar capacidade de carga de estacas de pequeno diâmetro no solo de Londrina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Technology**, Londrina (PR), v. 27, n. 2, p. 155-165, dez. 2005.

GUARAPUAVA. Prefeitura de Guarapuava. 15 dez. 2002. Disponível em: < <https://www.guarapuava.pr.gov.br/> >. Acesso em: 01 out. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 20 dez. 2016. Disponível em: < <https://ibge.gov.br/> >. Acesso em: 14 set. 2019.

ITCG. Instituto de Terras, Cartografias e Geologia do Paraná. **Secretaria de estado do Desenvolvimento e do Turismo**. 8 jan. 2011. Disponível em: <[http://www.geoitcg.pr.gov.br/geoitcg/pages/templates/initial\\_public.jsf?windowId=2c0](http://www.geoitcg.pr.gov.br/geoitcg/pages/templates/initial_public.jsf?windowId=2c0)>. Acesso em: 21 mar. 2020.

KAMPHORST, A.; et al. Caracterização hidromecânica de solo residual basáltico do município de Frederico Westphalen/RS para uso em barragens de terra homogênea de pequeno porte. In: X SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL. 6., 2019, Santa Maria. **GEORS** Santa Maria: UFSM, 2019. p. 1-12.

MAACK, R. Geografia física do Estado do Paraná. Curitiba: Imprensa Oficial 3. Ed, 2002.

MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. 8. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016

MENEZES, M.; et al. Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade. **Geociências**, São Paulo (SP), v. 29, n. 2, p. 211-228, dez. 2010.

MIGUEL, M. G.; et al. Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. **Revista Ciência e Tecnologia**, Londrina (PR), v. 12, n. 24, p. 63-74, jan. 2006.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. IN: Geologia do Continente Sul-Americano. Editora Beca: São Paulo, 2004, p. 265-279.

MINEROPAR, 2006. Atlas Geológico do Estado do Paraná. Secretaria de Estado da Indústria, do Comércio e do Turismo. Minerais do Paraná S/A – Mineropar, Curitiba.

\_\_\_\_\_. Serviço geológico do Paraná. 20 dez. 2016. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/>>. Acesso em: 30 set. 2019.

\_\_\_\_\_. – FAMEPAR - Prefeitura Municipal de Guarapuava, Geologia do planejamento – Plano Diretor de desenvolvimento urbano de Guarapuava. Prefeitura Municipal de Guarapuava, 1992.

MENEGHETTI, L. R. R. **Biorremediação na descontaminação de um solo residual de basalto contaminado com óleo diesel e biodiesel**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007.

MENEGOTTO, M. L.; et al. Caracterização Geotécnica Preliminar do Solo da Área Experimental da UFFS - Campus Chapecó. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Belo Horizonte (BH), v. 13, n. 11, p. 19-22, out. 2016.

MORAIS, M.; et al. Propriedades geotécnicas de misturas de solo residual de basalto com resíduos de borracha de pneus. **Sociedade Portuguesa de Geotecnia**, Chapecó (SC), n. 144, p. 35-50, nov. 2018.

MOREIRA, R.; et al. Estudo da capacidade de carga e recalque de solo residual de basalto. **Educação e Ciência para a Cidadania Global**, Pinhal (RS), p. 1-6, out. 2016.

MONCADA, M. P. H. **Avaliação de Propriedades Hidráulicas de Solos Tropicais Não Saturados**. 2008. 327 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2008.

NOWATZKI, A. Entenda a importância da normalização para o seu negócio. **Normas técnicas**. 2016. Disponível em: < <https://profalexeinowatzki.wordpress.com/geologia-e-relevos/> >. Acesso em: 11 abr. 2021.

OLIVEIRA, J. C.; et al. Estudo da retenção de poluentes veiculados por lixiviados de aterros sanitários em solos argilosos. **Revista PROSAB**, Florianópolis (SC), v. 1, p. 68-77, dez. 2002.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. São Paulo: Terratek, 2007.

PAGANINI, R. N.; et al. Avanços na composição da Methodi Ordinatio para revisão sistemática de literatura. **Ci.Inf**, Brasília (DF), v. 46, n. 2, p. 161-187, maio/ago. 2017.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2006.

PIVETTA, C. P.; et al. Solo compactado com resíduo de construção e demolição. In: 6º FÓRUM INTERNACIONAL ECOINOVAR. Santa Maria (RS). **Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade**. Santa Maria: UFSM, ago. 2017. p. 1-6.

POPP, J. H. **Geologia Geral**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

REGINATTO, G., M., P.; et al. Estabilização de taludes rodoviários na sc-290 do trecho entre a divisa SC/RS e Praia Grande: estudo de caso. **Revista Técnico-Científica do Crea-PR**, Chapecó (SC), n. 1, p. 1-15, jun. 2018.

RUSSI, D.; et al. Monitoramento da água subterrânea para ensaio de prova de carga em solo basáltico. **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente**, Campo Grande (MS), v. 2, n. 3, p. 26-37, jul. 2019.

SANTOS, R. M. M. **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões do Município de Goiânia**. 1997. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UnB, 1997.

SILVA, F. K. **Caracterização física e mecânica de solo residual de gnaiss por meio de ensaios de campo e laboratório - santo amaro da imperatriz, Santa Catarina**. 2015. 491 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

SILVA, J. P. S.; et al. Análise da Influência do Coeficiente de Reação Horizontal do Solo no Dimensionamento Estrutural de Estacas de Concreto. **Engenharia Estudo e Pesquisa ABPE**, Passo Fundo (RS), v. 20, n. 1, p. 09-17, jan./jul. 2020.

SOUZA, M. L; et al. Avaliação de solos residuais de rochas basálticas e a ocorrência de feições erosivas. **Para Desenvolver a terra**, Maringá (PR), n. 13, dez. 2012.

TÍMBOLA, R. S.; et al. Condutividade hidráulica de misturas solo-cimento compactadas submetidas à ação de lixiviados ácidos. **Revista CIATEC - UPF**, Passo Fundo (RS), v. 7, n. 1, p. 56-66, ago. 2015.

THOMÉ, A.; et al. Atenuação natural em solo residual de basalto contaminado com misturas de diesel e biodiesel. **Ciência & Engenharia**, Passo Fundo (RS), v. 21, n. 2, p. 35-40, jul/dez. 2012.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, McGrawHill do Brasil Ltda, Ed.da Universidade de São Paulo, 509p. 1977.

VICIELI, C. **Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto**. 2003. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2003.

XAVIER, A. V; et al. Avaliação da resistência de misturas de solo residual de basalto com resíduos de microesferas de vidro. **Holos**, Natal (RN), v. 4, n. 11, p. 104-124, jul. 2019.