

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME GIOVANE SCHÖLER

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO SOLO DO MUNICÍPIO DE TOLEDO  
PARA APLICAÇÃO NA SUB-BASE DE UM PAVIMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO – PR

2018

GUILHERME GIOVANE SCHÖLER

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO SOLO DO MUNICÍPIO DE TOLEDO  
PARA APLICAÇÃO NA SUB-BASE DE UM PAVIMENTO**

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

Orientador: Prof. DSc. Elmagno Catarino Santos Silva

TOLEDO – PR

2018



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Toledo  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 127

### **Estudo Experimental Do Solo Do Município De Toledo Para Aplicação Na Sub-base De Um Pavimento**

por

**Guilherme Giovane Schöler**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 11:10 h do dia **05 de Junho de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Maurício do Espírito Santo  
Andrade  
(UTFPR – TD)  
MEMBRO DA BANCA

---

Sergio Antonio Brum Junior  
MEMBRO DA BANCA

---

Prof. Dr. Elmagno Catarino Santos Silva  
(UTFPR – TD)  
Orientador

---

Visto da Coordenação  
Prof. Dr. Fúlvio Feiber  
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pelas conquistas ao longo desses anos de curso.

Aos meus pais, irmãos, avós e tia por todo apoio que me deram nessa jornada. Sem eles essa conquista não seria alcançada.

Ao professor Elmagno Catarino Santos Silva, pelo empenho para que esse estudo pudesse ser feito, compartilhando seu conhecimento e dedicando seu tempo em prol da melhor elaboração possível desse trabalho.

Aos meus amigos, por toda ajuda e apoio recebido no decorrer do curso.

## RESUMO

Um pavimento de má qualidade prejudica as condições de segurança e conforto de quem o usufrui. Muitas vezes, essa má qualidade está relacionada com a falta de um estudo mais profundo do solo da região. Por esse motivo, procurou-se analisar o solo da cidade de Toledo – PR com o intuito de utilizá-lo na camada de sub-base de um pavimento. Para isso, inicialmente buscou-se compreender melhor, por meio de bibliografias, a estrutura, definição e classificação dos pavimentos. Ademais, a pesquisa apresentou os ensaios e seus métodos de execução, necessários para realizar o trabalho proposto, conforme suas respectivas normas. A metodologia consistiu em classificar o solo conforme a *Transportation Researt Board* - TRB e determinar o índice de expansão, de acordo com a norma DNIT 172/2016, realizando para isso os ensaios de caracterização e compactação do solo. Posteriormente, o resultado máximo obtido na expansão (0,302%) foi comparado com o valor máximo recomendado para a sub-base (1% para sub-base), concluindo que de acordo com esse parâmetro o solo pode ser utilizado na camada de sub-base do pavimento. Entretanto, segundo a classificação da TRB, o solo ensaiado é do tipo A-7-5, ou seja, um solo argiloso. Por esse motivo, segundo a classificação da Boreau of Public Roads - BPR somente recomenda a utilização desse solo nas camadas do pavimento em ocasiões especiais, como por exemplo, realizando uma estabilização granulométrica do mesmo. Outro fator que desaprova a utilização do solo ensaiado na camada de sub-base é o fato de apresentar IG igual a 12,8, enquanto que o valor sugerido para essa camada é zero. Além disso, por conta do limite de liquidez – LL do solo ser igual a 56%, o solo é classificado como muito compressível. Por isso, não aconselha-se a utilização do mesmo na camada de sub-base, uma vez que a compressibilidade pode causar recalques e, por consequência, causar patologias nesse pavimento, como buracos, fissuras e abaulamentos. Por fim, diante desses fatores, não recomenda-se aplicar o solo natural estudado na camada de sub-base do pavimento asfáltico, visto que, além da expansão, nenhum outro parâmetro mostrou-se favorável à utilização do mesmo.

**Palavras Chave:** Pavimentação. Índice de Expansão. Sub-base.

## ABSTRACT

Poor quality flooring damages the safety and comfort of those who enjoy it. Often, this poor quality is related to the lack of a deeper study of the soil of the region. For this reason, we tried to analyze the soil of the city of Toledo - PR with the intention of using it in the sub-base layer of a pavement. To do this, we first sought to better understand, through bibliographies, the structure, definition and classification of pavements. In addition, the research presented the tests and their methods of execution, necessary to carry out the proposed work, according to their respective norms. The methodology consisted in classifying the soil according to the Transportation Research Board (TRB) and determining the expansion index, in accordance with the DNIT 172/2016 standard, performing soil characterization and compaction tests. Afterwards, the maximum result obtained in the expansion (0.302%) was compared with the maximum value recommended for the sub-base (1% for sub-base), concluding that according to this parameter the soil can be used in the sub-base of the floor. However, according to the classification of the TRB, the soil tested is type A-7-5, that is, a clay soil. For this reason, according to the classification of Bureau of Public Roads - BPR only recommends the use of this soil in the layers of the pavement in special occasions, as for example, realizing a granulometric stabilization of the same. Another factor that disapproves of the use of the soil tested in the sub-base layer is the fact that it presents IG equal to 12.8, whereas the suggested value for this layer is zero. In addition, because of the liquidity limit - LL of the soil being equal to 56%, the soil is classified as very compressible. Therefore, it is not advisable to use it in the sub-base layer, since the compressibility can cause settlements and, consequently, cause pathologies in the pavement, such as holes, cracks and bulges. Finally, in view of these factors, it is not recommended to apply the natural soil studied in the sub-base layer of the asphalt pavement, since, in addition to the expansion, no other parameter was favorable to the use of the same.

**Keywords:** Paving. Expansion Index. Sub-base.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Local da coleta da amostra de solo.....	12
Figura 2 - Distribuição de esforços, causados pelo tráfego, nas camadas do pavimento.....	18
Figura 3 - Tensões bem distribuídas no pavimento rígido.....	19
Figura 4 - Tensões concentradas no pavimento flexível. ....	19
Figura 5 - Camadas de um pavimento. ....	20
Figura 6 – Aparelho de Casagrande e cinzel. ....	23
Figura 7 – Realização do ensaio de Limite de Plasticidade. ....	24
Figura 8 – Curva representativa de compactação.....	28
Figura 9 – Equipamentos utilizados para coletar a amostra de solo. ....	32
Figura 10 – Profundidade de coleta da amostra de solo. ....	33
Figura 11 – Destorroamento do solo. ....	34
Figura 12 – Amostra homogeneizada na cápsula de porcelana.....	35
Figura 13 – Ranhura realizada no aparelho de Casagrande.....	36
Figura 14 – Amostra Homogeneizada na cápsula de porcelana.....	37
Figura 15 – Mistura no aparelho dispersor.....	38
Figura 16 – Medição da temperatura. ....	39
Figura 17 – Lavagem do material retido na peneira 0,075 mm. ....	39
Figura 18 – Passagem do material nas peneiras através do agitador mecânico. ....	40
Figura 19 – Picnômetro completo com água destilada e material.....	41
Figura 20 – Vácuo sendo aplicado na amostra. ....	42
Figura 21 – Adição de água para compactação do novo corpo de prova. ....	43
Figura 22 – Compactação do corpo de prova com o soquete.....	44
Figura 23 – Rasamento do corpo de prova. ....	44
Figura 24 – Corpos de prova imersos em água. ....	45
Figura 25 – Gráfico para determinar o Limite de Liquidez.....	47
Figura 26 – Curva granulométrica.....	53
Figura 27 – Gráfico de compactação. ....	55

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sistema de Classificação do T.R.B. ....	27
Quadro 2 – Classificação da B.P.R – Boreau of Public Roads.....	27
Quadro 3 – Dados do ensaio de Limite de Liquidez.....	46
Quadro 4 – Dados do ensaio de Limite de Plasticidade.....	47
Quadro 5 – Resumo dos resultados de LL, LP e IP. ....	48
Quadro 6 – Cálculo do índice de grupo.....	49
Quadro 7 – Determinação do teor de umidade. ....	50
Quadro 8 – Cálculo da massa específica dos grãos. ....	51
Quadro 9 – Dados para plotagem da curva granulométrica.....	52
Quadro 10 – Umidade e massa específica aparente seca para cada ponto. ....	55
Quadro 11 – Alturas iniciais dos corpos de prova.....	56
Quadro 12 – Resultados do ensaio de expansão.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Valores usuais de expansão conforme a camada do pavimento. ....	29
Tabela 2 - Ensaio de caracterização realizados e suas respectivas normas. ....	34
Tabela 3– Ensaio realizados e suas respectivas normas. ....	43
Tabela 4– Classificação do solo conforme o IP. ....	48
Tabela 5– Granulometria do solo e seus percentuais. ....	54
Tabela 6– Ensaio realizados e suas respectivas normas. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$Ai_{cp}$	Altura inicial do corpo de prova;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
BPR	<i>Bureau of Public Roads</i> ;
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> ;
CNT	Confederação Nacional do Transporte;
CP	Corpo de prova;
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;
E	Expansão;
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
GPS	<i>Global Positioning System</i> ;
$\gamma_s$	Peso específico seco;
h	Teor de umidade;
HRB	<i>Highway Research Board</i> ;
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná;
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IG	Índice de Grupo;
IP	Índice de Plasticidade;
ISC	Índice de Suporte Califórnia;
L <sub>f</sub>	Leitura final no extensômetro;
L <sub>i</sub>	Leitura inicial no extensômetro;
LL	Limite de Liquidez;
LP	Limite de Plasticidade;
MINEROPAR	Serviço Geológico do Paraná;
NBR	Norma brasileira;
S	Do inglês <i>south</i> , em português sul;
TRB	<i>Transportation Research Board</i> ;
W	Do inglês <i>west</i> , em português oeste.
Wot	Umidade ótima;
$\gamma_{d,máx}$	Peso específico seco máximo;
$\rho_s$	Massa específica dos grãos;

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1. Objetivo geral .....	13
1.2.2. Objetivos específicos .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA CIDADE DE TOLEDO – PR.....	15
2.1.1 Localização.....	15
2.1.2 Clima.....	16
2.1.3 Pedologia.....	16
2.1.4 Geologia .....	16
2.2 DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO .....	17
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	18
2.4 CAMADAS DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	19
2.4.1 Revestimento.....	20
2.4.2 Bases e Sub-bases.....	20
2.4.3 Reforço do subleito .....	21
2.4.4 Subleito.....	21
2.5 ENSAIOS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	22
2.5.1. Análise Granulométrica .....	22
2.5.2. Limites de Atterberg .....	22
2.5.2.1. <i>Limite de Liquidez (LL)</i> .....	23
2.5.2.2. <i>Limite de Plasticidade (LP)</i> .....	23
2.5.2.3. <i>Índice de Plasticidade (IP)</i> .....	24

2.5.3.	Massa específica dos Grãos .....	24
2.6	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS .....	25
2.6.1	Sistema de Classificação Rodoviário – TRB.....	26
2.7	COMPACTAÇÃO.....	28
2.8	EXPANSÃO DO SOLO.....	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
3.1	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS .....	30
3.1.1	Coleta das amostras de solo .....	30
3.1.2	Preparação da amostra para ensaios de caracterização.....	30
3.1.3	Ensaio de caracterização.....	30
3.1.4	Compactação e Expansão.....	31
3.2	MÉTODOS.....	31
3.2.1	Coleta e armazenamento das amostras de solo.....	31
3.2.2	Preparação da amostra para os ensaios .....	33
3.2.3	Ensaio de caracterização do solo .....	34
3.2.3.1	<i>Limite de Liquidez</i> .....	35
3.2.3.2	<i>Limite de Plasticidade</i> .....	36
3.2.3.3	<i>Análise Granulométrica</i> .....	37
3.2.3.4	<i>Massa específica dos Grãos</i> .....	40
3.2.4	Compactação e Expansão.....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
4.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO .....	46
4.1.1.	Limites de Atterberg .....	46
4.1.2.	Classificação do solo segundo a TRB.....	49

4.1.3.	Massa específica dos Grãos .....	50
4.1.4.	Análise Granulométrica .....	51
4.2.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO E EXPANSÃO .....	54
4.2.1.	Compactação .....	54
4.2.2.	Expansão .....	56
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>58</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	60
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>
	<b>ANEXO A – Contrato de execução de pavimento asfáltico no solo estudado ....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXO B – Mapa Simplificado de Solos do Estado do Paraná.....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE A – Procedimentos de peneiramento e sedimentação .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A partir do momento em que a humanidade começou a habitar os territórios de maneira permanente, criando cidades, iniciou-se também a produção excessiva e, por consequência, o comércio. Aliado a isso, surgiu a necessidade da construção de estradas.

Com o passar do tempo, foram modificando-as e aprimorando-as, surgindo então as estradas pavimentadas, que têm facilitado o escoamento da produção no meio agrícola e industrial, oferecendo maior rapidez na entrega dos produtos ao destino final, bem como promovendo menores desperdícios das mercadorias e, por consequência, menores prejuízos.

No entanto, para Villibor (2000), existe uma carência de pavimentos urbanos em quase todas as cidades brasileiras, englobando desde vias de circulação de distritos e conjuntos habitacionais até vias principais de cidades de grande porte.

Muitas vezes essa carência está relacionada com o baixo orçamento destinado à área de transportes rodoviários. Por esse motivo, tem-se procurado estudar mais detalhadamente os materiais disponíveis na região, como por exemplo, os solos e as jazidas, com o intuito de proporcionar menores custos em uma possível implantação de estradas pavimentadas.

Conforme Pinto (2006), os solos são originados a partir da decomposição das rochas que compunham inicialmente a crosta terrestre. Essa decomposição é consequência da ação de agentes físicos e químicos, como variação de temperatura, ação do vento, entre outros.

Nesse sentido, o estudo de solos, com base na visão de um engenheiro civil, tem por objetivo sua utilização em obras de suporte às construções, especialmente, na sustentação de pavimentos rodoviários, sendo, então, de suma importância na segurança e no aspecto econômico.

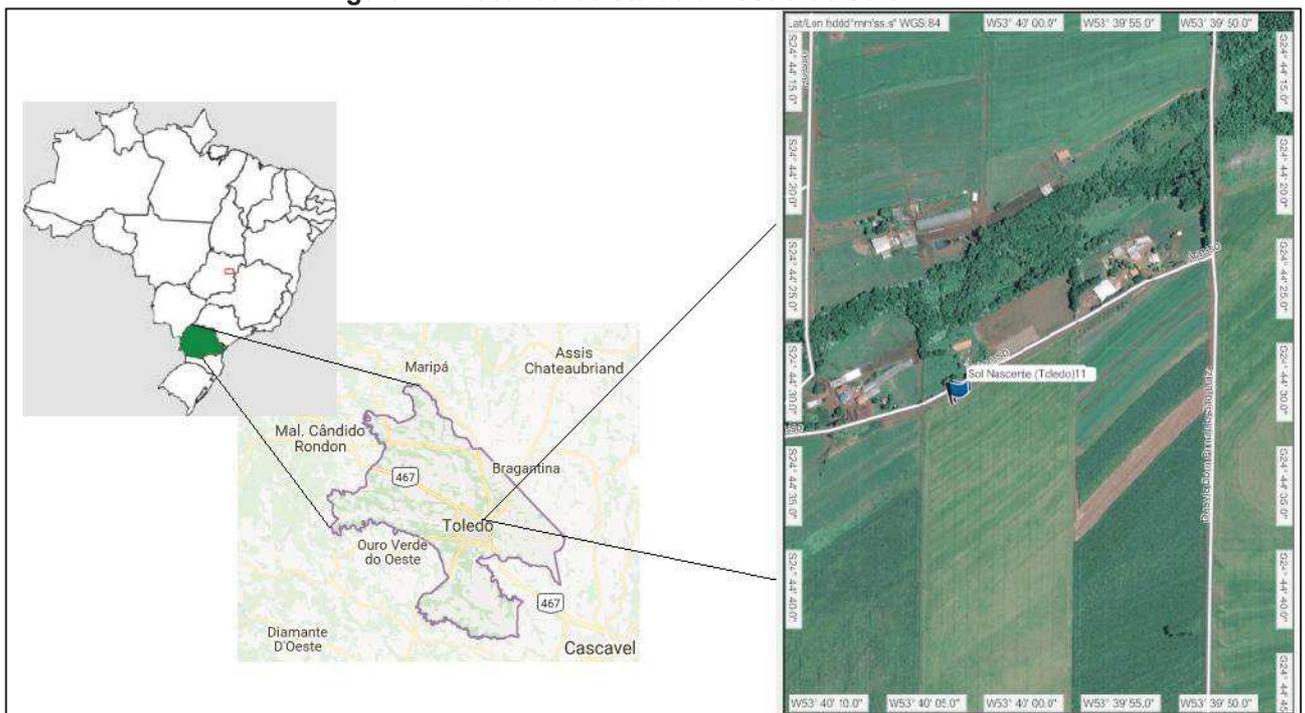
Levando em conta o conceito anteriormente citado e assimilando que o Brasil, devido a seu amplo território, apresenta solos totalmente distintos, por conta da influência dos fatores de formação e sua geologia, entende-se que conhecer o tipo de solo é importante na execução de um pavimento.

Partindo desse pretexto e tendo em vista a grande importância dos materiais a serem usados em cada camada do pavimento, realizou-se uma avaliação experimental de algumas propriedades de solo, que foi coletado em um ponto

estratégico do município de Toledo – PR, em cuja localização está prevista a construção de uma estrada pavimentada (Anexo A), com a finalidade de utilizá-lo em camadas que compõem um pavimento. Nessa perspectiva, foram realizados os ensaios de caracterização do solo, de compactação e expansão, conforme os métodos propostos pelas respectivas normas técnicas. Além disso, tornou-se necessário classificar o solo segundo o método da Classificação Rodoviária – TRB, antigo HRB.

A Figura 1 mostra a espacialização do local onde foi coletado o solo para realização do estudo proposto. Ele encontra-se nas seguintes coordenadas geográficas: 24°44'30.6"S 53°40'03.4"W (Sol Nascente, Linha Rio Toledo, interior de Toledo, próximo a São Luiz do Oeste), que foram determinadas utilizando o GPS 64sc da GARMIN.

**Figura 1 – Local da coleta da amostra de solo.**



Fonte: Adaptado de Google Maps (2017)

### 1.1. JUSTIFICATIVA

O modal mais utilizado para transporte populacional e de produtos no Brasil é o rodoviário. Sua atuação atinge 95,0% no deslocamento de pessoas e 61,1% no transporte de mercadorias. Entretanto, 78,6% das rodovias no país não são pavimentadas (CNT, 2016). Logo, um estudo mais detalhado dos materiais que irão

compor a estrutura do pavimento é de suma importância, visto que ele trará mais conforto à população em seu traslado, bem como irá permitir melhor escoamento no transporte de produtos, colaborando no crescimento socioeconômico em âmbito regional e nacional.

Dos materiais que compõem a estrutura de pavimento, o estudo dos solos é imprescindível, uma vez que podem se comportar de várias maneiras devido a sua origem. Sendo assim, foi necessário realizar alguns ensaios geotécnicos, como os de Atterberg, que proporcionaram uma noção de como se comporta o solo, bem como ensaio de expansão, que permitiu verificar se o solo pode ser aplicado na camada de sub-base de um pavimento.

Desse modo, para Marques (2012), quanto piores forem as condições de um solo a ser utilizado, por exemplo, no subleito da rodovia, maior será a espessura do pavimento. Isso, muitas vezes, leva a substituição parcial ou total da camada por um material em melhores condições.

Portanto, entender e conhecer o comportamento do solo que será utilizado nas camadas dos pavimentos ajuda a evitar problemas patológicos, como fissuras, que podem ocorrer devido à expansão do material e buracos (também conhecidos como panelas), fazendo com que se tenha um pavimento com bom desempenho no quesito trafegabilidade.

Além disso, outro fator importante que justifica o estudo é a execução de uma estrada pavimentada no local de coleta do solo. Assim, pode-se avaliar se o solo dessa região tem condição de ser utilizado na camada de sub-base desse pavimento.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

Conhecer o comportamento de um solo, do município de Toledo – PR, coletado em um ponto onde será executada uma estrada pavimentada, tendo em vista a sua utilização na camada de sub-base desse pavimento.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar os ensaios de caracterização do solo;

- Realizar o ensaio de compactação para o solo coletado;
- Utilizar a NORMA DNIT 172/2016 - ME para obter os valores de expansão da amostra ensaiada;
- Classificar a amostra de solo, segundo o método de classificação rodoviária TRB; e
- Contribuir para a definição de critérios técnicos de avaliação da expansão dos solos visando a sua utilização na sub-base da pavimentação a ser executada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se o referencial teórico, que serve de embasamento e fundamentação do estudo em si. Aqui, serão expostos pontos de grande relevância no entendimento da problemática, abrangendo o conteúdo de uma forma geral, bem como abordando assuntos específicos, com o intuito de uma total compreensão da proposta. São expostos: caracterização fisiográfica da cidade de Toledo-PR, definição e classificação de pavimentos, ensaios de caracterização, sistemas de classificação do solo, compactação e expansão.

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA CIDADE DE TOLEDO – PR

A caracterização fisiográfica de uma região, diz respeito à análise das características físicas encontradas no local, como geologia, pedologia, clima, entre outros. Para isso, faz-se necessária a indicação da localização da área, nesse caso, da cidade de Toledo – PR, onde foi coletado e analisado o solo a fim de atingir os objetivos propostos.

#### 2.1.1 Localização

O município de Toledo está localizado na região oeste do Estado do Paraná, a cerca de 540 quilômetros da capital Curitiba, no terceiro planalto paranaense, conhecido também por planalto de Guarapuava. (NOGUEIRA et al, 2016).

A região oeste do Paraná está subdividida em três microrregiões: a de Cascavel, Foz do Iguaçu e a de Toledo, denominada 22ª microrregião do Paraná. Toledo é a cidade polo dessa microrregião, devido à influência que desempenha diante dos municípios próximos, em função da expressividade no número de habitantes, comércio e indústrias. (NOGUEIRA et al, 2016).

Ademais, o município conta com uma área de 1.196,999 km<sup>2</sup> e uma população estimada em 135.538 (IBGE, 2017). Limita-se ao norte por Maripá e Nova Santa Rosa; ao sul por Santa Tereza do Oeste e São Pedro do Iguaçu; a leste por Assis Chateaubriand, Tupãssi e Cascavel e a oeste por Quatro Pontes, Marechal Cândido Rondon e Ouro Verde do Oeste. (NOGUEIRA et al, 2016).

### 2.1.2 Clima

De acordo com a classificação de Wladimir Köppen, pode-se dizer que o clima da cidade de Toledo-PR é subtropical úmido mesotérmico, apresentando estações de inverno e verão bem definidas, com verões quentes e concentração das chuvas nessa estação, além de geadas pouco frequentes e inexistência de estação seca definida (IAPAR, 2017). Além disso, apresenta temperatura média de 21°C e pluviosidade anual média de 1736 mm (HIDROWEB, 2017).

### 2.1.3 Pedologia

De acordo com Caputo (1988), o objetivo da pedologia é o estudo do solo, em especial a sua formação e classificação, levando em consideração a ação de agentes climatológicos. Além disso, o referido autor ainda diz que o aprendizado sobre a pedologia tem ajudado em problemas de pavimentação.

A pedologia tem grande importância, uma vez que podem ser obtidas por meio de sua interpretação, grandes informações. Um exemplo da aplicação dos mapas pedológicos é o auxílio na escolha de jazidas mais adequadas para o emprego em bases e sub-bases de rodovias.

Então, segundo EMBRAPA FLORESTAS (2012), o solo encontrado no município é do tipo Latossolo, conforme pode ser observado no mapa do Anexo B. Latossolos são solos minerais, que possuem homogeneidade entre as camadas. Além disso, esse tipo de solo apresenta grande fertilidade e é bastante vantajoso na exploração agrícola, muito importante economicamente para a região.

### 2.1.4 Geologia

O Paraná possui cerca de 200.000 km<sup>2</sup> de extensão e pode ser subdividido em três planaltos, quando se trata da geologia: 1º Planalto Paranaense e Litoral, caracterizado pela presença de rochas ígneas e metamórficas; 2º Planalto Paranaense, caracterizado pela presença de rochas sedimentares e 3º Planalto Paranaense, que se divide em dois: uma parte caracterizada pela presença de rochas vulcânicas basálticas e outra que apresenta rochas sedimentares (MINEROPAR, 2017).

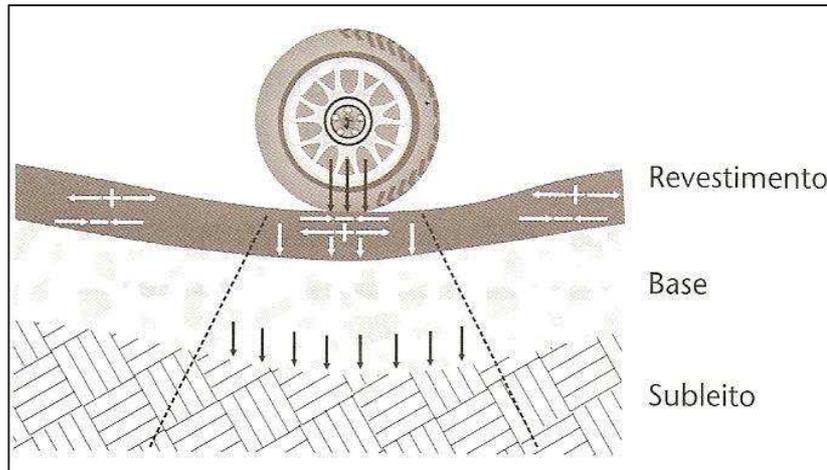
Portanto, a cidade de Toledo apresenta rochas vulcânicas basálticas de idade mesozoica, pois está localizada em uma das partes do terceiro planalto paranaense, como já dito anteriormente. As rochas vulcânicas se formaram depois da separação do supercontinente *Gondwana*, que formou os continentes Sul-Americano e Americano, e da liberação de magma. A alteração dessas lavas formou o Latossolo, também conhecido como terra roxa, que apresenta grande fertilidade agrícola, que move a economia da região (MINEROPAR, 2017).

## 2.2 DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

De acordo com Senço (2007), pavimento é uma estrutura que tem como função resistir e distribuir os esforços verticais produzidos pelo tráfego, resistir aos esforços horizontais atuantes, melhorar as condições de rolamento, tornando mais durável a sua superfície, tendo em vista maior comodidade e segurança. Além disso, o pavimento é construído após a terraplanagem.

Além disso, o autor ainda reitera que o pavimento é um sistema composto por diversas camadas finitas que se assenta acima de um terreno de fundação denominado subleito. Ademais, a distribuição de esforços através dessas camadas deve ser tal que as tensões que agem entre o pavimento e o subleito sejam compatíveis com a capacidade de suporte desse subleito. Conjuntamente a isso, afirma que as tensões sofrem alívio na medida em que se atingem camadas mais profundas, as quais, geralmente, possuem resistências inferiores. A Figura 2 ilustra a distribuição das cargas que um pavimento está sujeito ao longo de suas camadas.

**Figura 2 - Distribuição de esforços, causados pelo tráfego, nas camadas do pavimento.**



Fonte: Balbo (2007)

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Medina (2005) considera que os tipos de pavimento se diferem conforme o material utilizado em suas camadas. Em maneira geral, divide-se em duas categorias: flexível e rígido, também chamados de asfáltico ou betuminoso e pavimento de concreto, respectivamente.

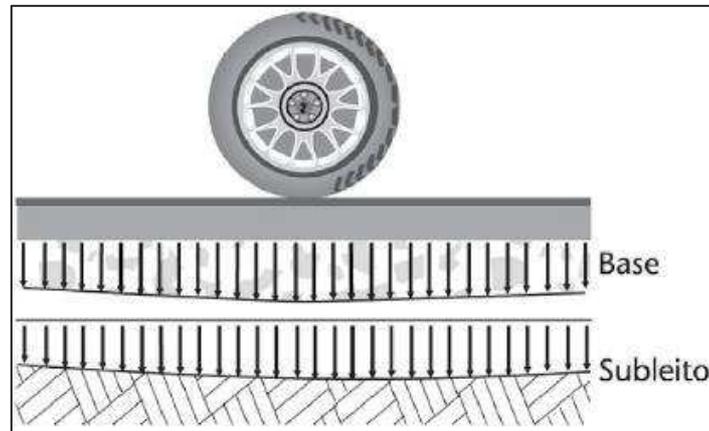
De acordo com Senço (2007), pavimentos flexíveis, cujas deformações não levam, até determinado limite, ao rompimento do pavimento, são aqueles que resistem mais aos esforços em si aplicados. Já os pavimentos rígidos apresentam baixa deformabilidade e contêm o concreto de cimento como o material constituinte principal.

Todavia, de acordo com o autor citado, ocorre uma dificuldade em adotar essa classificação devido à possibilidade de utilizar, na mesma estrutura de pavimento, camadas flexíveis ou rígidas. Por conseguinte, nada impossibilita a aplicação de uma camada de base de solo-cimento, rígida, sob uma camada de concreto asfáltico, flexível.

Balbo (2007) apud Yoder e Witczak (1975) que afirmam que a principal característica que difere os tipos de pavimento é o modo como transmitem para o subleito (fundação) os esforços em si aplicados. Dessa forma, enquanto um pavimento rígido apresenta um campo de tensões bem desconcentrado na atuação de uma determinada carga, cujos efeitos são distribuídos de maneira similar (Figura 3), em um pavimento flexível tem-se um campo de tensões concentrado próximo ao

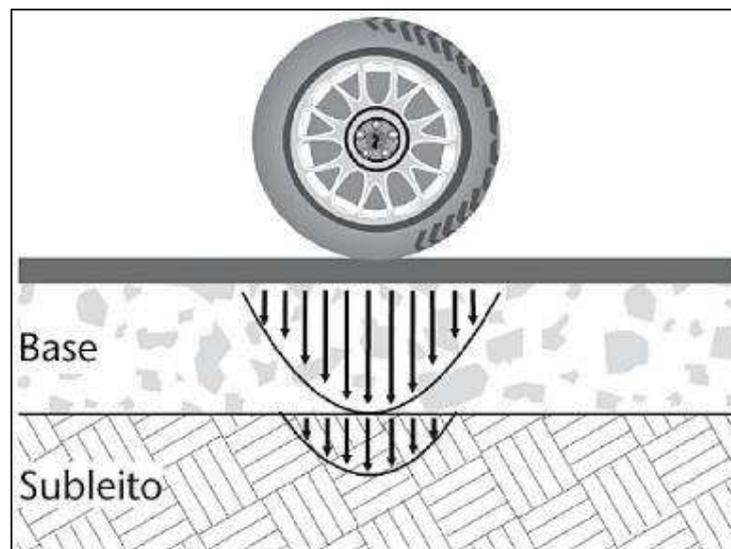
ponto de aplicação dessa carga (Figura 4).

**Figura 3 - Tensões bem distribuídas no pavimento rígido.**



Fonte: Balbo (2007)

**Figura 4 - Tensões concentradas no pavimento flexível.**

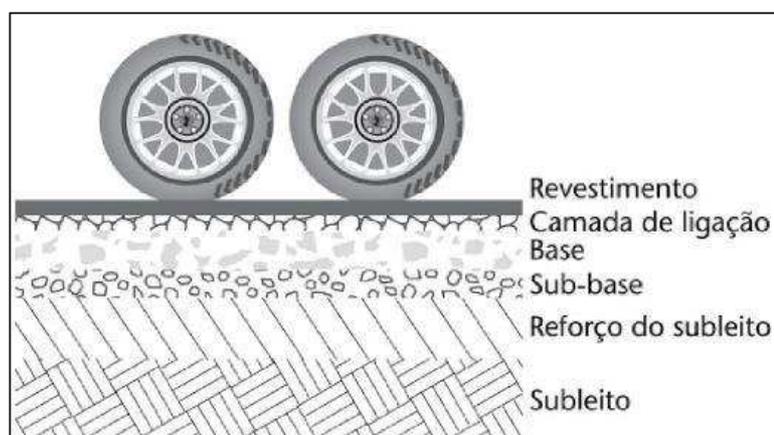


Fonte: Balbo (2007)

## 2.4 CAMADAS DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Para Balbo (2007), um pavimento apresenta, de uma forma completa, as seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito (fundação e parte constituinte da estrutura) (Figura 5). O autor ainda assegura que a condição mínima para caracterizar a estrutura como pavimento é apresentar camadas de revestimento e subleito (fundação), podendo, assim, não necessariamente possuir camada de sub-base ou de reforço do subleito.

**Figura 5 - Camadas de um pavimento.**



**Fonte:** Balbo (2007)

#### 2.4.1 Revestimento

Senço (2007) define revestimento, também chamado de capa de rolamento ou, simplesmente, capa, como uma camada praticamente impermeável, que recebe diretamente os esforços do tráfego. Sua função é melhorar a superfície de rolamento visando boas condições de conforto e segurança, bem como resistir ao desgaste, aumentando a durabilidade da estrutura.

O revestimento deve ser composto por materiais que evitem sua movimentação horizontal ou que sejam bem aglutinados. Isso se deve ao fato da necessidade de o revestimento não sofrer deformações elásticas e plásticas, além de desagregação de componentes ou perda de compactação. Portanto, para garantir tal característica, utilizam-se materiais como blocos pré-moldados de concreto, tratamentos superficiais betuminosos e misturas asfálticas em geral. (BALBO, 2007).

#### 2.4.2 Bases e Sub-bases

Balbo (2007) afirma que as camadas devem ter capacidade de resistir aos esforços verticais propagados sobre ela. Portanto, as bases e sub-bases têm a finalidade de receber os carregamentos provenientes do tráfego e distribuí-los, aliviando, assim, as tensões sobre as camadas inferiores. Além disso, elas também têm importância na drenagem subsuperficial dos pavimentos.

A constituição das bases e sub-bases pode ser de solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita

graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concreto, entre outros. No caso de utilização de solos estabilizados quimicamente, necessita-se de uma pequena utilização de agentes aglomerantes (BALBO, 2007).

Segundo Senço (2007), apenas se executa a sub-base quando, devido a fatores técnicos e econômicos, não for aconselhável a construção da base diretamente sobre a camada de regularização ou de reforço do subleito, como por exemplo, quando a camada de base apresentar espessura muito elevada. Além disso, tendo em vista que a sub-base é uma camada complementar à base, devem-se utilizar nela materiais de qualidade inferior, salvo no caso de pavimentos invertidos.

#### 2.4.3 Reforço do subleito

O reforço do subleito é uma camada executada acima da regularização e abaixo da sub-base, apresentando, portanto, características tecnológicas superiores à primeira e inferiores à segunda. Além disso, o reforço é um complemento da sub-base e tem função de resistir e distribuir os esforços verticais, todavia não é sua finalidade absorver definitivamente esses esforços e sim característica específica do subleito (SENÇO, 2007).

O emprego de reforço do subleito não é obrigatório, uma vez que espessuras maiores em camadas superiores poderiam aliviar as pressões de um subleito de baixa resistência. Entretanto, utiliza-se o reforço por questões econômicas, visto que, com seu emprego, exige-se menores espessuras de base e sub-base, que são, em geral, mais onerosas (BALBO, 2007).

#### 2.4.4 Subleito

O subleito é o terreno de fundação do pavimento, constituído por material natural consolidado e compactado ou por um material transportado e compactado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal e no caso dos aterros, respectivamente. Sua função é de receber os esforços verticais das camadas superiores e os aliviar conforme sua profundidade (BALBO, 2007).

## 2.5 ENSAIOS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Para caracterizar o solo coletado na área de estudo, foram realizados os ensaios de análise granulométrica, limites de liquidez e de plasticidade e massa específica dos grãos. Além disso, foram feitos os ensaios de compactação e posteriormente de expansão para qualificar o solo como utilizável ou não na sub-base de um pavimento asfáltico, segundo o critério de expansão.

Ao mesmo tempo, foram utilizados alguns dos ensaios de caracterização para classificar o solo segundo o método de classificação rodoviária TRB – *Transportation Research Board* – e qualificá-lo segundo seu comportamento como subleito. Também foi utilizado a tabela BPR – *Bureau of Public Roads* – para saber o comportamento desse solo sob o pavimento.

### 2.5.1. Análise Granulométrica

De acordo com o Pinto et al. (1996), entende-se por análise granulométrica a determinação, em peso, das porcentagens das frações que compõem a fase sólida do solo. O ensaio é executado passando a amostra de solo por uma sequência de peneiras de diâmetros padronizados. Com isso, é feita a pesagem da quantidade retida em cada peneira e posteriormente calcula-se a porcentagem que passou.

Diante dos julgamentos de Caputo (1988), a análise granulométrica é representada, graficamente, através da curva granulométrica, que são muito utilizadas para fins rodoviários, sendo importante na classificação dos solos.

Além disso, para solos muito finos, isto é, quando apresentam granulometria abaixo de 0,075 mm, realiza-se o ensaio de sedimentação.

### 2.5.2. Limites de Atterberg

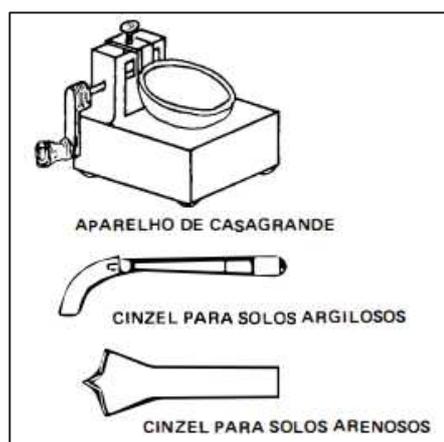
Em estudos geotécnicos, a relação entre os limites de Atterberg tem importante função nas avaliações do comportamento, da caracterização e da classificação de solo para implantação de estradas, uso em fundações e estruturas que armazenam e retêm água, entre outros.

### 2.5.2.1. Limite de Liquidez (LL)

Conforme Das (2007), define-se Limite de Liquidez como o teor de umidade no ponto de transição do estado plástico para o estado líquido. No Brasil, a realização desse ensaio segue a NBR 6459/2016.

A determinação do Limite de Liquidez (LL) é feita através do aparelho de Casagrande, que resume-se à uma concha de latão, acima de um suporte de ebonite. Com o auxílio do cinzel, que varia conforme o tipo de solo (Figura 6), realiza-se uma ranhura no centro da amostra. A concha contendo a amostra é deixada cair, sucessivamente, de uma altura padrão e intensidade constante e é anotado o número de golpes necessários para fechar o sulco. O número de golpes demandado é a resistência que o solo apresenta ao fechamento da ranhura, correspondente à umidade que o solo contém. (CAPUTO, 1988).

**Figura 6 – Aparelho de Casagrande e cinzel.**



Fonte: Caputo (1988)

### 2.5.2.2. Limite de Plasticidade (LP)

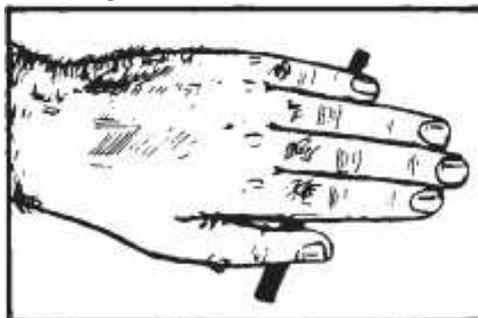
De acordo com Das (2007), define-se Limite de Plasticidade (LP) como o teor de umidade no ponto de transição do estado semissólido para o estado plástico. No Brasil, a realização desse ensaio segue a NBR 7180/2016.

A determinação do Limite de Plasticidade (LP) é feita pelo cálculo da porcentagem da umidade na qual o solo se esfarela, quando moldados em formato cilíndrico de 3 mm de diâmetro e aproximadamente 10 cm de comprimento (verificado com o cilindro de comparação), conforme Figura 7.

O Limite de Plasticidade, como o próprio nome já diz, é o limite mais baixo

do intervalo plástico do solo. O ensaio é realizado manualmente por rolamentos repetitivos de uma massa de solo sobre uma placa de vidro despolido (DAS, 2007).

Figura 7 – Realização do ensaio de Limite de Plasticidade.



Fonte: Caputo (1988)

### 2.5.2.3. Índice de Plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade (IP) consiste na diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade, conforme mostra a Equação 1:

$$\boxed{IP = LL - LP} \quad (1)$$

Onde: IP = Índice de Plasticidade;

LL = Limite de Liquidez;

LP = Limite de Plasticidade.

Esse índice define um critério de plasticidade para o solo, ou seja, quanto maior for o índice, mais plástico será esse solo. Além disso, determina a zona em que o terreno se encontra no estado plástico, sendo máximo para as argilas e nulo para as areias, fornecendo assim um critério de classificação do solo, segundo seu caráter argiloso (CAPUTO, 1988).

O índice de plasticidade é de grande importância para a classificação de solos que apresentam grãos finos e fundamental para o gráfico de plasticidade de Casagrande, o qual é a base para o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (DAS, 2007).

### 2.5.3. Massa específica dos Grãos

Define-se massa específica como sendo a relação entre a massa dos grãos de um solo e o seu volume real, incluindo o volume de vazios do solo e o peso da água presente em seus vazios. No Brasil, a realização desse ensaio segue a NBR 6458/2016.

A massa específica dos grãos pode ser calculada através da Equação 2.

$$\rho_s = \frac{M_1 \cdot 100 / (100 + w)}{\left[ M_1 \cdot \frac{100}{100 + w} \right] + M_3 - M_2} \cdot \rho_{w(T)} \quad (2)$$

Onde:  $\rho_s$  = massa específica dos grãos do solo ( $\text{g/cm}^3$ );

$M_1$  = massa de solo úmido (g);

$M_2$  = massa do balão volumétrico + solo + água, à temperatura T de ensaio;

$M_3$  = massa do balão volumétrico cheio de água até a marca de referência, à temperatura T de ensaio;

$w$  = umidade inicial da amostra;

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

A obtenção da massa específica dos grãos é de suma importância na engenharia, em especial na Mecânica dos Solos, sendo necessário, por exemplo, no ensaio de sedimentação e na determinação de índices físicos.

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

No ponto de vista da engenharia, objetiva-se classificar o solo para poder antever seu possível comportamento. Entretanto, por conta das inúmeras variações do solo de região para região, ocorre uma dificuldade na sua classificação. Devido a isso, foram criados sistemas de classificação, que indicam, conforme determinados grupos de solos, características geotécnicas semelhantes.

Existem variados sistemas de classificação, onde cada um leva em consideração um aspecto do solo, como: origem, textura, aspectos tátil-visuais, pedologia, parâmetros geotécnicos do solo, entre outros.

Todavia, segundo Caputo (1988), entre os principais sistemas de classificação está o TRB - *Transportation Research Board*, antigo HRB - *Highway Research Board*, sendo, atualmente, o mais empregado para uso em estradas. Esse sistema baseia-se na composição granulométrica e nos Índices de Atterberg para classificar o solo.

### 2.6.1 Sistema de Classificação Rodoviário – TRB

Nesse sistema, os solos se dividem em grupos e subgrupos em função de ensaios, como: Análise Granulométrica, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, bem como o Índice de Grupo (IG), sendo esse um número inteiro que varia de 0 a 20, cuja função é determinar a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento (subleito). Ou seja, quando esse índice apresentar valor igual a 0, ou próximo disso, o solo pode ser classificado como excelente para utilização na fundação de um pavimento, ao contrário, quando o valor for igual a 20, o material é classificado como de baixa qualidade para essa utilização (CAPUTO, 1988).

Assim, pode-se descobrir o índice de grupo através da Equação 3.

$$IG = 0,2 * a + 0,005 * a * c + 0,01 * b * d \quad (3)$$

$$\text{Onde: } a = \%_{200} - 35 \rightarrow \begin{cases} \text{se } \%_{200} > 75, \text{ adota } - \text{ se } a = 40 \\ \text{se } \%_{200} < 35, \text{ adota } - \text{ se } a = 0 \end{cases}$$

$$b = \%_{200} - 55 \rightarrow \begin{cases} \text{se } \%_{200} > 55, \text{ adota } - \text{ se } b = 40 \\ \text{se } \%_{200} < 55, \text{ adota } - \text{ se } b = 0 \end{cases}$$

$$c = LL - 40 \rightarrow \begin{cases} \text{se } LL > 60, \text{ adota } - \text{ se } c = 20 \\ \text{se } LL < 40, \text{ adota } - \text{ se } c = 0 \end{cases}$$

$$d = IP - 10 \rightarrow \begin{cases} \text{se } IP > 30, \text{ adota } - \text{ se } d = 20 \\ \text{se } IP < 10, \text{ adota } - \text{ se } d = 0 \end{cases}$$

Os valores de "a", "b", "c" e "d" deverão ser expressos em números inteiros e positivos, assim como o valor de IG (CAPUTO, 1988). Utiliza-se o Quadro 1 para realizar a classificação do solo conforme a TRB.

**Quadro 1 - Sistema de Classificação do T.R.B.**

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	30 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

**Fonte:** Chioveto (2017).

Como pode ser observado no Quadro 1, os solos granulares são compostos pelos grupos A-1, A-2 e A-3, enquanto os solos finos (silto-argilosos) são formados pelos grupos A-4, A-5, A-6, A-7. Ambos os casos ainda contam com seus subgrupos. Para os solos do grupo A-7, se  $IP \leq LL - 30$ , será A-7-5, se  $IP > LL - 30$ , será A-7-6.

Além disso, pode-se classificar o solo conforme a tabela da B.P.R. – Bureau Of Public Roads (Quadro 2), que especifica o comportamento do solo analisado sob o pavimento.

**Quadro 2 – Classificação da B.P.R – Bureau of Public Roads.**

Classe	Grupo	Comportamento sob o pavimento	Principais características	Índice de Grupo	
Solos graúdos (35% ou menos passando na peneira nº 200)	pedregulho	A-1	Ótimo	Bem graduado	0
		A-2	Satisfatório	Bem ligante	4 (máx.)
	areia	A-3	Precário quanto ao ligante Bom com base	Sem finos	0 (N. P.)
Solos finos (mais de 35% passando na peneira nº 200)	Solos siltosos	A-4	Precário quanto a inchamento devido às chuvas	Siltes e argilas de baixa plasticidade	8 (máx.)
		A-5	Contra-indicado total como base Tolerado como sub-base	Siltes elásticos	12 (máx.)
	Solos argilosos	A-6	Contra-indicado como base ou sub-base	Argilas inorgânicas de média e alta plasticidade	16 máx.)
		A-7	Empregado só com finalidades especiais	Grande maioria de argilas inorgânicas e solos orgânicos	20 (máx.)

**Fonte:** Chioveto (2017).

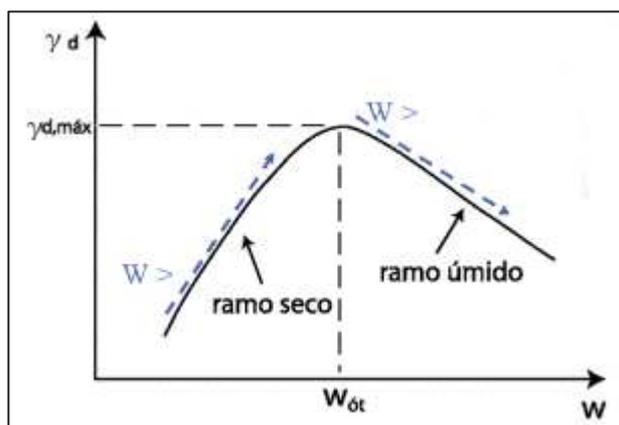
## 2.7 COMPACTAÇÃO

A compactação de um solo é um processo manual ou mecânico que objetiva a redução de seus índices de vazios e, com isso, aumentar a sua resistência. Além disso, visa também melhorar a estabilização de maciços terrosos, aumentar o peso específico do solo, a densidade e a capacidade de suporte, indicada pelo CBR. A compactação também reduz a permeabilidade, contração e compressibilidade (CAPUTO, 1988).

De acordo com Pinto (2006), a compactação é aplicada em inúmeras obras da engenharia, como nos aterros, nas camadas do pavimento, em barragens de terra, entre outros. Então, o tipo de obra e de solo vai determinar o processo de compactação a ser empregado, a umidade em que o solo deve se encontrar e a densidade a ser atingida

Com o ensaio de compactação, é traçada a curva de compactação, que relaciona diferentes valores de umidade e peso específico seco. Para traçar essa curva, recomenda-se determinar pelo menos cinco pontos, onde dois se encontram no ramo seco, dois no ramo úmido e um próximo à umidade ótima, preferencialmente no ramo seco. Com a curva, é possível obter a umidade ótima ( $w_{ót}$ ), bem como o peso específico seco máximo ( $\gamma_{d,máx}$ ), conforme Figura 8 (CAPUTO, 1988).

**Figura 8 – Curva representativa de compactação**



**Fonte:** Adaptado de Rodrigues (2012)

## 2.8 EXPANSÃO DO SOLO

Apesar de os índices de expansão não influenciarem diretamente no dimensionamento de pavimentos, é importante ter um parecer sobre eles, uma vez que solos expansivos podem provocar patologias no pavimento, como trincas e fissuras. Então, de acordo com Pinto et al. (1996), têm-se alguns valores usuais de expansão conforme o tipo de função exercida em um pavimento. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 1.

**Tabela 1– Valores usuais de expansão conforme a camada do pavimento.**

<b>CAMADA DO PAVIMENTO</b>	<b>EXPANSÃO</b>
Subleito	≤ 2%
Reforço do subleito	< 1%
Sub-base	< 1%
Base	< 0,5%

**Fonte:** ADAPTADO PINTO ET AL. (1996)

Segundo Slivinski et al. (2015), a expansão acontece, geralmente, em solos de natureza argilosa ou silto-argilosa que apresentam material que passa na peneira de 0,075 mm maior que 50%. Além disso, Slivinski et al Apud Campos & Burgos (2015), afirma que os solos expansivos podem causar sérios problemas em obras da construção civil, principalmente quando esses materiais não recebem a devida importância nas fases de projeto e execução da obra.

Portanto, é de suma importância determinar a expansão de um solo, a fim de saber se o mesmo é utilizável na camada de sub-base da estrada que irá ser construída no local da sua coleta.

Para determinar a expansão do solo utiliza-se a Equação 4.

$$E (\%) = \frac{L_f - L_i}{A_{i_{cp}}} * 100 \quad (4)$$

Onde: E = Expansão (%);

L<sub>f</sub> = Leitura final no extensômetro (mm);

L<sub>i</sub> = Leitura inicial no extensômetro (mm);

A<sub>i<sub>cp</sub></sub> = Altura inicial do corpo de prova.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo está descrita a metodologia que foi adotada no estudo, bem como os materiais utilizados, a fim de conhecer o comportamento do solo coletado no município de Toledo – PR.

#### 3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

##### 3.1.1 Coleta das amostras de solo

- Cavadeira;
- Trado manual;
- Pá; e
- Tambores com capacidade de armazenamento de 50 litros.

##### 3.1.2 Preparação da amostra para ensaios de caracterização

- Almofariz com mão de gral recoberta de borracha;
- Quarteador;
- Balança; e
- Bandejas metálicas.

##### 3.1.3 Ensaios de caracterização

- Estufa com capacidade de manter a temperatura entre 105°C a 110°C;
- Balança;
- Peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5, 4,8, 2,0, 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm.
- Agitador mecânico de peneiras
- Aparelho de dispersão;
- Provetas de vidro;
- Densímetro;
- Termômetro;

- Tanque para banho;
- Aparelho de Casagrande e Cinzel;
- Placa de vidro de superfície esmerilhada;
- Cápsula de porcelana;
- Gabarito cilíndrico de 3mm de diâmetro e 100mm de comprimento; e
- Espátulas.

#### 3.1.4 Compactação e Expansão

- Balança;
- Peneira de 19mm;
- Estufa com capacidade de manter a temperatura entre 105°C a 110°C;
- Cápsulas metálicas com tampas;
- Bandejas metálicas;
- Régua biselada;
- Espátulas;
- Cilindro metálico grande (cilindro de CBR) compreendendo o molde cilíndrico, a base e o cilindro complementar de mesmo diâmetro (colarinho) e disco espaçador metálico, com medidas respeitando a NBR 7182;
- Soquete grande, consistindo em um soquete metálico com massa de  $(4536 \pm 10)$  g e dotado de dispositivo de controle de altura de queda (guia) de  $(457 \pm 2)$  mm;
- Extensômetro e suporte; e
- Tanque.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Coleta e armazenamento das amostras de solo

Para coletar a amostra de solo foram utilizados trado manual, pá e cavadeira (Figura 9), além de tambores plásticos de 50 litros com tampa, para armazená-las.

**Figura 9 – Equipamentos utilizados para coletar a amostra de solo.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Para a escolha do local de coleta, levou-se em consideração a previsão de execução de uma estrada pavimentada. No que se refere à quantidade de solo coletada para a realização dos ensaios, acatou-se o que diz a NBR 6457/2016 - Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Assim, considerando a possibilidade de erro em alguns dos ensaios, coletou-se 100 kg de solo, quantidade que está além do previsto por norma. Já a profundidade de coleta seguiu as recomendações de Marques (2012), sendo coletado em uma profundidade entre 60 cm e 1,5 m, conforme a Figura 10.

**Figura 10 – Profundidade de coleta da amostra de solo.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

### 3.2.2 Preparação da amostra para os ensaios

Para a execução de todos os ensaios, a amostra foi previamente seca ao ar, até a umidade higroscópica. Posteriormente, o solo foi destorroado (Figura 11) e com o auxílio do repartidor de amostras, a amostra foi dividida até obter-se uma quantidade suficiente para a realização dos ensaios. Após isso, a amostra foi armazenada em sacos plásticos e lacrados, a fim de que não fosse alterada sua umidade. Além disso, para a preparação das amostras, seguiu-se todas as demais recomendações estabelecidas pela NBR 6457/2016.

**Figura 11 – Destorroamento do solo.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

### 3.2.3 Ensaio de caracterização do solo

Os ensaios foram realizados com a intenção classificar o solo segundo a TRB (Transportation Research Board – Quadro 1) e obter parâmetros segundo a BPR (Bureau Of Public Roads – Quadro 2). Os ensaios foram realizados seguindo as normas vigentes para os ensaios pertinentes. Os ensaios e suas respectivas normas podem ser observadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Ensaio de caracterização realizados e suas respectivas normas.**

<b>ENSAIOS</b>	<b>NORMAS</b>
Limite de Liquidez	NBR 6459/2016
Limite de Plasticidade	NBR 7180/2016
Análise Granulométrica	NBR 7181/2016
Massa Específica dos Grãos	NBR 6458/2016

**Fonte:** Autoria própria (2018).

### 3.2.3.1 Limite de Liquidez

O início do ensaio se deu com a adição de água destilada na amostra de solo, preparada de acordo com a NBR 6457/2016. Após isso, homogeneizou-se a mistura por cerca de 30 minutos (Figura 12).

**Figura 12 – Amostra homogeneizada na cápsula de porcelana.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Posteriormente, colocou-se uma quantidade de solo homogeneizado no aparelho de Casagrande, abriu-se uma ranhura com o cinzel e golpeou-se a concha contra o suporte de ebonite em uma razão de dois golpes por segundo, conforme Figura 13.

**Figura 13 – Ranhura realizada no aparelho de Casagrande.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Dessa forma, quando o número de golpes para fechar a ranhura em 13 mm esteve próximo do intervalo de 15 e 35, transferiu-se imediatamente uma quantidade desse solo para uma cápsula metálica para que fosse determinada a umidade.

Foram realizados 5 pontos entre esse intervalo, com umidades crescentes e número de golpes decrescentes. Para cada novo ponto, adicionou-se mais água destilada e homogeneizou-se novamente a mistura.

Com a determinação da umidade, foi traçado um gráfico umidade (escala aritmética) x nº de golpes (escala logarítmica), cujo valor do limite de liquidez se deu pela umidade correspondente a 25 golpes.

### **3.2.3.2 Limite de Plasticidade**

O início do ensaio se deu com a adição de água destilada na amostra de solo, preparada de acordo com a NBR 6457/2016. Após isso, homogeneizou-se a mistura por cerca de 30 minutos (Figura 14).

**Figura 14 – Amostra Homogeneizada na cápsula de porcelana.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Em seguida, formou-se uma pequena bola de aproximadamente 10 gramas com a mistura, que foi rolada sobre a placa de vidro, formando um cilindro.

Dessa forma, no momento em que esse cilindro fragmentou-se ao atingir o diâmetro e comprimento do gabarito (3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, foi transferido, imediatamente, para uma cápsula metálica para que fosse determinada sua umidade.

Realizou-se esse procedimento por 5 vezes e considerou-se satisfatório o ensaio quando pelo menos 3 pontos não diferiram da média em mais que 5%. O valor do Limite de Plasticidade se deu com a média aritmética da umidade desses pontos.

### **3.2.3.3 Análise Granulométrica**

A Análise Granulométrica do solo se deu por uma combinação: sedimentação e peneiramento. Como o solo estudado passou inteiramente na peneira de 2,0 mm, então não houve a necessidade de realizar o peneiramento grosso.

### • Sedimentação

Inicialmente, do material passado na peneira 2,0 mm, separou-se 70 gramas (devido ao solo apresentar propriedades de finos) e colocou-se imerso em um béquer com defloculante (hexametáfosfato de sódio), deixando por 24 horas. Posteriormente, verteu-se a mistura para o aparelho de dispersão, tomando o cuidado para não perder material, utilizando para isso o auxílio de água destilada. Em seguida, utilizando-se o dispersor, homogeneizou-se a mistura por 15 minutos, conforme Figura 15.

**Figura 15 – Mistura no aparelho dispersor.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Após isso, transferiu-se a mistura para uma proveta, completando com água destilada até a marca de 1000 ml. Por último, agitou-se a mistura, através de um agitador manual, por um período de 1 minuto. Imediatamente após a agitação, efetuou-se a leitura do densímetro, bem como mediu-se a temperatura, para os tempos de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, além de 1, 2, 4, 8 e 24 horas, como mostra a Figura 16.

**Figura 16 – Medição da temperatura.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Após a última leitura, verteu-se o material da proveta para a peneira n° 200, lavando a peneira mencionada com água corrente, a fim de eliminar todo o material com granulometria menor que 0,075 mm. O material retido nessa peneira foi utilizado no peneiramento fino, conforme mostra Figura 17.

**Figura 17 – Lavagem do material retido na peneira 0,075 mm.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

### • Peneiramento Fino

Inicialmente, secou-se em estufa o material retido na peneira de 0,075 mm. Posteriormente, utilizando o agitador mecânico de peneiras, o material foi passado nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,30, 0,15 e 0,075mm, conforme Figura 18. Em seguida, como o auxílio de uma balança de precisão, pôde-se obter os pesos retidos em cada peneira. Os resultados da sedimentação e do peneiramento fino foram utilizados para obter a curva granulométrica.

Figura 18 – Passagem do material nas peneiras através do agitador mecânico.



Fonte: Autoria própria (2018).

#### 3.2.3.4 Massa específica dos Grãos

Para a obtenção do peso específico dos grãos, preparou-se o solo de acordo com a NBR 6457/2016, a qual especifica que o material a ser utilizado deverá ser obtido a partir do que passou pela peneira 4,8 mm (n° 4). Como todos os grãos passaram por essa peneira, seguiu-se o recomendado no Anexo B da NBR 6458/2016.

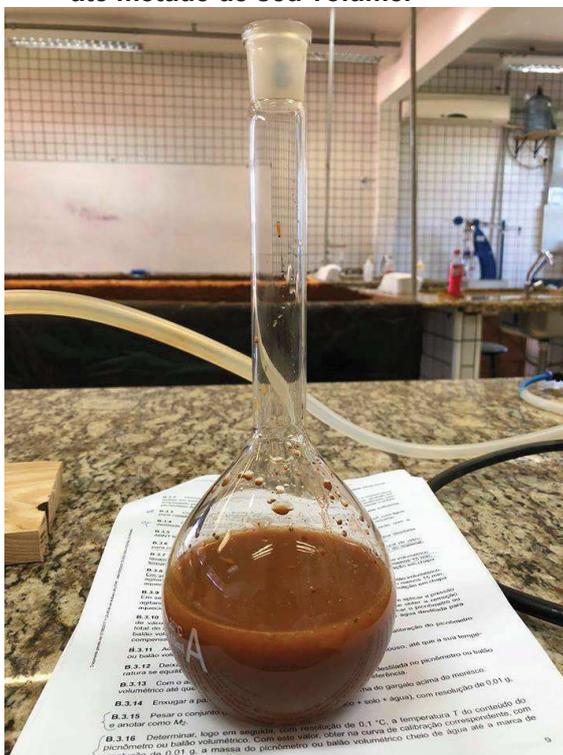
Na sequência, separou-se amostras em cápsulas metálicas com 40 g do

material a ser analisado em cada. Esse material foi deixado imerso em água destilada por 24 horas. Ao mesmo tempo, separou-se 3 cápsulas metálicas, com o que sobrou do mesmo material, para determinar a sua umidade.

Posteriormente, transferiu-se o material da cápsula metálica para o copo dispersor (utilizou-se água destilada para remover todas as partículas de solo), tomando-se o cuidado de evitar qualquer perda. As amostras de solo foram homogeneizadas no dispersor (Figura 15) durante 15 minutos.

Após isso, transferiu-se o solo do copo dispersor para um balão volumétrico, com o auxílio de um funil de vidro, novamente tomando-se a precaução de evitar qualquer perda de material. Nesse momento, adicionou-se água destilada até completar metade do volume do balão volumétrico (Figura 19) e então, aplicou-se vácuo durante 15 minutos, conforme a Figura 20. Em seguida, adicionou-se água destilada até 1 cm abaixo da base do gargalo e, novamente, aplicou-se vácuo por 15 minutos.

**Figura 19 – Balão volumétrico completo com água destilada e material até metade de seu volume.**



Fonte: Autoria própria (2018).

**Figura 20 – Vácuo sendo aplicado na amostra.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Por fim, os balões volumétricos foram deixados em “banho maria” por cerca de meia hora a uma temperatura de 50°C, a fim de expulsar todo o ar do conjunto. Feito isso, os balões foram retirados do “banho maria” e postos ao ar para resfriar.

Após deixar o balão em temperatura ambiente, preencheu-se os mesmos com água destilada até que a base do menisco coincidiu com a marca de referência do balão volumétrico. Secou-se o balão na parte externa e na parte interna do gargalo, acima do menisco e, com isso, pesou-se o conjunto balão volumétrico + amostra + água e mediu-se a temperatura do mesmo. Os dados obtidos foram usados para o cálculo do peso específico dos grãos.

#### 3.2.4 Compactação e Expansão

Os ensaios de compactação e de expansão foram realizados com a intenção de obter parâmetros para justificar se o solo estudado é aplicável ou não na camada de sub-base de um pavimento asfáltico, conforme a Tabela 1. Para isso, seguiu-se as normas vigentes para os respectivos ensaios, que podem ser vistas na Tabela 3.

**Tabela 3– Ensaio realizados e suas respectivas normas.**

<b>ENSAIOS</b>	<b>NORMAS</b>
Compactação	NBR 7182/2016
Expansão	DNIT 172/2016

**Fonte:** Autoria própria (2018).

Para o ensaio de compactação, utilizou-se a amostra obtida conforme a NBR 6457. Primeiramente, separou-se material, que passou na peneira 19 mm, em quantidade suficiente para a realização do ensaio. Posteriormente adicionou-se água de forma a obter o primeiro ponto com umidade 5% abaixo da umidade ótima presumível e, em seguida, adicionou-se mais 2% de água a cada novo corpo de prova (Figura 21), obtendo-se pontos abaixo e acima da umidade ótima.

**Figura 21 – Adição de água para compactação do novo corpo de prova.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Na sequência, compactou-se a amostra em 5 camadas iguais com o auxílio do cilindro grande, onde cada camada recebeu 26 golpes do soquete (Figura 22), conforme recomendação da norma DNIT 172/2016. O excesso de material foi retirado com o auxílio de uma régua biselada na altura exata do corpo de prova (Figura 23) e, após isso, pesou-se o conjunto.

**Figura 22 – Compactação do corpo de prova com o soquete.**



Fonte: Autoria própria (2018).

**Figura 23 – Rasamento do corpo de prova.**



Fonte: Autoria própria (2018).

Para determinar o teor de umidade, retirou-se da amostra uma quantidade de material após a compactação da segunda camada, conforme recomenda a norma NBR 7182/2016.

Por fim, realizou-se o ensaio de expansão. Inicialmente adaptou-se, em cada corpo de prova, um extensômetro. Posteriormente, colocou-se os corpos de prova imersos em água (Figura 24), conforme prescrição da norma DNIT 172/2016.

**Figura 24 – Corpos de prova imersos em água.**



**Fonte:** Autoria própria (2018).

Por último, mediu-se as expansões de 24 em 24 horas, durante quatro dias. Sendo assim, realizou-se o cálculo da expansão, determinou-se a curva de compactação bem como a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, apresentam-se os resultados provenientes dos ensaios de caracterização, compactação e expansão, bem como suas análises.

### 4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

A caracterização do solo foi feita por meio dos ensaios de Granulometria, Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Massa Específica dos Grãos. Com os resultados desses ensaios, foi possível definir o Índice de Plasticidade (IP), calcular o Índice de Grupo (IG) e classificar o solo conforme a TRB.

#### 4.1.1. Limites de Atterberg

Nos Quadros 3 e 4 são apresentados, respectivamente, os dados dos ensaios de limite de liquidez (LL) e do limite de plasticidade (LP). No Quadro 5 é mostrado os resultados dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade, bem como o índice de plasticidade (IP) do solo experimentado.

**Quadro 3 – Dados do ensaio de Limite de Liquidez.**

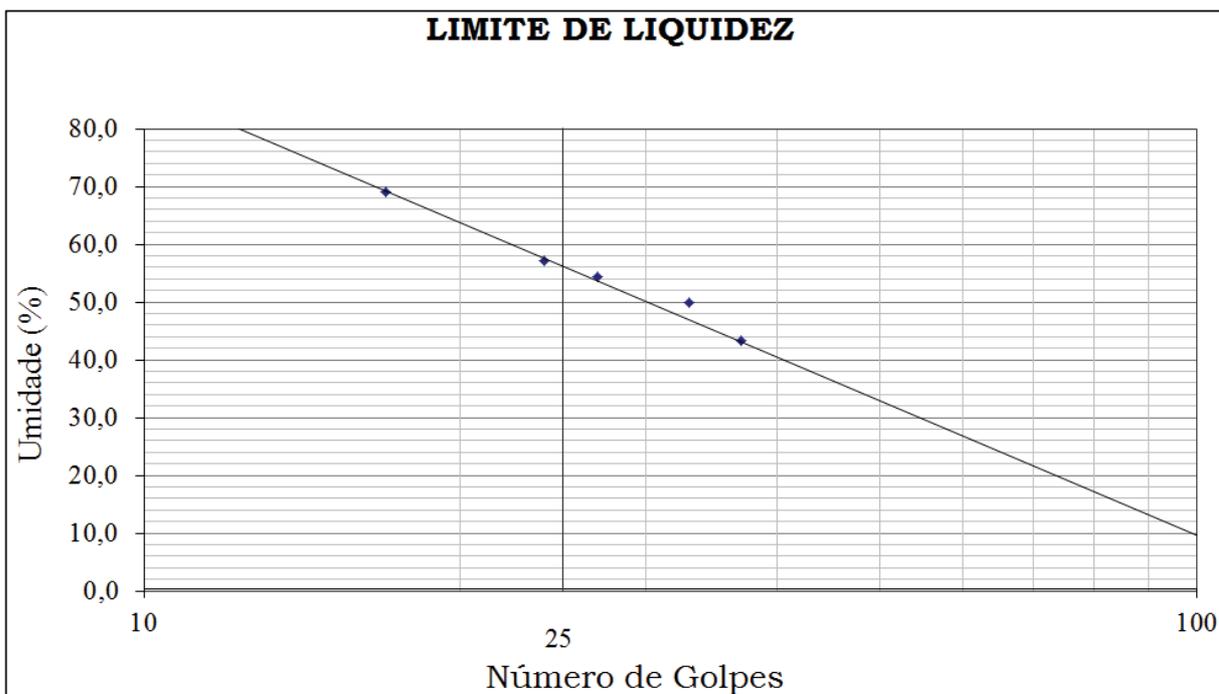
LIMITE DE LIQUIDEZ					
Cápsula N°	40	42	43	44	45
Amostra Úmida + Tara (g)	10,60	9,50	11,20	11,80	11,20
Amostra Seca + Tara (g)	8,60	7,90	9,30	9,80	9,90
Água (g)	2,00	1,60	1,90	2,00	1,30
Solo (g)	2,90	2,80	3,50	4,00	3,00
Tara (g)	5,70	5,10	5,80	5,80	6,90
Umidade %	69,0	57,1	54,3	50,0	43,3
Número de Golpes	17	24	27	33	37

**Fonte:** Autoria própria (2018).

Para determinar o Limite de Liquidez, elaborou-se o gráfico umidade x n° de golpes, onde no eixo das abcissas, o número de golpes encontra-se em escala

logarítmica, enquanto que no eixo das ordenadas, a umidade encontra-se em escala aritmética. O gráfico pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 25 – Gráfico para determinar o Limite de Liquidez.



Fonte: Autoria própria (2018).

O Limite de Liquidez é a umidade correspondente a 25 golpes. Desta forma, analisando a Figura 25, pode-se concluir que LL = 56%.

Quadro 4 – Dados do ensaio de Limite de Plasticidade.

Cápsula Nº	34	36	37	38
Amostra Úmida + Tara (g)	8,50	8,00	9,10	9,00
Amostra Seca + Tara (g)	7,80	7,30	8,40	8,30
Água (g)	0,70	0,70	0,70	0,70
Solo (g)	1,80	1,60	1,60	1,60
Tara (g)	6,00	5,70	6,80	6,70
Umidade %	38,9	43,8	43,7	43,7

Fonte: Autoria própria (2018).

Para determinar o limite de plasticidade calculou-se a média dos valores de

umidade apresentados no Quadro 4, que não divergiram em mais de 5% da média, aproximando-se para o número inteiro mais próximo, concluindo que  $LP = 44\%$ . Nesse caso, o valor de umidade de 38,9% divergiu em mais de 5% da média, não sendo considerado para o cálculo de LP.

**Quadro 5 – Resumo dos resultados de LL, LP e IP.**

RESULTADOS	
LIMITE DE LIQUIDEZ (%)	56
LIMITE DE PLASTICIDADE (%)	44
ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)	12

**Fonte:** Autoria própria (2018).

Segundo Fiori (2015), quanto maior o índice de plasticidade, maiores serão os problemas de engenharia relacionados à utilização do solo, como no suporte de estradas, edificações, entre outros. A Tabela 4 classifica o solo conforme o índice de plasticidade.

**Tabela 4– Classificação do solo conforme o IP.**

Denominação	Índice de Plasticidade
Não Plásticos	$IP < 1$
Levemente Plásticos	$1 < IP < 7$
Moderadamente Plásticos	$7 < IP < 17$
Altamente Plásticos	$17 < IP < 35$
Extremamente Plásticos	$IP > 35$

**Fonte:** Adaptado de Fiori (2015).

Então, nesse sentido, pode-se classificar o solo avaliado como sendo moderadamente plástico, visto que apresenta  $IP = 12$ . Por definição, plasticidade é uma propriedade de solos finos de se submeterem à grandes deformações permanentes sem sofrer ruptura (NBR 6484/01). Então, pode ser problemático o uso

desse solo na camada de sub-base, visto que essas deformações podem causar patologias como abaulamentos, buracos e fissuras.

Além disso, de acordo com Almeida (2005), os solos que apresentam LL maior que 50% são considerados muito compressíveis. Isso se enquadra para o solo estudado, uma vez que apresentou LL = 56%. Então, como a compressibilidade pode causar recalques, o uso desse solo na camada sub-base pode ser problemático, visto que esses recalques também podem provocar o surgimento das patologias anteriormente citadas.

#### 4.1.2. Classificação do solo segundo a TRB

A partir dos resultados dos Limites de Atterberg (Quadro 5) e sabendo que a porcentagem de material que passou na peneira de número 200 (0,075 mm) é 93,59% (comentado no item 4.1.4), pode-se classificar o solo conforme a tabela TRB. Desta forma, inicialmente, faz-se necessário o cálculo do índice de grupo – IG. Para tal, utilizou-se a Equação 3, onde determinou-se os valores dos fatores a, b, c e d e em seguida obteve-se o valor de IG. O Quadro 6 mostra os resultados obtidos a partir da Equação 3.

Quadro 6 – Cálculo do índice de grupo.

<b>Índice de Grupo</b>			
<b>Características</b>		<b>Fatores</b>	
<b>Limite de Liquidez - LL (%)</b>	56	<b>a</b>	40
<b>Limite de Plasticidade - LP (%)</b>	44	<b>b</b>	40
<b>Índice de Plasticidade - IP (%)</b>	12	<b>c</b>	16
<b>% que passa na 200</b>	93,59	<b>d</b>	2
<b>Índice de Grupo - IG</b>	<b>12</b>		

Fonte: Autoria própria (2018).

Desse modo, voltando ao Quadro 1 e com o auxílio dos dados apresentados no Quadro 6, concluiu-se que o solo ensaiado é do grupo A-7-5, que representa um solo argiloso.

Além disso, segundo o Quadro 2, esse tipo de solo não é recomendado na utilização das camadas de um pavimento. Então, deve-se empregá-lo na camada de sub-base apenas em ocasiões especiais, como por exemplo realizando uma

estabilização granulométrica.

Quando o solo natural não possui alguma particularidade desejada para determinada função na engenharia, melhora-o através de uma compactação com materiais de granulometria diferente, ou seja, faz-se a chamada estabilização granulométrica com o intuito de atender as particularidades desejáveis (Marques, 2012). Então, por meio da estabilização, pode-se alcançar características necessárias para o emprego desse solo como sub-base, entretanto, a utilização do mesmo sem o devido tratamento pode acarretar em patologias.

Também, analisando o valor do IG para o solo estudado, não recomenda-se a utilização do mesmo na camada de sub-base, uma vez que de acordo com Marques (2012), para utilizar o solo nessa camada o IG deve ser igual a 0 e nesse caso o valor foi de 12.

#### 4.1.3. Massa específica dos Grãos

Para a determinação da massa específica dos grãos, primeiramente determinou-se o teor de umidade da amostra ensaiada, conforme o Quadro 7.

**Quadro 7 – Determinação do teor de umidade.**

<b>Umidade higroscópica</b>			
<b>Cápsula N°</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>
<b>Amostra Úmida (g)</b>	33,74	30,9	33,87
<b>Amostra Seca + Tara (g)</b>	57,66	54,28	56,18
<b>Água (g)</b>	1,300	1,240	1,320
<b>Solo (g)</b>	32,44	29,66	32,55
<b>Tara (g)</b>	25,22	24,62	23,63
<b>Umidade %</b>	<b>4,007</b>	<b>4,181</b>	<b>4,055</b>
<b>Umidade média %</b>	<b>4,08</b>		

**Fonte:** Autoria própria (2018).

Posteriormente, realizou-se os cálculos utilizando a Equação 2, obtendo os resultados apresentados no Quadro 8. Como a temperatura do conjunto (solo + água destilada) no dia da realização do ensaio foi de 25°C, o valor da massa específica da água considerado para o cálculo foi de 0,9971 g/cm<sup>3</sup>, segundo recomendações da NBR 6458 (2016).

Quadro 8 – Cálculo da massa específica dos grãos.

<b>Massa específica dos grãos que passam na #4,8mm</b>		
<b>Ensaio com Balão volumétrico</b>	<b>F</b>	<b>D</b>
<b>Amostra Úmida (g) - M1</b>	40,02	40,01
<b>Balão volum. + solo + água (g) - M2</b>	692,13	697,36
<b>Balão volum. + água (g) - M3</b>	667,79	673,05
<b>Temperatura (°C)</b>	25,00	25,00
<b>Massa específica da água (g/cm³)</b>	0,9971	0,9971
<b>Massa específica dos grãos (g/cm³)</b>	<b>2,717</b>	<b>2,712</b>
<b><math>\rho_s</math> (g/cm³)</b>	<b>2,71</b>	

Fonte: Autoria própria (2018).

Conforme a NBR 6758 (2016), o ensaio é considerado satisfatório quando os resultados não diferirem em mais de 0,02 g/cm<sup>3</sup>. Portanto, como os ensaios realizados a partir dos balões volumétricos nomeados de F e D não divergiram em mais de 0,02 g/cm<sup>3</sup>, concluiu-se como satisfatório o valor obtido. Além disso, considera-se como massa específica dos grãos a média entre os dois valores, logo, obteve-se  $\rho_s = 2,71$  g/cm<sup>3</sup>.

Ademais, segundo Lafayette (2015), os valores médios de massa específica dos grãos para um solo argiloso variam de 2,68 a 2,80 g/cm<sup>3</sup>. Tendo isso em vista, constata-se que o valor encontrado tem coerência, visto que a classificação do solo segundo a TRB é A-7-5, ou seja, um solo argiloso.

#### 4.1.4. Análise Granulométrica

Os resultados da análise granulométrica são mostrados através da curva granulométrica. Para traçar essa curva, é necessário determinar a porcentagem que passa da amostra total em cada diâmetro. Os dados utilizados para plotar a curva são apresentados no Quadro 9 e foram determinados através dos ensaios de peneiramento e sedimentação. O resultado com todos os dados necessários para plotar a curva granulométrica encontra-se no Apêndice A.

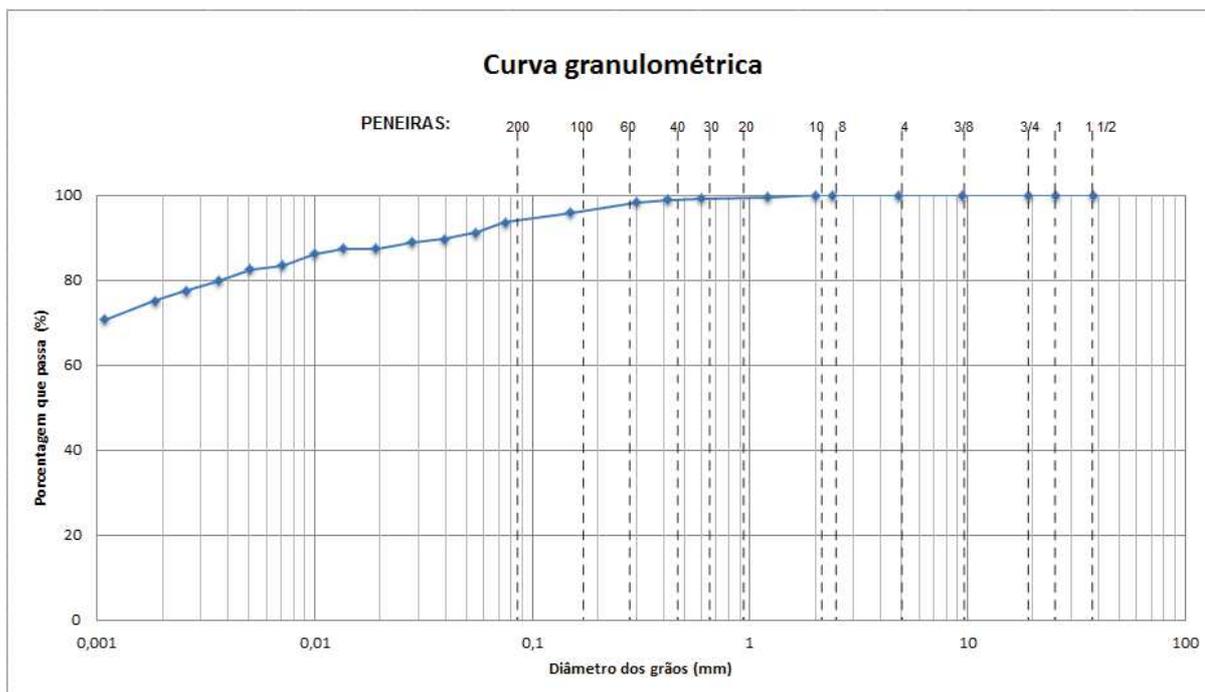
Quadro 9 – Dados para plotagem da curva granulométrica.

Peneira	Abertura (mm)	% de material que passa
1 1/2"	38,1	100
1"	25,4	100
3/4"	19,1	100
3/8"	9,5	100
4	4,76	100
10	2	100
16	1,19	99,54
30	0,59	99,23
40	0,42	98,86
60	0,25	98,32
100	0,149	95,91
200	0,0075	93,59
<b>S</b>	0,0554	91,22
<b>E</b>	0,0394	89,57
<b>D</b>	0,0279	88,86
<b>I</b>	0,0192	87,42
<b>M</b>	0,0136	87,42
<b>E</b>	0,01	86,22
<b>N</b>	0,0071	83,39
<b>T</b>	0,0051	82,45
<b>A</b>	0,0036	79,84
<b>Ç</b>	0,0026	77,49
<b>Ã</b>	0,0018	75,13
<b>O</b>	0,0011	70,64

Fonte: Autoria própria (2018).

Com isso, determinou-se a curva granulométrica, que pode ser vista na Figura 26.

Figura 26 – Curva granulométrica.



Fonte: Autoria própria (2018).

Através da análise da curva granulométrica (Figura 26) e do Quadro 9, pode-se extrair o percentual de partículas que compõem o solo estudado. Verificou-se, então, que a amostra ensaiada apresenta 82,45% das partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, identificando o solo como argiloso.

Além disso, constatou-se que a amostra não possui nenhuma partícula de pedregulho, ou seja, que apresente granulometria maior que 4,8 mm. Ademais, viu-se que pouco mais de 6% das partículas apresentam granulometria entre 0,074 e 4,8 mm, isto é, partículas de areia. Por fim, cerca de 16% do material encontrado apresenta partículas de silte, cujos diâmetros encontram-se entre 0,005 e 0,074 mm.

Na Tabela 5 pode-se observar a quantidade de cada material de maneira resumida.

**Tabela 5– Granulometria do solo e seus percentuais.**

<b>Material</b>	<b>%</b>
Pedregulho ( > 4,8 mm)	0,00
Areia Grossa (4,8 – 2 mm)	0,77
Areia média (2 – 0,42 mm)	0,91
Areia Fina (0,42 – 0,074 mm)	4,73
Silte (0,074 – 0,005 mm)	16,10
Argila ( < 0,005 mm)	77,49

**Fonte:** Adaptado de Rodrigues (2012).

Ainda pode-se extrair da Figura 26 e do Quadro 9 a quantidade, em percentual, de material que passa na peneira 0,075 mm (n° 200). Então, analisando o mesmo, verifica-se que o percentual que passa nessa peneira é de 93,59%. Esse valor foi utilizado para classificar o solo.

Além disso, analisando a Tabela 5, percebe-se um solo mal graduado, que apresenta um alto percentual de argila, o que traz coerência à classificação segundo a TRB, que diz que o solo é do tipo A-7-5, isto é, argiloso.

## 4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO E EXPANSÃO

### 4.2.1. Compactação

Esse ensaio tem por finalidade, além da obtenção da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima, proporcionar a execução do ensaio de expansão e obter seus resultados.

Tendo isso em vista, os resultados de massa específica aparente seca e umidade são apresentados no Quadro 10, bem como todos os dados necessários para determinar a curva de compactação.

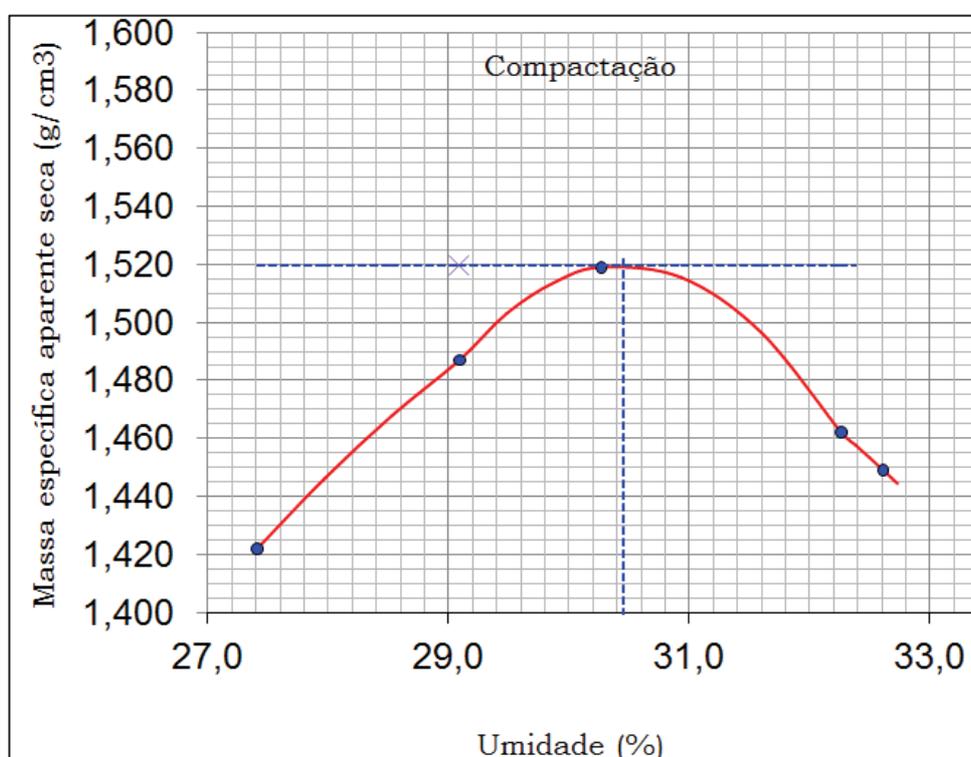
Quadro 10 – Umidade e massa específica aparente seca para cada ponto.

Água Acrescentada (ml)	0,00	90,00	180,00	270,00	360,00
Cilindro N°	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Amostra Úmida + Cilindro (g)	8913,70	9174,20	9297,30	9152,20	9072,20
Tara Cilindro (g)	5148,80	5150,20	5141,60	5098,90	5037,30
Amostra Úmida (g)	3764,90	4024,00	4155,70	4053,30	4034,90
Volume do Cilindro (cm <sup>3</sup> )	2077,71	2095,94	2099,61	2095,94	2099,63
Cápsula N°	S13	S5	S1	S21	S17
Amostra Úmida + Tara (g)	48,26	46,48	47,80	47,47	47,91
Amostra Seca + Tara (g)	41,69	39,65	40,39	40,04	40,08
Água (g)	6,57	6,83	7,41	7,43	7,83
Tara (g)	17,72	16,17	15,91	17,01	16,07
Amostra Seca (g)	23,97	23,48	24,48	23,03	24,01
Umidade (%)	27,409	29,089	30,270	32,262	32,611
Massa Específica Aparente Seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,422	1,487	1,519	1,462	1,449

Fonte: Autoria própria (2018).

Então, com os valores obtidos no Quadro 10, é possível traçar o gráfico de compactação, que pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Gráfico de compactação.



Fonte: Autoria própria (2018).

Através da curva de compactação (Figura 27), determinou-se os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. A Tabela 6 apresenta

esses valores.

**Tabela 6 – Ensaio realizados e suas respectivas normas.**

<b>Umidade Ótima (%)</b>	<b>Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm<sup>3</sup>)</b>
30,5	1,52

**Fonte:** Autoria própria (2018).

De acordo com Rocha (2015), o valor de umidade ótima para solos argilosos encontra-se em um intervalo de 25 a 30% e o valor de massa específica aparente seca máxima encontra-se em um intervalo de 1,43 a 1,53 g/cm<sup>3</sup> (os valores podem variar). Portanto, os resultados alcançados são considerados satisfatórios, uma vez que estão dentro ou muito próximos aos intervalos, tendo em vista que o solo é do tipo A-7-5, ou seja, argiloso.

Nesse sentido, é importante que se realize a compactação de forma correta, na umidade ótima, uma vez que os espaços vazios do solo serão menores, aumentando a capacidade de suporte do solo. Se a compactação não for bem realizada, podem ocorrer deformações quando o pavimento for submetido às tensões provenientes do tráfego e, conseqüentemente, ocorrerão patologias.

#### 4.2.2. Expansão

As alturas iniciais de cada corpo de prova utilizado no ensaio de expansão foram obtidas medindo-se a altura do cilindro usado no ensaio de compactação, com o auxílio de um paquímetro. Para poder diferenciá-los, resolveu-se denominá-los conforme o Quadro 11. No Quadro 12 são apresentadas as expansões medidas a partir dos extensômetros de 24 em 24 horas, bem como os resultados finais de expansão, em porcentagem, para cada corpo de prova.

**Quadro 11 – Alturas iniciais dos corpos de prova.**

<b>Corpo de Prova</b>	<b>CPI</b>	<b>CPII</b>	<b>CPIII</b>	<b>CPIV</b>	<b>CPV</b>
<b>Altura inicial (mm)</b>	114,20	114,90	114,20	114,90	114,50

**Fonte:** Autoria própria (2018).

Quadro 12 – Resultados do ensaio de expansão.

DATA	TEMPO	CPI	CPII	CPIII	CPIV	CPV
25/04/2018	0 h	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
26/04/2018	24 h	0,280	0,210	0,010	0,010	0,000
27/04/2018	48 h	0,320	0,230	0,030	0,030	0,015
28/04/2018	72 h	0,340	0,235	0,050	0,045	0,030
29/04/2018	96 h	0,345	0,240	0,065	0,060	0,035
% de Expansão		0,302	0,209	0,057	0,052	0,031

Fonte: Autoria própria (2018).

Com base nos valores obtidos (Quadro 12) e analisando a Tabela 1 proposta por Pinto et al. (1996), concluiu-se que, segundo os valores obtidos por meio do ensaio de expansão, o solo ensaiado se mostrou adequado para a utilização na camada de sub-base de pavimentos rodoviários, pois apresentou expansão menor que 1%.

Nogami (1995) Apud Zica (2010) afirma que o solo argiloso apresenta expansibilidade baixa quando compactado próximo da umidade ótima. Então, analisando o Quadro 12 conclui-se que o CPIII, que foi compactado com umidade mais próxima da ótima, de fato apresentou expansão baixa.

Por fim, analisando os Quadros 10 (que apresenta os valores de umidade) e 12 (que apresenta os valores de expansão), pode-se concluir que quanto maior foi o valor da umidade, menor foi a expansão do material ensaiado. Isso pode ser justificado devido a maior presença de água em contato com os minerais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação da expansão por meio da norma DNIT 172/2016 é um importante parâmetro a ser estudado antes da realização do projeto de uma estrada pavimentada, uma vez que existem valores máximos admitidos conforme a camada do pavimento. Então, se o solo não se enquadra dentro desses valores, pode-se optar pela utilização de um solo transportado de outra localização ou utilizar recursos que possibilitem o seu emprego, como por exemplo, a estabilização granulométrica. Nesse estudo, concluiu-se que o solo ensaiado pode ser aplicado como sub-base da estrada que está prevista pavimentar (objeto de estudo) segundo o critério da expansão, uma vez que ela ficou abaixo de 1%, sendo esse o limite máximo para essa camada.

Em termos de classificação do solo, obteve-se segundo a T.R.B, um solo do tipo A-7-5. Entretanto a B.P.R somente recomenda a utilização desse tipo de solo nas camadas do pavimento em ocasiões especiais, como por exemplo, realizando uma estabilização granulométrica. Nesse sentido, não se aconselha a utilização, sem nenhum melhoramento, desse solo como sub-base. Além disso, também não recomenda-se a utilização do mesmo nessa camada pelo fato dele apresentar IG igual a 12 enquanto que o sugerido para ela, segundo Marques (2012) é IG igual a zero.

Outro fator que desaprova a aplicação do solo estudado na camada de sub-base do pavimento é o fato do mesmo ser argiloso, visto que grandes problemas na engenharia são causados por esse tipo de solo. Isso acontece pela plasticidade apresentada, que é uma característica em que o material se deforma quando submetido à tensões. Por esse motivo, em pouco tempo de uso, esse solo pode se deformar por conta das tensões provenientes do tráfego, causando patologias, como buracos, fissuras e abaulamentos, no pavimento. Outra possível causa dessas patologias é o recalque devido à compressibilidade do solo estudado, uma vez que seu LL foi de 56%, sendo considerado muito compressível.

Então, diante desses fatores, aconselha-se não aplicar o solo estudado nas camadas do pavimento, em especial na sub-base, uma vez que, além da expansão, nada foi favorável à utilização do mesmo. Nesse sentido, acredita-se ter alcançado parâmetros suficientes que sirvam de auxílio na execução desse pavimento. Ademais, aconselha-se realizar os ensaios de CBR e todos os demais ensaios com

o solo estabilizado, para ver se assim é possível a utilização do mesmo nas camadas desse pavimento.

Ao fim do estudo, conseguiu-se alcançar todos os objetivos de maneira satisfatória. Realizou-se a caracterização do solo obtendo-se parâmetros coerentes. Além disso, classificou-se o solo e o avaliou como de má qualidade para utilização na camada de sub-base do pavimento asfáltico. Também realizou-se o ensaio de compactação, obtendo valores de expansão que contribuíram como critério técnico na avaliação visando a aplicação desse solo nas camadas do pavimento.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como complemento ao estudo realizado no solo onde será executada uma estrada pavimentada, propõe-se a realização das seguintes pesquisas:

- Realizar o ensaio de CBR (Índice de Suporte Califórnia) segundo a norma DNIT 172/2016;
- Realizar os ensaios com solo estabilizado (granulometricamente ou com aditivos químicos como cimento e cal) e comparar resultados;
- Obter o grau de saturação do solo utilizado na execução do ensaio de expansão, a fim de verificar possível influência desse índice nos resultados;
- Dimensionar o pavimento e compará-lo com o dimensionamento feito pela empresa responsável pelo projeto da estrada pavimentada a ser executada; e
- Analisar os custos desse dimensionamento e compará-lo com os custos orçados pela empresa responsável pelo projeto da estrada pavimentada a ser executada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **HidroWeb**: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>> Acesso em: 07 out. 2017.

ALMEIDA, Gil Carvalho Paulo de. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora – MG. Departamento de Transportes. 2005. Disponível em: <[http://ufrj.br/institutos/it/deng/rosane/downloads/material de apoio/APOSTILA\\_SOLOS.pdf](http://ufrj.br/institutos/it/deng/rosane/downloads/material%20de%20apoio/APOSTILA_SOLOS.pdf)>. Acesso em: 25 ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 7182 – Solo - Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 6458 – Grãos de pedregulhos retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457 – Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484 Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207 – Terminologia e Classificação de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 1982.

BARROS, Cristiane Oliveira de Alencar; FABRI, Glauco Túlio Pessa. **Revisão da correlação mini-CBR/CBR para solos do município de São Carlos-SP**.

2003. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-10072017-155009/pt-br.php>> Acesso em: 15 out. 2017.

BERNUCCI, Liedi B.; MOTTA, Laura M. G. da; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. Disponível em: <

<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2018/03/Cap-2-Ligantes-asf%C3%A1lticos.pdf>>

Acesso em: 15 set. 2017.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2016**. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>> Acesso em: 22 ago. 2017.

CHIOVETO, Arnaldo Taveira. **Classificação de Solos**. Sinop: ., 2017. 29 slides, color. Disponível em:

<[http://sinop.unemat.br/site\\_antigo/prof/foto\\_p\\_downloads/fot\\_13352slide\\_9\\_pdf\\_Slide\\_9.pdf](http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_13352slide_9_pdf_Slide_9.pdf)>. Acesso em: 08 mar. 2018.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 560 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DOS TRANSPORTES (DNIT). **Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. DNIT 172, Brasília - DF, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Mapa simplificado de solos do estado do Paraná.** 2012. Disponível em: <<http://www.sbcs-nepar.org.br/images/nepar/publicacoes/mapa-solo-pr.pdf>> Acesso em: 12 out. 2017.

EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO E RURAL DE TOLEDO – EMDUR. **Contrato de execução de pavimento asfáltico no solo estudado.** 2017.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** 3. ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2015 576p.

FORTES, Rita Moura. **Índice de Suporte Califórnia.** Disponível em: <<http://www.latersolo.com.br/wp-content/uploads/2015/02/4-CAPACIDADE-DE-SUPORTE-CBR.pdf>> Acesso em: 04 out. 2017.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Classificação Climática.** Disponível em: <<http://www.iapar.br>> Acesso em: 27 set. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 07 out. 2017.

LAFAYETTE, Kalinny. **Ensaio de Laboratório.** Recife: Poli/upe, 2015. 28 slides, color. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1831952/>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação.** Juiz de Fora, 2012. 210 p. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2012/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2017.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos.** 2. ed. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2005. 574p

NOGUEIRA, N. et al. **Conhecendo Toledo, o Nosso Município**. Disponível em: <[http://www.toledo.pr.gov.br/sites/default/files/livro\\_conhecendo\\_toledo\\_3o\\_ano\\_2016\\_-\\_vf.pdf](http://www.toledo.pr.gov.br/sites/default/files/livro_conhecendo_toledo_3o_ano_2016_-_vf.pdf)> Acesso em: 25 set. 2017.

PESSOA, H.C. **Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2004.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 2.ed São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 353 p.

PINTO, Salomão et al. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1996. 278 p. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%2005.12.06.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%2005.12.06.pdf)>. Acesso em: 07 set. 2018.

ROCHA, Melina Freitas. **Compactação**. Goiânia, 2015. 20 slides, color. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1612633/>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

RODRIGUES, E. R. **Caracterização e estabilização de um solo na cidade de Alegrete/RS com cimento Portland e cinza de casca de arroz**. Dissertação (graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa. Alegrete – RS, 2012.

SANTOS, N. J. **Estudo dos solos para construção civil na cidade de Mossoró - RN**. Dissertação (graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semiárido. Mossoró – RN, 2013.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. Dissertação (graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão – PR, 2015.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001.761p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO PARANÁ – MINEROPAR. **Geologia do Paraná.**

Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br>> Acesso em: 25 set. 2017.

SLIVINSKI, G. et al. **Remediação de solo expansivo.** Dissertação (graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tuiuti do Paraná. Curitiba – PR, 2015.

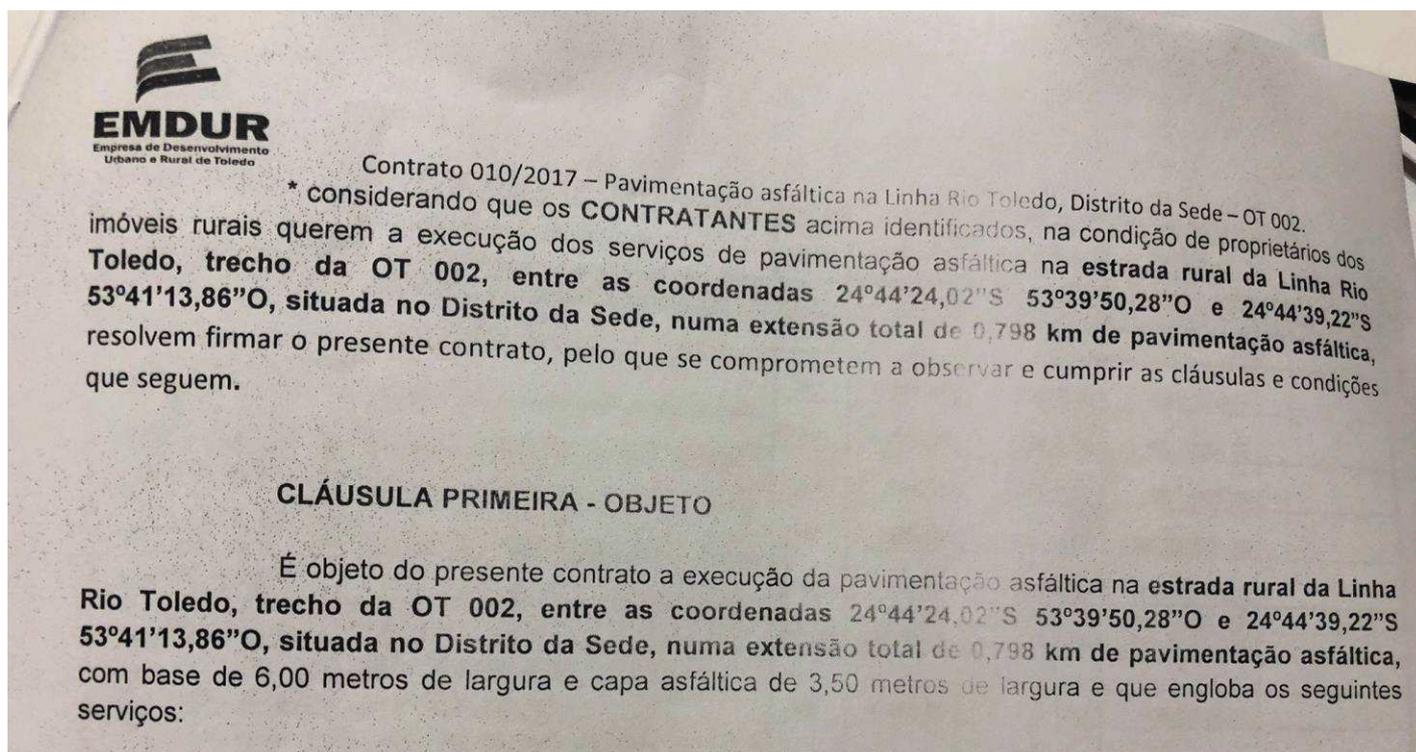
SOUZA, A. N. S. **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário.** Dissertação (graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília - UniCEUB. Brasília – DF, 2014.

VAINE, M. E. E. et al. **Geologia, Mineração e o Estado do Paraná.** Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br>> Acesso em: 03 out. 2017.

VILLIBOR, D. F. et al. **Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas.** 138p. São Paulo, SP. Ed. Impresso. 2000.

ZICA, E. S. **Estudo comparativo entre energias de compactação do subleito para subsidiar projetos de pavimentação.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto – MG, 2010.

## ANEXO A – Contrato de execução de pavimento asfáltico no solo estudado



Fonte: Emdur (2017)



## APÊNDICE A – Procedimentos de peneiramento e sedimentação

UMIDADE HIGROSCÓPICA			
Cápsula n°	31	32	20
Solo úmido + cápsula (g)	58,96	55,52	57,50
Solo seco + cápsula (g)	57,66	54,28	56,18
Peso da cápsula (g)	25,22	24,62	23,63
Peso de solo seco (g)	32,44	29,66	32,55
Umidade (%)	4,01	4,18	4,06
Umidade média (%)	4,08		

DADOS	
Massa total da amostra úmida (g)	1000,00
Massa total do peneiramento grosso (g)	0,00
Massa total da amostra seca (g)	960,79
Massa úmida para sedimentação (g)	70,00
Massa seca (g)	67,26

PENEIRAMENTO								
Peneiras	Abertura da malha (mm)	Material retido na peneira (g)	Material retido acumulado (g)	Material retido na peneira (%)	Material retido acumulado (%)	Material passado (g)	Material passado (%)	Material passado acumulado (%)
1 ½"	38,1	0	0	0	0	960,79	100	100
1"	25,4	0	0	0	0	960,79	100	100
¾"	19,1	0	0	0	0	960,79	100	100
⅜"	9,52	0	0	0	0	960,79	100	100
4	4,8	0	0	0	0	960,79	100	100
8	2,4	0	0	0	0	960,79	100	100
10	2	0	0	0	0	67,26	100	100
16	1,2	0,31	0,31	0,46	0,46	66,95	99,54	99,54
30	0,6	0,21	0,52	0,31	0,77	66,74	99,23	99,23
40	0,42	0,25	0,77	0,37	1,14	66,49	98,86	98,86
50	0,3	0,36	1,13	0,54	1,68	66,13	98,32	98,32
100	0,15	1,62	2,75	2,41	4,09	64,51	95,91	95,91
200	0,075	1,56	4,31	2,32	6,41	62,95	93,59	93,59

SEDIMENTAÇÃO								
Tempo (min)	Leitura do densímetro	Temperatura (°C)	Leitura do densímetro em meio dispersor	correção	Viscosidade (g.s/cm?)	Altura de queda (cm)	Diâmetro das partículas em suspensão (mm)	% material em suspensão
0,5	1,0415	25,5	1,0028	0,0387	9,03E-06	9,68	0,0554	91,22
1	1,0408	25,5	1,0028	0,0380	9,03E-06	9,79	0,0394	89,57
2	1,0405	25,5	1,0028	0,0377	9,03E-06	9,83	0,0279	88,86
4	1,0400	25	1,0029	0,0371	9,13E-06	9,17	0,0192	87,42
8	1,0400	25	1,0029	0,0371	9,13E-06	9,17	0,0136	87,42
15	1,0396	24,5	1,0030	0,0366	9,24E-06	9,24	0,0100	86,22
30	1,0384	24,5	1,0030	0,0354	9,24E-06	9,42	0,0071	83,39
60	1,0380	24,5	1,0030	0,0350	9,24E-06	9,49	0,0051	82,45
120	1,0370	24	1,0031	0,0339	9,34E-06	9,64	0,0036	79,84
240	1,0360	24	1,0031	0,0329	9,34E-06	9,80	0,0026	77,49
480	1,035	24	1,0031	0,0319	9,34E-06	9,96	0,0018	75,13
1440	1,0332	23,5	1,0032	0,0300	9,45E-06	10,24	0,0011	70,64