

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LEONARDO DE NOVAIS MENDES**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE PÓ DE PET EM UM SOLO ARGILOSO PARA  
APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

**CAMPO MOURÃO**

**2023**

**LEONARDO DE NOVAIS MENDES**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE PÓ DE PET EM UM SOLO ARGILOSO PARA  
APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

**Effect of adding PET powder to clayey soil for paving application**

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

Orientador: Prof. Dr. Ewerton Clayton Alves da Fonseca.

**CAMPO MOURÃO**

**2023**



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

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

**LEONARDO DE NOVAIS MENDES**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE PÓ DE PET EM UM SOLO ARGILOSO PARA  
APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

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

Data de aprovação: 07/junho/2023

---

Prof. José Wilson dos Santos Ferreira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof.a Eliana Fernandes dos Santos  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Ewerton Clayton Alves da Fonseca  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, em especial minha mãe, Adriana, que ansiava por esse momento, mas não pôde vê-lo em vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ewerton Clayton Alves da Fonseca, pela paciência e por não desistir de me orientar depois de tanto tempo.

Aos meus amigos, pelos momentos de estudo e trabalhos durante a graduação, mas também pelos momentos de diversão.

Aos demais professores do curso que me ajudaram durante a trajetória.

## RESUMO

Um dos maiores desafios da engenharia, atualmente, é fazer com que o desenvolvimento tecnológico esteja aliado ao desenvolvimento sustentável. No Brasil, há aumento anual na geração de resíduos sólidos urbanos. Embora o Brasil seja líder mundial na reciclagem do Polietileno Tereftalato (PET), apenas pouco mais da metade desse material foi reciclado, considerando-se o montante de aproximadamente 637 mil toneladas de embalagens descartadas. Uma das formas mais eficientes de aliar o desenvolvimento sustentável às atividades da construção civil é incorporar os resíduos provenientes de outros setores nos materiais utilizados na construção civil. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo investigar o comportamento mecânico de compósitos constituídos de solo argiloso mais pó de PET, nos teores de 5, 7 e 9%, a fim de avaliar sua utilização como reforço de subleito em pavimentos. Para essa investigação, foram realizados ensaios de caracterização com o solo residual do basalto, típico no município de Campo Mourão e esse material foi classificado empregando-se o sistema da AASHTO. Para avaliação mecânica, foram realizados ensaios de compactação e de Índice de Suporte Califórnia (ISC), com o objetivo de comparar os parâmetros de umidade ótima, massa específica aparente seca máxima e a capacidade de suporte do solo natural e dos compósitos nos diferentes teores de adição de pó de PET. Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com os resultados de Thomas *et al.* (2019). A partir dos resultados dos ensaios de caracterização, o solo natural foi classificado como A-7-5(16). Nos ensaios de compactação, notou-se o aumento da massa específica aparente seca máxima e a diminuição da umidade ótima para todos os compósitos investigados. Nos ensaios de ISC, todos os compósitos apresentaram aumento de capacidade de suporte e diminuição da expansão. Esse comportamento foi proporcional à adição de pó de PET. Os resultados dos ensaios realizados neste trabalho sugerem que os compósitos podem ser utilizados como camada de reforço de subleito, visto que todas as amostras apresentaram capacidade de suporte superior ao do solo natural, assim como expansão menor que 1,0%.

Palavras-chave: pó de PET; solo argiloso; compactação; pavimentação.

## ABSTRACT

One of the biggest engineering challenges today is to make technological development allied to sustainable development. In Brazil, there is an annual increase in the generation of urban solid waste. Although Brazil is a world leader in Polyethylene Terephthalate (PET) recycling, just over half of this material was recycled, considering the amount of approximately 637,000 tons of discarded packaging. One of the most efficient ways of combining sustainable development with civil construction activities is to incorporate waste from other sectors into the materials used in civil construction. Given this scenario, this work aimed to investigate the mechanical behavior of composites consisting of clayey soil plus PET powder, at levels of 5, 7 and 9%, in order to evaluate their use as subgrade reinforcement in pavements. For this investigation, characterization tests were carried out with the basalt residual soil, typical in the municipality of Campo Mourão, and this material was classified using the AASHTO system. For mechanical evaluation, compaction and California Bearing Ratio (CBR) tests were carried out, with the aim of comparing the parameters of optimal moisture content, maximum dry density and the bearing capacity of natural soil and composites at different levels of addition of PET powder. The results obtained in this work were compared with the results of Thomas *et al.* (2019). Based on the results of the characterization tests, the natural soil was classified as A-7-5(16). In the compaction tests, an increase in the maximum dry density and a decrease in the optimum moisture content were observed for all investigated composites. In the CBR tests, all composites showed an increase in bearing capacity and a decrease in expansion. This behavior was proportional to the addition of PET powder. The results of the tests carried out in this work suggest that the composites can be used as a subgrade reinforcement layer, since all the samples presented a bearing capacity superior to that of the natural soil, as well as an expansion of less than 1%.

Keywords: PET powder; clayey soil; compaction test; paving.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Solos</b> .....	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>Classificação de solos</b> .....	<b>10</b>
<b>3.3</b>	<b>Classificação AASHTO</b> .....	<b>11</b>
<b>3.4</b>	<b>Pavimento</b> .....	<b>13</b>
<b>3.5</b>	<b>Estrutura do pavimento</b> .....	<b>14</b>
3.5.1	Subleito .....	14
3.5.2	Reforço do subleito.....	15
3.5.3	Sub-base .....	16
3.5.4	Base .....	17
3.5.5	Revestimento.....	17
<b>3.6</b>	<b>Estabilização de solos</b> .....	<b>17</b>
3.6.1	Estabilização mecânica .....	18
3.6.2	Estabilização química.....	19
<b>3.7</b>	<b>Técnicas para melhoria de solos</b> .....	<b>19</b>
3.7.1	Reforço de solos com polímeros .....	20
<b>3.8</b>	<b>Polietileno Tereftalato</b> .....	<b>21</b>
<b>3.9</b>	<b>Compósito</b> .....	<b>22</b>
<b>3.10</b>	<b>Índice de Suporte Califórnia</b> .....	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>24</b>
4.1.1	Solo natural .....	24
4.1.2	Pó de PET .....	25
<b>4.2</b>	<b>Procedimentos experimentais</b> .....	<b>27</b>
4.2.1	Ensaio de caracterização .....	28
4.2.1.1	Análise granulométrica .....	29
4.2.1.2	Limites de Atterberg .....	31
4.2.1.3	Massa específica das partículas.....	33

4.2.2	Ensaio para a avaliação do comportamento mecânico .....	36
4.2.2.1	Compactação .....	36
4.2.2.2	Índice de Suporte Califórnia .....	38
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1</b>	<b>Granulometria .....</b>	<b>40</b>
<b>5.2</b>	<b>Limites de Atterberg.....</b>	<b>41</b>
<b>5.3</b>	<b>Massa específica das partículas sólidas .....</b>	<b>43</b>
<b>5.4</b>	<b>Compactação .....</b>	<b>44</b>
<b>5.5</b>	<b>Índice de Suporte Califórnia .....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICE A – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO .....</b>	<b>56</b>
	<b>APÊNDICE B – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO.....</b>	<b>57</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da engenharia, tem sido manter o desenvolvimento tecnológico atrelado ao desenvolvimento sustentável. Embora o conhecimento tecnológico avance de forma irrefreável, muitas vezes são deixados de lado temas muito importantes, como a gestão de resíduos sólidos (GUITARRARA, 2023).

Na última década, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), no Brasil, registrou considerável incremento, de 76,4 milhões para 81,8 milhões de toneladas por ano, aproximadamente 7,1%. Desse total, 93% são coletados e apenas 60,5% do que é coletado são destinados adequadamente (ABRELPE, 2023).

Com relação ao PET (Polietileno Tereftalato), o 12º Censo da Reciclagem do PET, divulgado pela ABIPET (Associação Brasileira da Indústria do PET), revelou que o Brasil, embora líder mundial na reciclagem de PET, reciclou apenas 56,4% das embalagens desse tipo de produto das 637 mil toneladas de embalagens desse tipo descartadas em 2021 (ABIPET, 2022). Essa percentagem pode ser considerada baixa, em comparação com outros materiais recicláveis, como as latas de alumínio, por exemplo, as quais tiveram reciclagem superior a 98,7% em 2021, de acordo com a Recicla Latas (2021).

Uma das formas mais eficientes da indústria da construção civil se tornar uma atividade sustentável é incorporar resíduos de outros setores nos materiais de construção (METHA, 2001). Impulsionada por pesquisas que estudam os benefícios que os materiais descartados, diariamente, podem oferecer à engenharia, a reutilização de resíduos sólidos tem sido, frequentemente, empregada na construção civil, devido às características físicas e químicas desses materiais.

As técnicas de estabilização e reforço de solos têm grande potencial para alinhar perfeitamente o desenvolvimento geotécnico ao desenvolvimento sustentável, visto que muitos materiais empregados nessas técnicas fazem parte dos principais grupos de resíduos descartados.

Nesse contexto, a fim de contribuir com a redução do descarte indevido de PET, o presente trabalho investigou os efeitos da adição de pó de PET no solo, para aplicação em pavimentos.

## **2 OBJETIVOS**

Nesta seção serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### **2.1 Objetivo geral**

Investigar o comportamento mecânico de compósitos constituídos por um solo argiloso, típico da cidade de Campo Mourão, mais pó de PET, por meio da realização de ensaios no laboratório.

### **2.2 Objetivos específicos**

A fim de atingir o objetivo geral deste trabalho, as seguintes etapas de trabalho serão realizadas:

- caracterizar o solo natural;
- analisar o efeito da adição de diferentes teores de pó de PET no solo, por meio de ensaios de compactação;
- verificar o comportamento mecânico dos compósitos por meio de ensaios de ISC.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta seção estão apresentados os principais conceitos necessários para o entendimento do estudo realizado.

#### **3.1 Solos**

De acordo com Vargas (1978), o conceito da palavra solo, em português, é diferente a depender da área de conhecimento.

O termo solo origina-se do latim, "solum", o qual significa suporte, superfície, base. O solo é um sistema composto de partículas sólidas tridimensionais e espaços vazios, que podem estar parcialmente ou totalmente preenchidos com água (TERZAGHI; PECK, 1962).

Em Geotecnia, solo é o material natural com origem conhecida, que constitui a crosta terrestre, sendo de fácil desmonte, isto é, escavável com trator de lâmina e ferramentas manuais como a pá e a enxada (MURRIETA, 2018).

A NBR 6502 (ABNT, 2022), define solo como "material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica".

No âmbito da engenharia rodoviária, considera-se solo todo tipo de material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da terra (DNIT, 2006).

#### **3.2 Classificação de solos**

O objetivo da classificação dos solos, no âmbito da engenharia civil, é facilitar o estudo do possível comportamento desse material ou de, pelo menos, orientar um programa de investigação necessário para permitir uma análise adequada do material existente no natural (PINTO, 2006).

O solo é um material que pode ser encontrado na natureza de diversas formas. Deste modo, para ser utilizado como fundação ou material de construção, é necessário ser classificado de modo que se possam formular métodos de projetos baseados em algumas propriedades de cada tipo de solo (DNIT, 2006).

Os solos possuem diversas classificações, como por exemplo, a classificação geológica, que leva em conta sua origem e formação. Existem outras

formas de classificar os solos, sendo que para a engenharia rodoviária a classificação básica é feita levando-se em conta a dimensão de suas/seus partículas/grãos. O solo pode conter partículas de argila, silte e areia, e, por vezes, agregados maiores, como cascalho e rachão. Para determinar a percentagem de cada fração presente no solo é feita a análise granulométrica (DAS, 2007).

Entre alguns dos principais sistemas de classificação de solos estão o da ABNT, por meio da NBR 6502 (ABNT, 2022), da AASHTO (*American Association for State Highway and Transportation Officials*), ASTM (*American Society for Testing Materials*) e CEN (*Comité Européen de Normalisation*). Na Tabela 1 estão apresentadas de maneira sucinta as classificações citadas acima.

**Tabela 1- Classificação do solo segundo distintos sistemas**

Partícula/grão	ABNT	AASHTO	ASTM	CEN
	Dimensões (mm)	Dimensões (mm)	Dimensões (mm)	Dimensões (mm)
Pedregulho	60 – 2	75 – 2	75 – 4,75	20 – 2
Areia	2 – 0,06	2 – 0,075	4,75 – 0,075	2 – 0,02
Silte	0,06 – 0,002	0,075 – 0,005	0,075 – 0,005	0,02 – 0,002
Argila	< 0,002	0,005 – 0,001	0,005 – 0,001	<0,002

Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.3 Classificação AASHTO

Tradicionalmente, o sistema da AASHTO é o mais empregado no mundo para classificar solos quando o foco do trabalho é pavimento rodoviário. Ele consiste em dividir os solos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites/índices de consistência e do Índice de Grupo (IG).

Essa classificação, publicada nos anais da HRB, em 1945, introduziu o conceito de IG, valor numérico, variando de 0 a 20, que retrata o duplo aspecto de plasticidade e dimensões das partículas que constituem o solo (DNIT, 2006). Quanto menor o IG, melhor será o desempenho do material quando empregado como material de subleito na estrutura do pavimento. Essa premissa não é regra geral, já que quando se trabalha com solo tropical laterítico, por exemplo, não necessariamente a afirmação feita acima é verdadeira. No Brasil, esse tipo de solo é

abundante e, por isso, classificações de solos brasileiros via sistema AASHTO merecem atenção especial.

O IG é calculado conforme Equação 1:

$$IG = 0,2 \times a + 0,005 \times a \times c + 0,01 \times b \times d \quad (1)$$

Onde:

a = % do material que passa na peneira de nº 200, menos 35;

caso esta % for > 75, adota-se a = 40;

caso esta % seja < 35, adota-se a = 0;

b = % do material que passa na peneira de nº 200, menos 15;

caso esta % for > 55, adota-se b = 40;

caso esta % seja < 15, adota-se b = 0;

c = valor de limite de liquidez ( $w_L$ ) menos 40;

caso o  $w_L$  > 60%, adota-se c = 20;

se o  $w_L$  < 40%, adota-se c = 0;

d = valor de índice de plasticidade (IP) menos 10;

caso o IP > 30%, adota-se d = 20;

se o IP < 10%, adota-se d = 0;

Para a determinação do IG, são utilizados os valores do limite de liquidez, que pode ser definido como o valor de umidade a partir do qual o solo passa a apresentar aspecto de um fluido, caso seja submetido à sollicitação externa, do limite de plasticidade, sendo a umidade na qual o solo passa do aspecto plástico para o aspecto semissólido (caso esteja perdendo umidade), ou seja, o menor teor de umidade em que o solo se comporta plasticamente e, ainda, utiliza-se da quantidade de material, em percentagem, passante na peneira de nº 200, a qual é obtida mediante análise granulométrica.

No Quadro 1 são mostradas as classificações (grupos) que podem ser obtidas após ensaios feitos no laboratório. O grupo do solo é determinado por processo de eliminação da esquerda para a direita e de cima para baixo. O primeiro

grupo a partir da esquerda, com o qual os valores dos ensaios obtidos do solo coincidir, será a classificação correta.

**Quadro 1 – Classificação dos solos (AASHTO)**

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N° 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	30 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira N° 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

\* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006, p. 56).

### 3.4 Pavimento

Para Bernucci *et al.* (2008) pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

De acordo com o DNIT (2006), os pavimentos podem ser classificados em 3 tipos: flexíveis, semirrígidos e rígidos. O flexível pode ser definido como aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa em decorrência do carregamento aplicado. O semirrígido é caracterizado por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias. Já o pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem elevada rigidez em relação às camadas inferiores.

A diferença essencial entre os tipos de pavimentos é basicamente como eles irão distribuir a tensão recebida pelo volume do tráfego para o subleito daquela estrutura (DNIT, 2006).

### 3.5 Estrutura do pavimento

Para Bernucci *et al.* (2008), a estrutura de pavimento é um sistema de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito e seu comportamento estrutural depende da espessura, da rigidez das camadas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento.

Lastran (1998) afirma que a qualidade dos pavimentos é influenciada de acordo com o tipo de revestimento e materiais utilizados em sua estrutura. Desse modo, a busca por novas alternativas para a construção civil é constante, devido à crescente escassez de materiais naturais e ainda o aumento de custos dos materiais de construção.

De acordo com DNIT (2006), os constituintes da estrutura do pavimento, em seção transversal, são: subleito, regularização (não é necessariamente uma camada, pois pode reduzir-se apenas ao corte do leito), reforço do subleito, sub-base, base e revestimento.

Medina (1997) diz que limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento, por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes é o objetivo principal da mecânica dos pavimentos. Soma-se a esse objetivo a busca por materiais sustentáveis que podem ser incorporados aos sistemas construtivos sem perda da qualidade do pavimento e muitas vezes podendo permitir um maior número de repetições do eixo padrão e, conseqüentemente, maior vida útil para a estrutura.

#### 3.5.1 Subleito

O subleito pode ser definido resumidamente como o terreno de fundação do pavimento e deve ser estudado e considerado até a profundidade onde atuam, de forma significativa, as tensões impostas pelo tráfego (DNIT, 2006). Em termos práticos, essa profundidade está entre 0,6 m e 1,5 m.

É a partir das características do subleito que as demais camadas serão dimensionadas. Um dos parâmetros de caracterização mecânica do material que compõe o subleito é dado pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), o qual foi concebido no final da década de 1920 para avaliar o potencial de deformação permanente, uma vez que era o defeito mais frequentemente observado nas rodovias do estado da Califórnia naquele período (PORTER, 1950).

Por meio do ISC, é possível medir também, axialmente, a expansão do corpo de prova de solo. Em geral, solos que apresentam valores significativos de expansão sofrem deformações consideráveis ao serem solicitados. Costuma-se estipular que o valor máximo aceitável de expansão do subleito seja de 2%. Em casos em que a expansão supere este valor, sugere-se troca de solo, ou estabilização do mesmo com cimento ou cal, ou ainda a colocação de uma camada de material pétreo na dimensão de rachão (acima de 60 mm), para aumento do valor de suporte (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Antes da execução das camadas de um pavimento, deve-se proceder a regularização e compactação do subleito. De acordo com a norma ES-137 (DNIT, 2010a), a regularização do subleito pode ser definida como a operação destinada a conformar o leito estradal, transversal e longitudinalmente, compreendendo cortes ou aterros até 20 cm de espessura.

### 3.5.2 Reforço do subleito

A norma técnica ES-138 (DNIT, 2010b) define reforço do subleito como uma camada estabilizada granulometricamente, executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, a qual é utilizada quando se torna necessário reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito, com a finalidade de diminuir custo de execução.

A NBR 12752 (ABNT, 1992) especifica as características que o material a ser empregado na camada de reforço de subleito deve ter. De acordo com essa norma, o material deve possuir ISC superior ao do subleito e uma expansão inferior a 1% (medida com sobrecarga de 10 lbf, que equivale à, aproximadamente, 4,5 kgf), quando determinados por meio dos ensaios de laboratório.

Para atender a esses requisitos, no material de reforço do subleito, assim como para as demais camadas, são empregados métodos de seleção e caracterização das características dos materiais. De forma geral, esses materiais são constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O emprego da camada de reforço do subleito não é obrigatório, pois teoricamente, espessuras maiores de camadas superiores poderiam aliviar as pressões sobre o subleito com baixa capacidade de suporte. Entretanto, procura-se



utilizá-lo sempre que possível por razões econômicas, pois um subleito de baixa capacidade de suporte exige camadas mais espessas de base e sub-base, que em geral são mais caras. Logicamente, o reforço de subleito por sua vez resistirá às solicitações de maior ordem de grandeza, respondendo parcialmente pelas funções do subleito e exigindo menores espessuras de base e sub-base sobre si, sendo, em geral, menos custoso o emprego de solos de reforço, ao invés de camadas granulares ou cimentadas mais espessas, quaisquer que sejam (BALBO, 2007).

### 3.5.3 Sub-base

De acordo com DNIT (2006), a camada de sub-base é a camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre a camada de reforço do subleito ou o próprio subleito.

Assim como para os materiais que constituem as camadas de base e subleito, os materiais que compõem a sub-base de um pavimento são classificados por meio de métodos para seleção e caracterização de suas propriedades. As características naturais destes materiais interferem nas propriedades geotécnicas quando compactados. De modo geral, os materiais de pavimentação quando compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função estrutural. Os materiais são basicamente constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A norma ES-139 (DNIT, 2010c), especifica as características dos materiais constituintes da camada de sub-base quando submetidos aos ensaios de caracterização. De acordo com a norma, os materiais devem apresentar IG igual a zero, assim como a fração retida na peneira n° 10 no ensaio de granulometria deve ser constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais.

Em relação à capacidade de suporte, é exigido na norma  $ISC \geq 20\%$  e expansão  $\leq 1\%$ . No caso de solos lateríticos, os materiais submetidos aos ensaios acima podem apresentar IG diferente de zero e expansão  $> 1,0\%$ , desde que no ensaio de expansibilidade apresente um valor inferior a 10%

#### 3.5.4 Base

Base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento (DNIT, 2006).

De um modo geral, assim como para os materiais que constituem as camadas de sub-base e subleito, os materiais que compõem a sub-base de um pavimento são classificados a fim de conhecer melhor suas propriedades (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A norma ES-141 (DNIT, 2022), especifica os parâmetros exigidos para os materiais que compõem a camada de base quando submetidos aos ensaios de caracterização, ISC e compactação. Para ISC, é exigido valor maior  $\geq 60\%$  para Número  $N \leq 5 \times 10^6$ ,  $ISC \geq 80\%$  para Número  $N > 5 \times 10^6$ , e expansão  $\leq 0,5\%$ .

#### 3.5.5 Revestimento

O revestimento é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste (DNIT, 2006).

O revestimento asfáltico é o mais empregado dentro da pavimentação. Estes são constituídos por associação de agregados e materiais asfálticos, podendo ser principalmente por penetração ou por mistura. Por penetração refere-se aos executados por meio de uma ou mais aplicações de material asfáltico e de igual número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas. No revestimento por mistura, o agregado é pré-misturado com o material asfáltico, antes da compressão (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com a norma ES-031 (DNIT, 2006), o concreto asfáltico pode ser empregado como revestimento, camada de ligação (*binder*), base, regularização ou reforço do pavimento e os materiais que o constituem são agregados (gráudo e miúdo), material de enchimento, filer e ligante asfáltico.

### 3.6 Estabilização de solos

A estabilização de solos consiste no tratamento do mesmo, por um processo mecânico, ou químico, tornando-o estável para os limites de sua utilização, e que permanece assim, mesmo sob a ação de cargas externas e ações climáticas (BATISTA, 1976).

Vizcarra (2010) relata que as estabilizações, mecânica e química, são as mais empregadas na engenharia geotécnica. Entretanto, além dos tipos de estabilização já citadas, há também a estabilização granulométrica. Embora todas elas possam ser utilizadas separadamente, o mais comum é a combinação de mais de um método.

De acordo com Brito e Paranhos (2017), a escolha do tipo de solução para estabilizar o solo depende do tipo e dos parâmetros do solo disponível, da finalidade de aplicação do solo, das exigências de projeto e da viabilidade técnica e econômica das opções disponíveis.

### 3.6.1 Estabilização mecânica

Soliz (2007) afirma que a estabilização mecânica de um solo deve conferir a este material as características necessárias de atrito interno, de modo que não ocorram deformações excessivas ou ruptura por cisalhamento do material compactado. Destacam-se, principalmente, como métodos de estabilização mecânica a compactação e a correção granulométrica por meio da mistura de solos de texturas diferentes (ONYELOWE *et al.*, 2012).

Pinto e Preussler (2002) relatam que esta estabilização pode ser obtida por meio do uso de alguns tipos de equipamentos mecânicos como: rolos compactadores, moto niveladoras, caminhões e compactadores manuais.

A compactação é um processo que tem por objetivo a melhoria dos parâmetros do solo, a fim de tornar o material mais homogêneo por meio da diminuição do volume de vazios (por conta da saída de ar dos poros) e consequente aumento da sua densidade. Ralph Proctor, em 1933, divulgou o seu método de controle de compactação, baseado em um novo método de projeto e construção de barragens de solos compactados que estava sendo empregado na Califórnia. Nesse método, a densidade relativa em que um solo é compactado, sob uma determinada energia de compactação, depende do teor de umidade no momento da compactação (MACCAFERRI, 2009).

Para Villibor (1982), a correção granulométrica pode ser definida como uma combinação e mistura de dois ou mais tipos de solos, em proporções previamente definidas para obtenção de um material homogeneizado, bem graduado, com percentagem limitada de partículas finas. Esse processo tem como finalidade a

garantia da estabilidade do solo e o aumento de sua resistência mecânica (principalmente capacidade de suporte), por meio do maior entrosamento dos grãos maiores e o preenchimento dos vazios pelas partículas mais finas.

No âmbito da engenharia rodoviária, a estabilização mecânica por correção granulométrica tem sido usada na construção de bases e sub-bases. Em geral, essas camadas são constituídas por solos, britas, escórias ou misturas de outros materiais (BALBO, 2007).

### 3.6.2 Estabilização química

Para a maioria dos tipos de solo, a melhoria de seus parâmetros pode ser feita apenas com a utilização do método de estabilização mecânica, entretanto, há casos em que apenas isso não é suficiente, recorrendo dessa forma, a combinações com outros métodos (LITTLE, 1995; MEDINA, 1987; SANTOS, 2012).

Entende-se por estabilização química a adição de substâncias que melhoram os parâmetros do solo, por meio de reações químicas (OLIVEIRA, 2000).

Os estabilizantes químicos mais empregados na pavimentação rodoviária atualmente são cal, cimento Portland e emulsão asfáltica (PATRÍCIO, 2015).

## 3.7 Técnicas para melhoria de solos

Para Murrieta (2018), o solo é um elemento crítico no dimensionamento de pavimentos. Ele é quem receberá as cargas das outras camadas, advindas do tráfego. Entretanto, nem sempre o solo natural possui propriedades que atendam às especificações do projeto de pavimentação.

Dentre as soluções geotécnicas para a melhoria do desempenho mecânico do solo, podem ser citados os métodos de estabilização e de reforço de solo. A técnica de reforço consiste na inclusão de um novo elemento na massa de solo, formando um compósito que permite redistribuição favorável das tensões e deformações (PALMEIRA, 1987).

A técnica de solo reforçado consiste na introdução de elementos resistentes à tração, convenientemente orientados, que aumentam a resistência e diminuem a deformabilidade do maciço. Nessa técnica, designada por reforço de solos, o comportamento global do maciço é melhorado à custa da transferência de esforços para os elementos resistentes. Em geral, os solos possuem resistência à

compressão, entretanto, baixa resistência à tração. Quando uma massa de solo é carregada verticalmente, ela sofre deformações verticais de compressão e deformações laterais de extensão (tração). Todavia, se a massa de solo estiver reforçada, os movimentos laterais são limitados pela reduzida deformabilidade do reforço. Essa restrição de deformações é obtida graças ao desenvolvimento de esforços de tração no elemento de reforço (MACAFERRI, 2009).

Não apenas por intermédio de contenções laterais do solo, o reforço deste também pode ser realizado por meio de adições de diferentes materiais, como em estudo de Thomas *et al.* (2019) em que investigaram as curvas de compactação ao adicionar PET em flocos e em pó, formando um compósito que tem como finalidade melhorar a resistência mecânica, a tenacidade, a coesão do solo e diminuir a propagação de fissuras.

Partindo do entendimento adequado do solo, pode-se aplicar as técnicas de reforço em diversas obras geotécnicas, como por exemplo, em estabilização de taludes, aterros sobre solos moles e fundações superficiais (MANJUNATH *et al.*, 2013).

### 3.7.1 Reforço de solos com polímeros

Os métodos de reforço e estabilização de solos com polímeros já são bem difundidos dentro da Geotecnia. Pode-se citar como métodos de reforço com polímero o uso de geossintéticos, que em sua maioria são compostos por polipropileno e/ou poliéster. Já os métodos de estabilização, destacam-se como técnica promissora a utilização de polímeros e associações poliméricas em camadas de pavimentos rodoviários, de modo a melhorar os parâmetros mecânicos do solo (MACCAFERRI, 2009).

Há diversos trabalhos realizados pautados na investigação de compósitos de solo-polímero. Dentre esses, podem ser citados: Souza e Costa (2019), no qual realizou ensaios laboratoriais com compósitos reforçados com fibra de polipropileno proveniente de copos descartáveis, onde obteve resultados satisfatórios, em relação às características mecânicas do novo material formado; Thomas *et al.* (2019), onde analisou a influência da adição de resíduos de PET em floco e em pó na curva de compactação de um solo argiloso e constatou-se decréscimo da massa específica dos compósitos e acréscimo da umidade ótima para as misturas com pó de PET e

Santos *et al.* (2019), em estudo dos parâmetros ótimos de compactação de um solo arenoso com adição de diferentes teores de fibras de PET, obteve-se resultados similares ao estudo de Thomas *et al.* (2019).

Carvalho (2019) avaliou o comportamento resiliente de solo argiloso com inserção de PET triturado e em pó para aplicação rodoviária, no qual identificou a possibilidade de utilização do resíduo de garrafas PET como material alternativo em base de pavimentos. Em seu trabalho, demonstrou que o acréscimo de PET em pó ao solo promove uma redução da massa específica aparente seca máxima e do teor de umidade ótimo.

### **3.8 Polietileno Tereftalato**

De acordo com Mano e Mendes (2001), o PET, é um poliéster termoplástico considerado como plástico de engenharia de grande versatilidade, resultado de uma reação de dois monômeros: ácido tereftálico, também conhecido por tereftalato de metila e etileno glicol ou glicol etilênico. O primeiro é classificado como um sólido, cujo ponto de fusão é igual a 140°C, e o segundo um álcool, líquido à temperatura ambiente e com ponto de ebulição de 197°C.

Pode-se definir plástico de engenharia os materiais de alta performance, que podem substituir partes metálicas de veículos automotores, eletrodomésticos, entre outras aplicações industriais, devido ao seu comportamento mecânico e fusibilidade (MELO, 2004). O polietileno tereftalato existe tanto na forma de termoplástico amorfo (transparente) quanto semicristalino (opaco e branco) e pode ser produzido em resina, fibra ou filme. O PET semicristalino tem boa resistência, ductilidade, rigidez e dureza, enquanto o PET amorfo tem melhor ductilidade. O PET tem como maior utilização a produção de fibras sintéticas. A produção de resina de garrafa é a segunda maior aplicação.

De acordo com Haddad (2013), os termoplásticos possuem elevada resistência à eletricidade, à oxidação e à água, assim como índice de permeabilidade igual a 0, visto ser um material hidrofóbico.

### 3.9 Compósito

O pó de PET pode ser definido como material composto por poliéster reduzido a tamanhos micrométricos e abrange faixas granulométricas abaixo de 28 # (mesh) ou 0,592 mm (REVISTA PLÁSTICO INDUSTRIAL, 2003).

Não existe uma abordagem explícita quanto aos processos de produção de pó de PET. Melo (2004), cita como formas de obtenção do pó os processos de cominuição: por raspagem de PET fundido e refundido, moagem em moinhos de barras e de bolas, raspagem de garrafas e moagem em moinhos de espiral sem fim.

Segundo Choudhary *et al.* (2010), ao misturar o pó de PET ao solo cria-se um compósito, que tem como objetivo melhorar a resistência mecânica, a tenacidade, a coesão do solo e diminuir a propagação de fissuras, por exemplo. Essa seria uma alternativa para aumentar o uso do resíduo de PET reciclado em obras geotécnicas, sendo de vital importância que o comportamento mecânico, as características físicas, químicas e ambientais dos compósitos sejam cuidadosamente analisadas.

### 3.10 Índice de Suporte Califórnia

Segundo Pinto (2006), de um modo geral, os solos lateríticos são encontrados não saturados na natureza, com elevado índice de vazios, acarretando baixa capacidade de suporte.

O ISC pode ser definido como a relação entre a pressão necessária para fazer penetrar um pistão num corpo de prova de solo, preparado de acordo com padrões pré-estabelecidos por normas, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão de referência, sendo o mesmo expresso em percentagem (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O ensaio para a determinação do ISC é ainda considerado importante para a avaliação de deformações permanentes, porém seus resultados não podem mais ser generalizados no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Os procedimentos para a obtenção dos valores de capacidade de suporte de um dado solo são descritos na NBR 9895 (ABNT, 2016h). Uma das vantagens desse ensaio é que ele pode utilizar os mesmos corpos de prova usados no ensaio de compactação. Além disso, no processo de obtenção do ISC é possível obter a expansão do solo.

A Tabela 2 mostra os valores de CBR e expansão requeridos para a utilização do solo em pavimentos flexíveis.

**Tabela 2: Valores de CBR e expansão requeridos para a utilização do solo em pavimentos flexíveis**

<b>Tipo</b>	<b>CBR</b>	<b>Expansão</b>
Subleito	$\geq 2\%$	$\leq 2\%$
Reforço do Subleito	Maior que do subleito	$\leq 1\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$

**Fonte: Adaptado de DNIT (2006).**



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os materiais e métodos empregados durante o desenvolvimento da pesquisa. Na sequência, as etapas de trabalho também são descritas.

### 4.1 Materiais

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados na pesquisa.

#### 4.1.1 Solo natural

O solo foi coletado nas dependências da Pedreira Itaipu, situada na cidade de Campo Mourão, PR. A escolha desse solo se deve ao fato de o mesmo ser comumente encontrado nas proximidades das obras de pavimentação na região de Campo Mourão.

A Figura 1 mostra o ponto onde foi coletada a amostra de solo.

**Figura 1 – Ponto de coleta do solo**



Fonte: Google Earth (2023).

Para a coleta do material, foram obedecidas as especificações da NBR 9604 (ABNT, 2016g). O local foi limpo antes da escavação, com o intuito de retirar a

vegetação presente. O solo foi coletado com uma pá numa profundidade compreendida entre 0,6 e 1,5 m, “livre” de matéria orgânica a fim de preservar o solo natural. Após, o material foi armazenado em sacos plásticos e conduzido ao laboratório para sua utilização nos ensaios laboratoriais.

Para a realização de todos os ensaios apresentados neste trabalho, foi coletado, aproximadamente, 150 kg de solo.

A Figura 2(a) mostra o local da jazida onde o solo foi coletado e a Figura 2(b) mostra a coleta do solo com uma pá e o armazenamento em sacos plásticos.

**Figura 2 – Coleta do solo. (a) local da coleta e (b) armazenamento do material**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

#### 4.1.2 Pó de PET

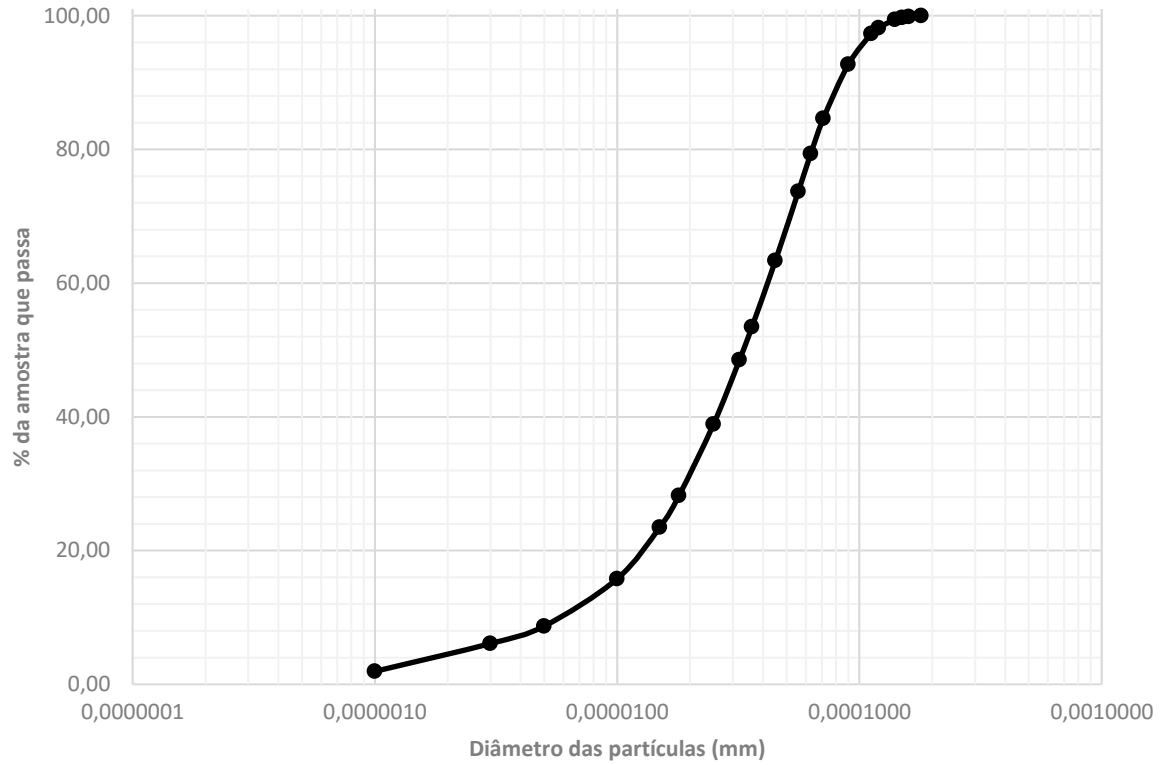
O pó de PET utilizado neste trabalho, de nome comercial MP-05, foi doado pela empresa A, a qual possui sede em Mauá, SP.

O pó é obtido por meio da micronização do Polietileno Tereftalato e, de acordo com o fabricante, possui distribuição granulométrica fina com partículas variando de 0,001 a 0,180  $\mu\text{m}$ , de cor final cinza claro.

A Figura 3 mostra a curva granulométrica desse material.

A Figura 4 mostra o compósito formado a partir da mistura do solo natural mais pó de PET.

**Figura 3 - Curva granulométrica do pó de PET**



Fonte: Empresa A (2019).

**Figura 4 - Compósito formado a partir da mistura solo + pó de PET**



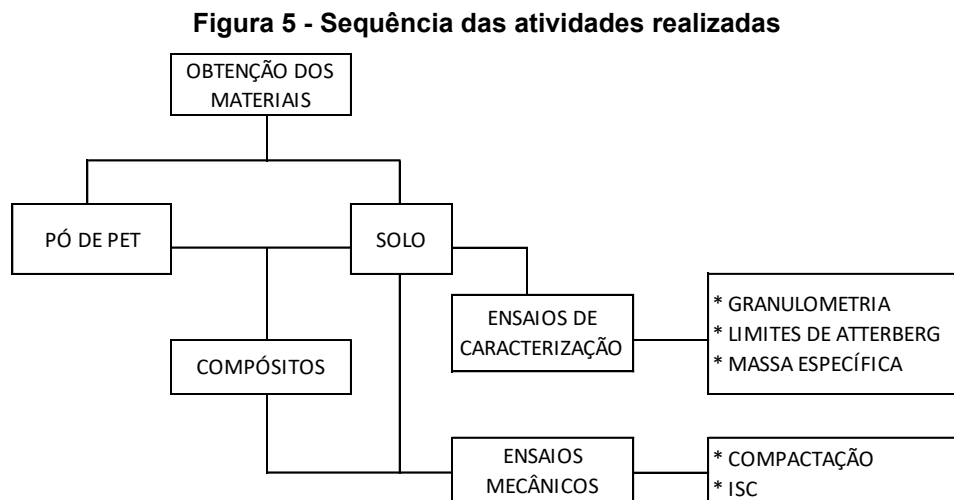
Fonte: Autoria própria (2022).

Para este trabalho, foram adicionados ao solo natural, teores (em massa) de 5%, 7% e 9% de pó de PET. Esses teores foram definidos a partir da leitura do trabalho realizado por Thomas *et al.* (2019), no qual corpos de prova de compósitos (solo argiloso + plástico) com 1%, 3% e 5% de PET, em pó e em flocos, foram submetidos ao ensaio de compactação, com o objetivo de correlacionar esses teores com a umidade ótima de cada compósito.

## 4.2 Procedimentos experimentais

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foram abordados métodos e procedimentos contidos em normas correntes, para análises dos dados obtidos a partir de ensaios realizados no laboratório.

A Figura 5 apresenta a sequência das atividades realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.



**Fonte: Autoria própria (2023).**

O programa experimental idealizado para esta pesquisa foi dividido em três etapas. A primeira etapa consistiu em obter as amostras de solo natural e pó de PET. Na segunda etapa, foram realizados os ensaios para caracterizar o solo natural (granulometria, limites de Atterberg e massa específica das partículas); quanto ao pó de PET, foram utilizadas as características fornecidas pelo fabricante do produto. Na terceira etapa, foram investigados os comportamentos mecânicos das misturas solo - pó de PET, por meio dos resultados dos ensaios (compactação, Índice de Suporte Califórnia), levando-se em consideração os resultados obtidos com as amostras de referência (apenas o solo natural, sem a adição de pó de PET).

Todos os ensaios mecânicos e de limite de liquidez e limite de plasticidade foram realizados no laboratório da Pedreira Itaipu. Os ensaios de granulometria e massa específica das partículas sólidas foram executados no laboratório de materiais da UTFPR-CM. A preparação das amostras de solo e compósitos foi realizada de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a).

#### 4.2.1 Ensaios de caracterização

No Quadro 2 são apresentados os ensaios, com suas respectivas normas, os quais foram utilizados para a caracterização física do solo natural estudado nesta pesquisa.

**Quadro 2 – Ensaios realizados para caracterização física do solo natural**

<b>ENSAIO</b>	<b>NORMA EMPREGADA</b>
Preparação das amostras para ensaios de compactação e ensaios de caracterização	NBR 6457 (ABNT, 2016a)
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016e)
Determinação do limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016c)
Determinação do limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016d)
Determinação da massa específica	NBR 6458 (ABNT, 2016b)

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Esses ensaios são considerados os mais tradicionais quando se trata de caracterização de solos para fins de aplicação rodoviária, visto que os conjuntos de resultados obtidos são de grande importância para o reconhecimento do material que se está trabalhando na obra. Além disso, os resultados desses ensaios são essenciais para a posterior classificação do solo natural pelo sistema AASHTO.

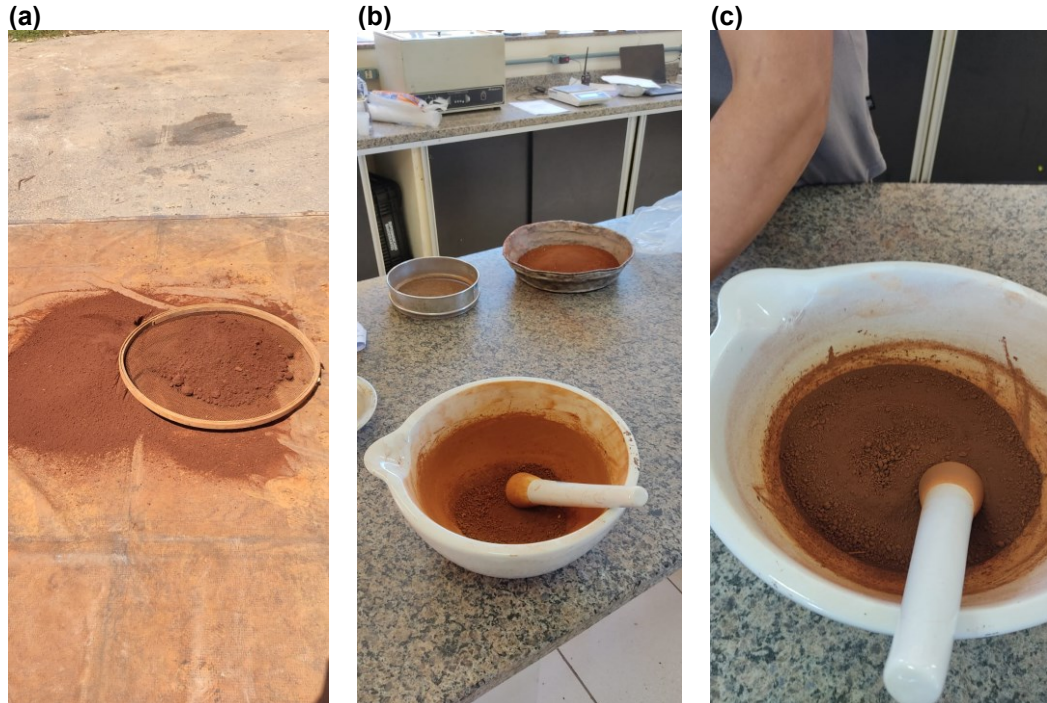
Para a realização deste trabalho, foi utilizado o processo de preparação das amostras de solo com secagem prévia, até que as estas atingissem a umidade higroscópica. Em seguida, foi realizada a homogeneização do solo e o processo de quarteamento.

A Figura 6(a) apresenta o peneiramento da amostra na malha que possui abertura igual a 4 mm e espalhamento para secagem até umidade higroscópica. Nessa etapa não foi descartado nenhum material, apenas foram retiradas algumas



impurezas, como madeira e galhos. A Figura 6(b) e (c), mostram o processo de destorroamento do solo.

**Figura 6 – Preparação da amostra de solo para ensaios de caracterização**



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.2.1.1 Análise granulométrica

A amostra a ser utilizada nesse ensaio foi separada e preparada seguindo os critérios da NBR 6457 (ABNT, 2016a). Inicialmente, foi separada uma amostra de solo de aproximadamente 70 g. Na amostra usada neste estudo observou-se que 100% das partículas sólidas passaram na peneira N° 10 (abertura de malha igual a 2,0 mm). Por conta disso, o peneiramento grosso não foi realizado, visto que a NBR 7181 (ABNT, 2016e) recomenda que esse peneiramento seja feito com o material retido na peneira de N° 10.

Prosseguindo para a determinação da granulometria da fração fina do material, a amostra foi imersa em uma solução de água destilada dentro de um béquer, o qual ficou nessa condição por pouco mais de 12 horas. Passado o tempo, a mistura foi transferida para o aparelho dispersor, com as devidas precauções para não perder material. O solo ficou em dispersão por 15 minutos e após isso, foi transferida toda a mistura para uma proveta graduada sem defloculante. Em

seguida, quando a temperatura do conjunto ficou em equilíbrio, a proveta foi agitada, conforme sugere a norma, por 1 minuto.

Posterior à agitação, a proveta foi colocada sobre a bancada e foi anotada a hora exata do início da sedimentação. Junto a isso, foi inserido dentro da proveta o densímetro. Foram efetuadas inicialmente as leituras do densímetro dos tempos ( $t$ ) De 0,5 min, 1,0 min e 2,0 min.

Foram feitas as leituras densimétricas e das temperaturas subsequentes nos tempos de 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h.

As porcentagens correspondentes a cada leitura do densímetro, referidas à massa total da amostra, foram obtidas por meio da Equação 2.

$$Q_s = \frac{\rho_s}{(\rho_s - \rho_w)} \times \frac{V \times (\rho_{susp} - \rho_w)}{M_w} \quad (2)$$

Onde

- $V$  é o volume da proveta igual a 1 000 cm<sup>3</sup>;
- $Q_s$  é a porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;
- $\rho_s$  é a massa específica dos grãos do solo, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);
- $\rho_w$  é a massa específica da água na temperatura de calibração do densímetro (20 °C), utilizando o valor de 1,000 g/cm<sup>3</sup>;
- $\rho_{susp}$  é a leitura do densímetro na suspensão;
- $M_w$  é a massa do material úmido submetido à sedimentação, expressa em gramas (g);

Após a última leitura, o material foi lavado na peneira de n° 200, com abertura de malha de 0,075 mm. Após, o material foi secado em estufa a 110 °C, até obter constância de massa, momento este em que foi realizado peneiramento da amostra, passando pelas peneiras de aberturas de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, com auxílio do agitador mecânico. Dessa forma, foram anotadas as massas retidas em cada peneira para posterior plotagem da curva granulométrica.

As porcentagens de materiais que passam nas peneiras foram obtidas por meio da Equação 3.

$$Q_f = \frac{M_w \times 100 - M_r(100 + W)}{M_w \times 100} \times N \quad (3)$$

Onde

- $M_w$  é a massa do material úmido submetido à sedimentação e posterior peneiramento fino;
- $W$  é a umidade hidrocópica do material passado na peneira de 2,0 mm;
- $M_r$  é a massa do material retido acumulado em cada peneira;
- $N$  é a porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm. Nesse caso, o  $N$  é igual a 100%.

O diâmetro máximo das partículas em suspensão, no momento de cada leitura do densímetro, foi obtido por meio da Equação 4.

$$d = \sqrt{\frac{1800\mu}{\rho_s - \rho_{md}} \times \frac{z}{t}} \quad (4)$$

Onde

- $d$  é o diâmetro máximo das partículas, expresso em milímetros (mm);
- $\mu$  é o coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g x s/cm<sup>2</sup>;
- $z$  é a altura de queda das partículas, com resolução de 0,1 cm, correspondente à leitura do densímetro, expressa em centímetros (cm);
- $t$  é o tempo de sedimentação, expresso em segundos (s);
- $\rho_s$  é a massa específica dos grãos do solo, determinada de acordo com o Anexo B da NBR 6458 (ABNT, 2016b), expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);
- $\rho_{md}$  é a massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>).

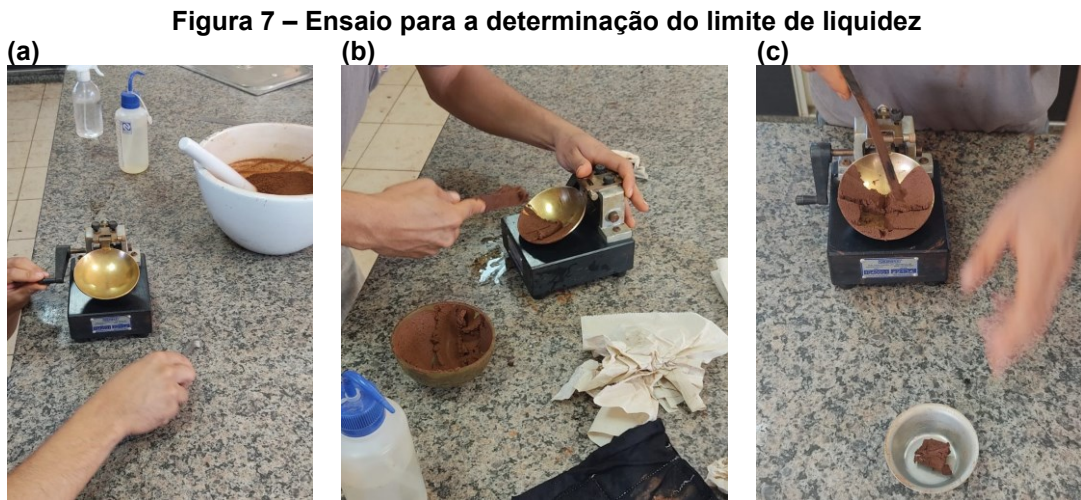


#### 4.2.1.2 Limites de Atterberg

Os ensaios para a determinação dos limites de plasticidade e de liquidez foram realizados de acordo com as NBR 7180 (ABNT, 2016d) e NBR 6459 (ABNT, 2016c), respectivamente. E a preparação das amostras de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a), com amostras secas previamente ao ar.

O ensaio de limite de liquidez seguiu os passos descritos na norma para amostras com secagem prévia, com tempo de homogeneização de aproximadamente 25 minutos, por se tratar de um solo mais argiloso. Foram obtidos 5 pontos de teor de umidade (abcissas, escala aritmética) x número de golpes (ordenadas, escala logarítmica), compreendendo os valores de 15 a 35 golpes.

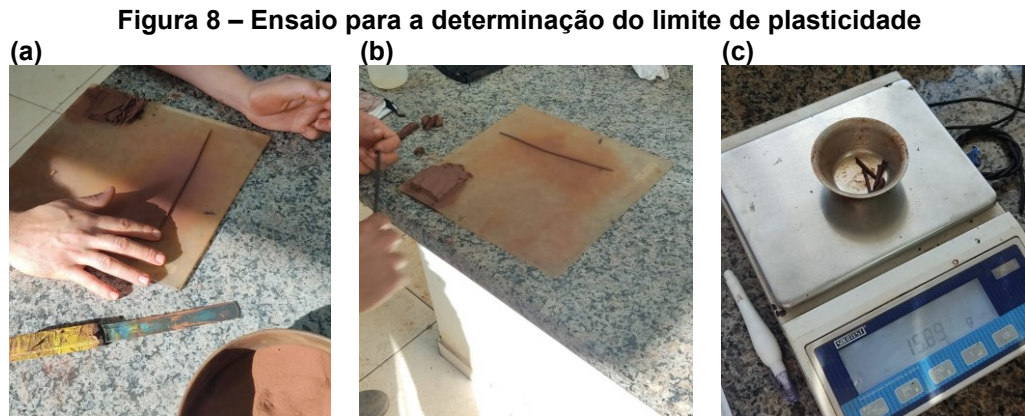
A Figura 7(a) mostra as etapas de calibração do aparelho de Casagrande, 7(b) a preparação da amostra no aparelho e (c) a retirada da amostra após o fechamento da ranhura.



Fonte: Autoria própria (2023).

O ensaio de limite de plasticidade seguiu, assim como o limite de liquidez, os passos descritos na sua respectiva norma para amostras com secagem prévia ao ar, com tempo de homogeneização de 25 minutos. Tomou-se cerca de 10 g da amostra preparada para moldar o cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 100 mm de comprimento, assim como do gabarito, até que o cilindro moldado se fragmente. Após isso, transferiram-se as partes do cilindro em um recipiente adequado para a determinação do teor de umidade.

As Figuras 8(a) e (b) mostram as etapas de moldagem dos cilindros e (c) a pesagem de uma das amostras.



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.2.1.3 Massa específica das partículas

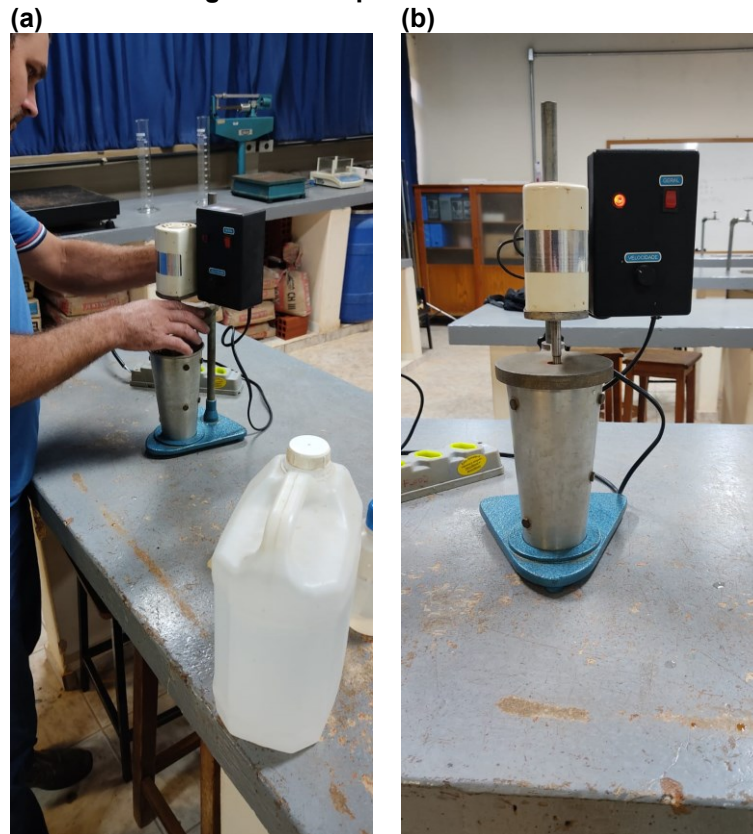
Para este ensaio, teve-se como base o Anexo B da NBR 6458 (ABNT, 2016b), para grãos de solos que passam na peneira de abertura 4,8 mm. Foi utilizado picnômetro calibrado de 500 cm<sup>3</sup>.

Tomou-se aproximadamente 250 g de amostra para homogeneização, seguindo os critérios descritos na NBR 6457 (ABNT, 2016a). Após isso, pesou-se aproximadamente 50 g de amostra e em seguida foi colocada em béquer com água destilada por 12 horas. Com o restante da amostra homogeneizada, foi feita a determinação da umidade.

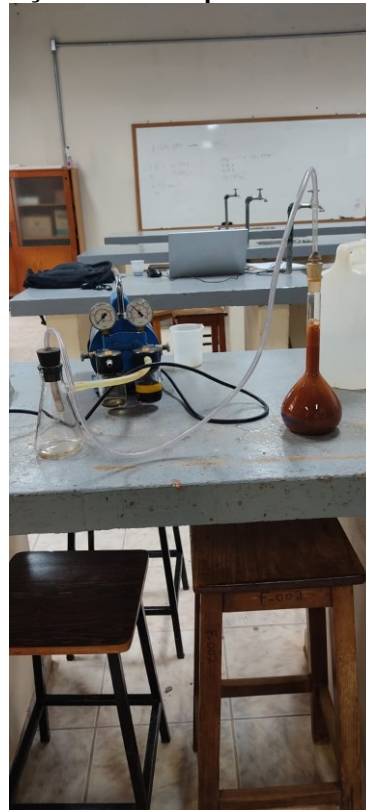
Em seguida, a amostra ficou em dispersão por 15 minutos. Após decorrido o tempo, a mistura foi transferida para o picnômetro, que por sua vez, foi enchido até aproximadamente metade de sua capacidade. A seguir, foi aplicado vácuo por 15 minutos, para retirada das bolhas. Passados os 15 minutos, foi adicionada água destilada até 1 cm abaixo da base do gargalo. Aplicou-se a mesma pressão utilizada anteriormente, por 15 minutos, com agitação do picnômetro em intervalos regulares de tempo.

As Figuras 9(a) e (b) mostram o momento da dispersão da amostra.

A Figura 10 mostra o processo de aplicação de vácuo para retirada das bolhas de ar.

**Figura 9 – Dispersão da amostra**

Fonte: Autoria própria (2023).

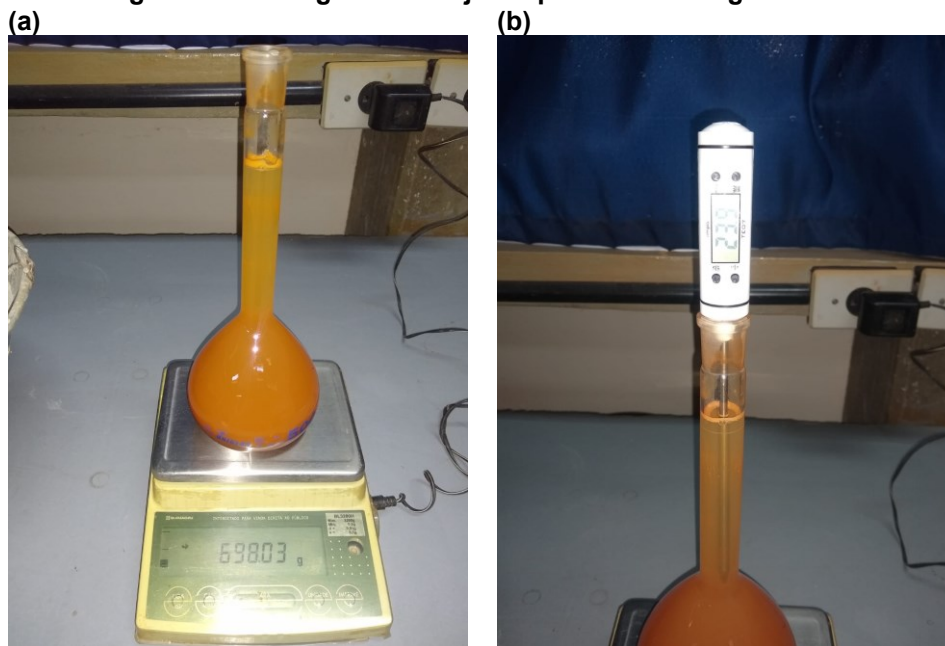
**Figura 10 – Aplicação de vácuo para retirada das bolhas de ar**

Fonte: Autoria própria (2023).

Finalizado o processo de retirada das bolhas de ar, o picnômetro ficou em repouso até que sua temperatura coincidissem com a do ambiente. O recipiente foi enchido até que a base do menisco coincida com a marca de referência. Depois de enxugado, o conjunto picnômetro + água + solo foi pesado em balança com resolução de 0,01 g e foi aferida também sua temperatura.

A Figura 11(a) mostra a pesagem da amostra e (b) a determinação da temperatura.

**Figura 11 – Pesagem do conjunto picnômetro + água + solo**



Fonte: Autoria própria (2023).

Por fim, foi determinada a massa específica das partículas sólidas por meio da Equação 5.

$$\rho_s = \frac{M_1 \times 100 / (100 + w)}{[M_1 \times 100 / (100 + w)] + M_3 - M_2} \times \rho_{w(t)} \quad (5)$$

Onde:

- $\rho_s$  é a massa específica dos grãos do solo, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ );
- $M_1$  é a massa do solo úmido;
- $M_2$  é a massa do picnômetro + solo + água, à temperatura T de ensaio;
- $M_3$  é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, à temperatura T de ensaio;
- $w$  é a umidade inicial da amostra;



- $\rho_{w(t)}$  é a massa específica da água, à temperatura T de ensaio.

#### 4.2.2 Ensaios para a avaliação do comportamento mecânico

No Quadro 3 são apresentados os ensaios, com suas respectivas normas, que serão utilizados para obtenção dos parâmetros mecânicos do solo natural e dos compósitos.

**Quadro 3 - Ensaios realizados para análise de comportamento mecânico**

<b>ENSAIO</b>	<b>NORMA EMPREGADA</b>
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016f)
Índice de Suporte Califórnia	NBR 9895 (ABNT, 2016h)

Fonte: Autoria própria (2023).

Esses ensaios são indispensáveis para análise dos parâmetros mecânicos do solo, pois permitem avaliar a necessidade do tratamento com estabilizantes, os tipos de base e sub-base que deverão ser executados, os problemas que podem surgir e como evitá-los.

##### 4.2.2.1 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016f), após preparação das amostras mediante as recomendações prescritas na NBR 6457 (ABNT, 2016a). Foi utilizada energia de compactação normal, com soquete grande e cilindro grande, com 12 golpes por camada, em um total de cinco camadas. Foi escolhida essa energia de compactação pois o objeto deste estudo é avaliar o comportamento dos compósitos, quanto à utilização desses materiais em pavimentos.

Foram obedecidos os procedimentos abordados na norma em que não há reuso de material, sobre amostras preparadas a 5% abaixo da umidade ótima presumível. Foi escolhido o método das amostras 5% abaixo da umidade ótima presumível pois já se tinha certa noção do teor de umidade ótimo do material previamente.

Foram moldados 5 corpos de prova, para que existisse dois pontos do gráfico no ramo seco, um próximo da umidade ótima e dois no ramo úmido na curva de compactação.

A Equação 6 foi utilizada para calcular os valores de massa específica aparente seca:

$$\rho_d = \frac{M_u \times 100}{V(100 + w)} \quad (6)$$

onde:

- $\rho_d$  é a massa específica aparente seca do solo, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );
- $M_u$  é a massa total do solo compactado, expressa em gramas (g);
- $V$  é o volume útil do molde cilíndrico, expresso em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ );
- $w$  é o teor de umidade do solo compactado, expresso em percentagem (%).

Por fim, utilizando coordenadas cartesianas normais, traçou-se a curva de compactação, marcando-se nas abcissas os teores de umidade,  $w$ , e nas ordenadas as massas específicas aparentes secas correspondentes,  $\rho_d$ . A massa específica aparente seca máxima é aquela de valor correspondente à ordenada máxima da curva de compactação, expresso com aproximação de  $0,001 \text{ g}/\text{cm}^3$ .

A Figura 12(a) e (b) mostram, respectivamente, as etapas de compactação das camadas de solo no cilindro, a pesagem do cilindro de compactação, mais o solo compactado e alguns dos cilindros empregados, com amostra já compactada em seu interior.

**Figura 12 – Ensaio de compactação**



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.2.2.2 Índice de Suporte Califórnia

O Índice de Suporte Califórnia, foi determinado por meio dos procedimentos prescritos na NBR 9895 (ABNT, 2016h). Os corpos de prova utilizados foram os mesmos provenientes do ensaio de compactação.

O ensaio ISC consiste em um método para avaliar a resistência do solo à penetração de um cilindro padronizado com relação à penetração em uma brita padrão.

Ambos os ensaios foram realizados com as amostras de solo natural (referência) e com adição de diferentes teores de pó de PET.

Após terminadas as moldagens dos corpos de prova para obter a curva de compactação, os discos espaçadores foram retirados e foi inserido, em cada corpo de prova, o prato perfurado com a haste de expansão e sobre ele dois discos anelares de massa ( $4540 \pm 20$ ) g. Na haste de expansão apoiou-se a haste do relógio comparador, ou deflectômetro, colocado na borda superior do cilindro. Anotou-se a leitura inicial para depois então, imergir os corpos de prova em tanque com água, por quatro dias, sendo que foram anotadas as leituras dos relógios comparadores a cada 24 horas.

A expansão de cada corpo de prova foi determinada por meio da Equação 7.

A Figura 13(a) mostra alguns dos corpos de prova imersos em água já com os relógios comparadores e (b) um dos relógios comparadores indicando a expansão do solo.

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial do relógio comparador (deflectômetro)}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \quad (7)$$



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a determinação da capacidade de suporte do solo, conforme descrito na norma NBR 9895 (ABNT, 2016h), foi colocado no topo de cada corpo de prova, dentro do molde cilíndrico, as mesmas sobrecargas utilizadas no ensaio de expansão. Após isso, o conjunto foi colocado no prato da prensa e procedeu-se a penetração do pistão no solo, por meio da aplicação de uma carga de aproximadamente 45 N, controlada pelo deslocamento do ponteiro do relógio comparador do anel dinamométrico.

Em seguida, os relógios comparadores do anel dinamométrico e do deflectômetro foram zerados. Acionou-se a manivela da prensa com velocidade de 1,27 mm/min. As leituras no relógio comparador do anel e da penetração do pistão no solo foram anotadas, em função do tempo.

Após o ensaio de penetração, a curva de tensão aplicada versus penetração do pistão foi traçada e o Índice de Suporte Califórnia foi calculado, por meio da Equação 8. A Figura 14 mostra a penetração do pistão no solo, por meio da prensa hidráulica.

$$ISC = \frac{\textit{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\textit{pressão - padrão}} \times 100 \quad (8)$$

**Figura 14 – Penetração do pistão nos corpos de prova compactados**



Fonte: Autoria própria (2023).



## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados neste trabalho.

### 5.1 Granulometria

Nesta subseção são apresentados os resultados do ensaio de granulometria enquanto na Tabela 3 são mostrados os resultados do ensaio de peneiramento fino.

**Tabela 3 – Resultados do ensaio de peneiramento fino**

Abertura da malha da peneira (mm)	Massa de material que passou nas peneiras (g)	% de material que passou nas peneiras
1,200	55,51	99,3
0,600	54,89	98,2
0,420	54,04	96,7
0,250	51,78	92,7
0,150	50,04	89,5
0,075	47,60	85,2

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Tabela 4 são mostrados os resultados do ensaio de sedimentação da amostra de solo natural. No Apêndice B é mostrada a curva de calibração do densímetro utilizado neste ensaio.

**Tabela 4 – Resultados do ensaio de sedimentação sem defloculante**

Tempo	Temperatura (°C)	Leitura densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de queda das partículas sólidas (cm)	$\mu$ - viscosidade do fluido (g x s/cm <sup>2</sup> )	Massa específica da água, $\rho_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro equivalente das partículas sólidas, D (mm)	% de partícula com diâmetro equivalente inferior a D
30	23,9	1,033	7,4	9,36	0,9974	0,04596	75,7
60	23,9	1,032	7,4	9,36	0,9974	0,03250	73,5
120	23,9	1,031	7,4	9,36	0,9974	0,02298	71,4
240	23,9	1,030	5,7	9,36	0,9974	0,01426	69,3
480	23,9	1,029	5,7	9,36	0,9974	0,01008	67,2
900	23,9	1,029	5,7	9,36	0,9974	0,00736	66,1
1800	23,9	1,028	5,7	9,36	0,9974	0,00521	64,0
3600	23,9	1,027	5,7	9,36	0,9974	0,00368	62,9
7200	24,0	1,026	5,7	9,34	0,9973	0,00260	61,0
14400	24,1	1,025	5,7	9,32	0,9973	0,00184	58,9
28800	24,2	1,023	5,7	9,30	0,9973	0,00130	54,6
86400	23,9	1,022	5,7	9,36	0,9973	0,00075	52,5

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Tabela 5 pode-se observar os resultados da média do teor de umidade higroscópica da amostra utilizada no ensaio de granulometria e massa específica das partículas sólidas.

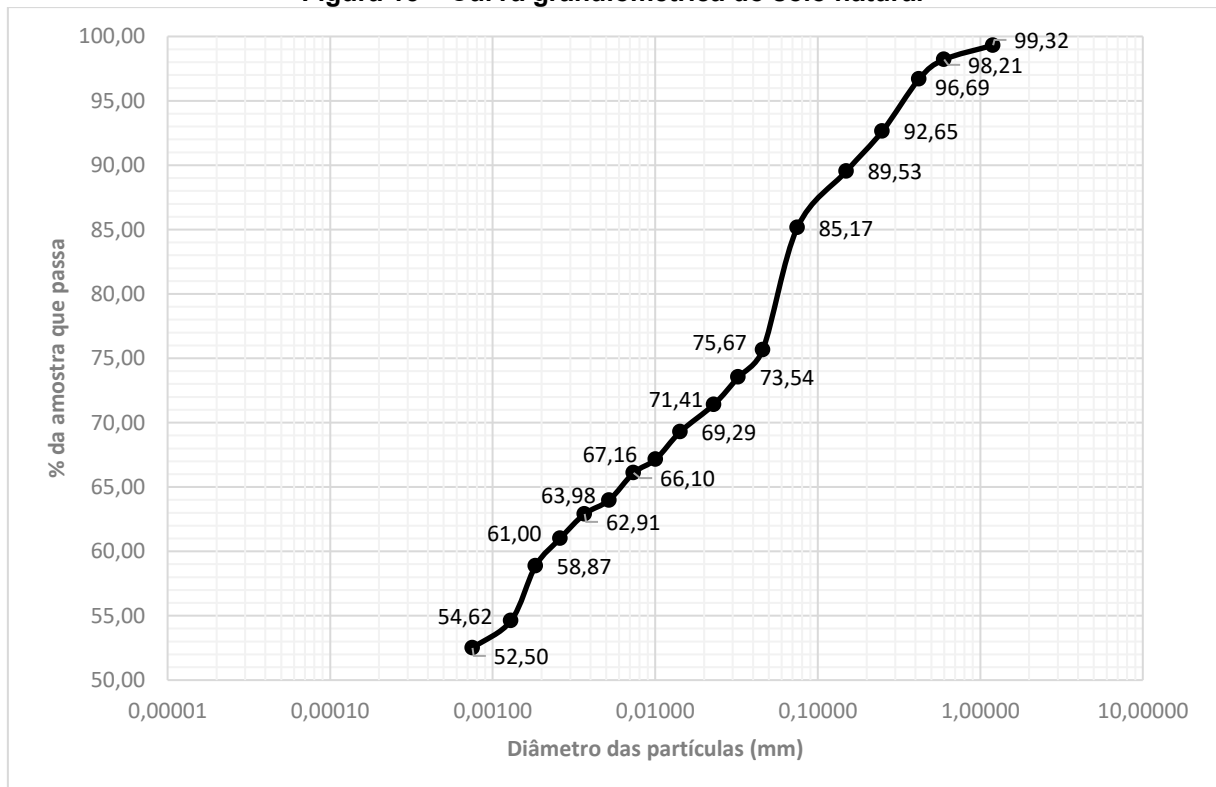
**Tabela 5 – Umidade higroscópica da amostra para ensaio de granulometria e massa específica das partículas sólidas**

Nº da cápsula	Massa da cápsula (g)	Massa da cápsula + solo úmido (g)	Massa cápsula + solo seco (g)	Teor de umidade (%)
37	8,52	17,2	15,66	21,3
41	7,85	18,5	16,65	21,0
42	7,95	15,1	13,84	21,4
<b>MÉDIA</b>				<b>21,2</b>

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 15 mostra a curva granulométrica do solo natural, sem adição de pó de PET.

**Figura 15 – Curva granulométrica do solo natural**



Fonte: Autoria própria (2023).

## 5.2 Limites de Atterberg

Os dados obtidos a partir do ensaio para a determinação do limite de liquidez estão dispostos na Tabela 6.

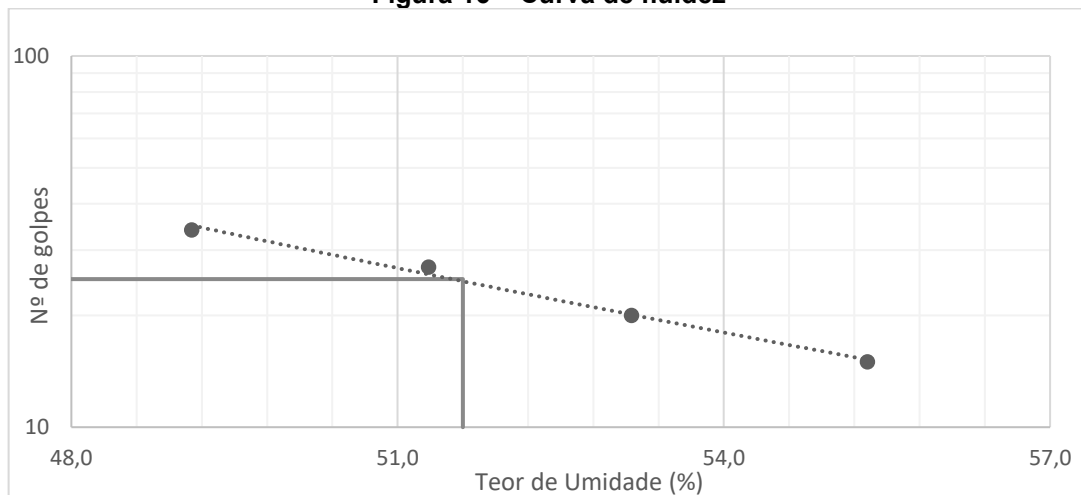
Tabela 6 – Ensaio do limite de liquidez do solo natural

N° da cápsula		16	8	1	11
Massa da cápsula + solo úmido	(g)	25,58	25,71	23,90	21,41
Massa da cápsula + solo seco	(g)	22,01	21,72	20,19	18,55
Massa da cápsula	(g)	14,74	13,94	13,21	13,38
Percentagem de água	(%)	<b>49,1</b>	<b>51,3</b>	<b>53,2</b>	<b>55,3</b>
N° de golpes	-	34	27	20	15

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 16 apresenta a curva de fluidez, obtida a partir de um ajuste aos pontos mostrados. É possível notar que a curva é aproximadamente uma reta. Dessa forma, o teor de umidade referente a 25 golpes é igual a 52%. Esse é o valor do limite de liquidez do solo natural, sem adição alguma de material.

Figura 16 – Curva de fluidez



Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados para limite de plasticidade estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Limite de plasticidade do solo natural

N° da cápsula		3	12	5
Massa da cápsula + solo úmido	(g)	15,04	15,98	15,89
Massa da cápsula + solo seco	(g)	14,64	15,66	15,48
Massa da Cápsula	(g)	13,30	14,61	14,10
Percentagem de água	(%)	<b>29,9</b>	<b>30,5</b>	<b>29,7</b>

Fonte: Autoria própria (2023).

O  $w_P$  para a amostra de solo natural foi determinado por meio da média aritmética das umidades. Indo de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016d), nenhuma amostra foi descartada, visto que nenhuma delas apresentou variação maior que 5% da média calculada. Logo, o  $w_P$  desse solo é igual a 30%, obedecidos os critérios de arredondamento para o próximo inteiro, disposto na norma.

Por meio dos resultados obtidos de  $w_L$  e  $w_P$ , encontrou-se IP de 22%.

Seguindo-se os critérios de classificação AASHTO, determinou-se o grupo do solo, por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação, com os demais parâmetros encontrados e classificou-o como um solo um A-7-5(16), ou seja, um solo argiloso, de comportamento como subleito considerado de sofrível a mau. Embora a classificação aponte que o solo teria comportamento inadequado, se empregado como camada de subleito, vale ressaltar que é possível que esse material apresente comportamento satisfatório em pavimentação, já que o sistema AASHTO não foi idealizado levando-se em consideração as peculiaridades dos solos tropicais.

A classificação obtida já era esperada, visto que Batelo (2019) identificou resultados parecidos para o solo pesquisado, também proveniente de Campo Mourão. Em média, suas amostras de solo apresentaram valores de  $w_L$  entre 53% e 58% e de  $w_P$  entre 28% e 29%.

### 5.3 Massa específica das partículas sólidas

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos após ensaio de determinação da massa específica das partículas sólidas que constituem o solo.

A curva de calibração do picnômetro é apresentada no Apêndice A.

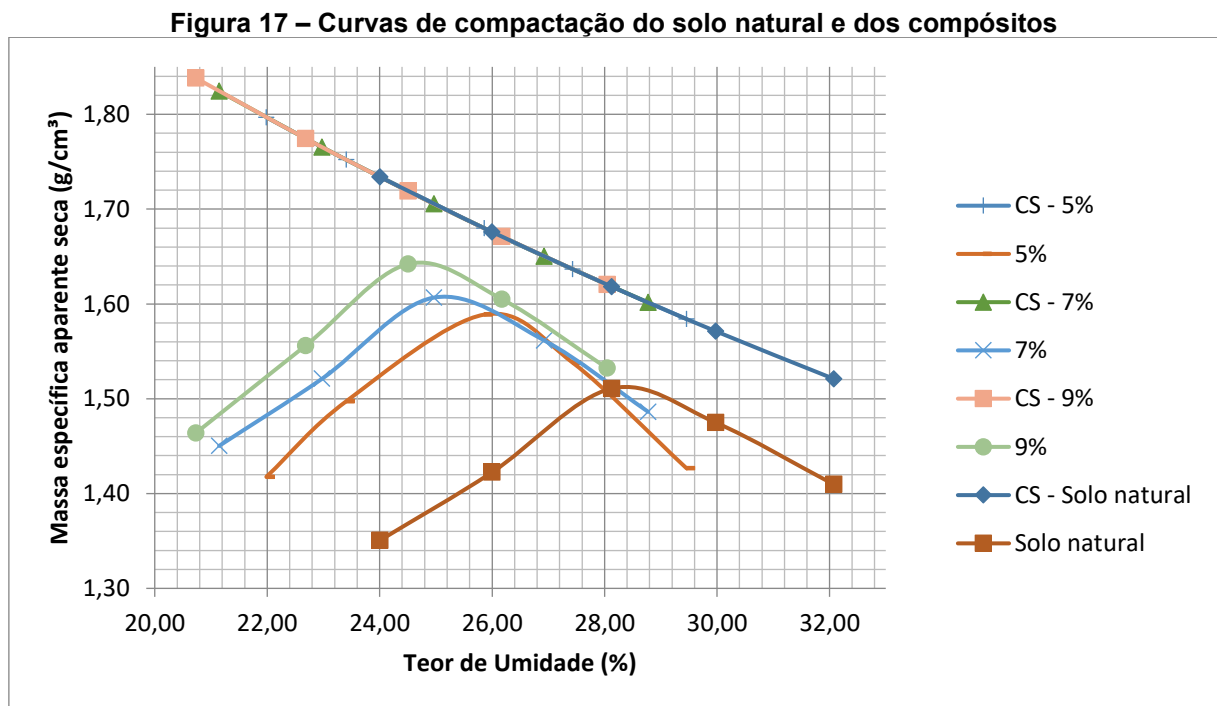
**Tabela 8 – Massa específica das partículas sólidas ( $\rho_s$ )**

	Ensaio 1	Ensaio 2
M <sub>1</sub> (g)	54,6	52,7
M <sub>2</sub> (g)	698,03	697,05
M <sub>3</sub> (g)	668,14	668,14
T (°C)	23,9	23,9
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) =	2,96	2,98
Média (g/cm <sup>3</sup> )	2,97	

**Fonte: Autoria própria (2023).**

## 5.4 Compactação

Utilizando o método de compactação Proctor Normal, a Figura 17 apresenta as curvas de compactação e as curvas de saturação do solo natural e dos compósitos.



Fonte: Autoria própria (2023).

De acordo com a Figura 17 percebe-se que o solo natural atingiu massa específica aparente seca máxima de aproximadamente  $1,52 \text{ g/cm}^3$  e umidade ótima de 28%. Na medida em que o pó de PET foi adicionado ao solo natural, a massa e o volume de sólidos aumentaram. Tais aumentos observados são, aproximadamente, da mesma ordem de grandeza dos percentuais de pó de PET adicionados (6,0%, 7,2% e 9,6%).

Ainda, à medida que é adicionado maior volume de pó de PET ao solo natural, a massa específica aparente seca máxima aumenta, enquanto o teor de umidade ótimo diminui. Para o teor com 5% de pó de PET, foi constatado aumento de 5,3% da massa específica aparente seca máxima e decréscimo de 7,8% da umidade ótima em relação ao solo natural. Para o teor de 7%, notou-se acréscimo de aproximadamente 6,6% na massa específica aparente seca máxima, enquanto houve diminuição de 11,0% do teor de umidade ótimo. Já para o compósito com 9%

de teor de pó de PET, houve aumento de 8,6% da massa específica aparente seca máxima e diminuição de 12,8% da umidade ótima.

O aumento da massa de sólidos, mantendo-se constante o volume de solo compactado, explica o aumento da massa específica aparente seca. Destaca-se também que a interação físico-química entre os sólidos proporcionou o aumento da massa de sólidos.

Levando-se em consideração que o pó de PET tem, em sua grande maioria, partículas menores do que as partículas que constituem o solo natural, pode-se supor que, à medida que foram adicionados teores de plástico ao solo, o pó ocupou parte dos espaços vazios que antes poderiam estar ocupados pela água ou pelo ar ocluso. Dessa forma, já que o pó de PET tem massa específica maior do que a da água, a mistura solo-pó de PET terá sua massa específica aparente seca máxima aumentada. Vale ressaltar ainda que o solo natural estava agregado, já que não foi empregado defloculante nos ensaios.

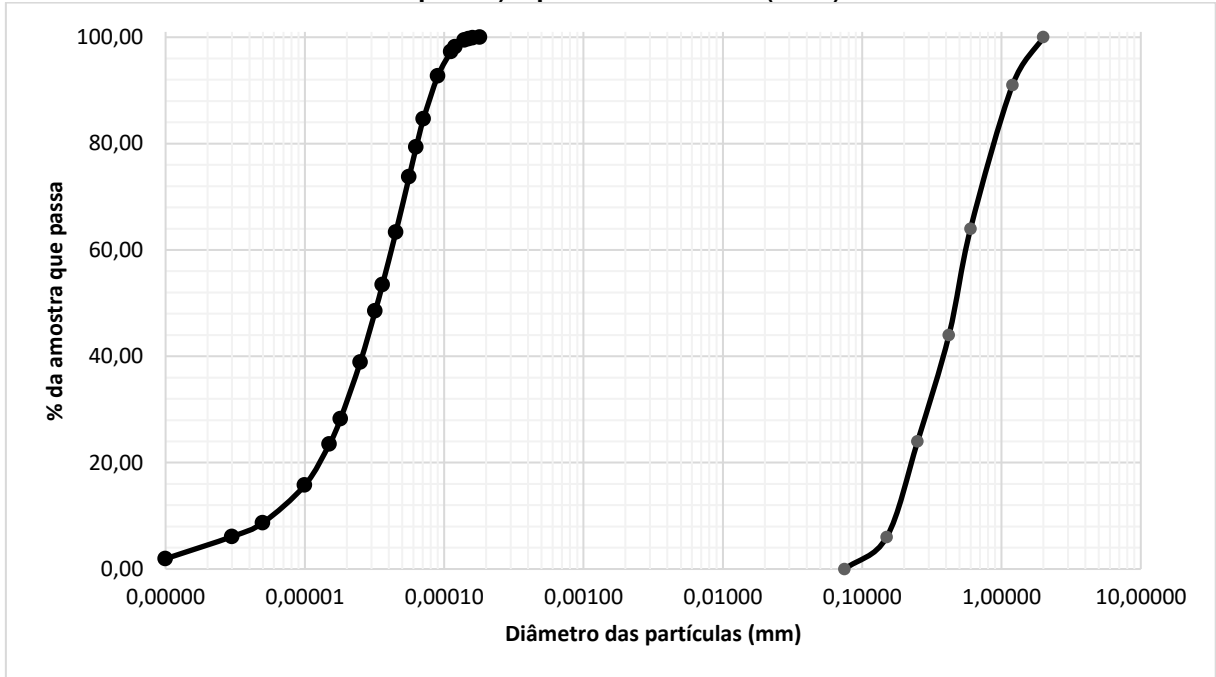
Em outras palavras, acredita-se que devido ao pó de PET possuir partículas de dimensões micrométricas e ter características hidrofóbicas, houve a diminuição do volume de vazios na amostra moldada, o que diminuiu a interação dos compósitos com a água, o que explica a redução do teor de umidade ótimo.

As diferenças em relação aos resultados obtidos por Thomas *et al.* (2019) são notáveis. Em seu trabalho, a adição de pó de PET diminuiu a massa específica em relação ao solo natural, enquanto houve aumento do teor de umidade ótimo. Acredita-se que essas divergências ocorreram pelo fato de o pó de PET utilizado em cada trabalho, serem demasiado diferentes.

Pode-se tomar como exemplo a curva granulométrica do pó de PET utilizado em ambos os trabalhos. Enquanto a dimensão das partículas empregadas neste trabalho variou de 0,01  $\mu\text{m}$  a 0,11  $\mu\text{m}$ , no trabalho de Thomas *et al.* (2019), variou de 0,075 mm a 1,1 mm.

A Figura 18 mostra o comparativo da curva granulométrica do pó de PET utilizado por Thomas *et al.* (2019) e do pó de PET utilizado neste trabalho.

**Figura 18 – Curvas granulométricas dos pós de PET utilizados neste trabalho (a da esquerda) e por Thomas et al. (2019)**

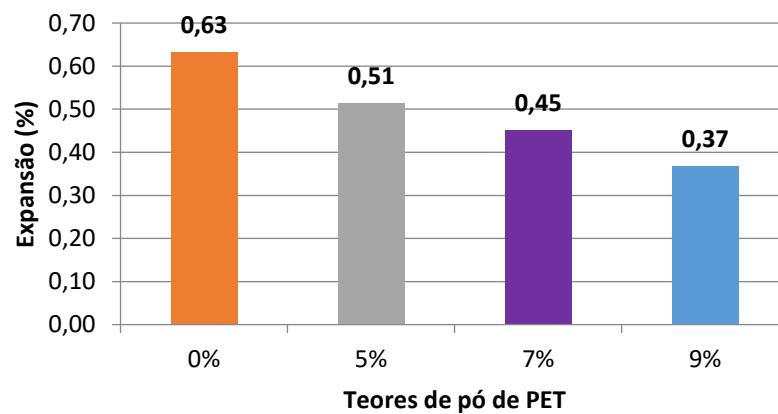


Fonte: Autoria própria (2023).

## 5.5 Índice de Suporte Califórnia

Os resultados da expansão do solo natural e dos compósitos são apresentados na Figura 19.

**Figura 19 – Expansão dos corpos de prova**

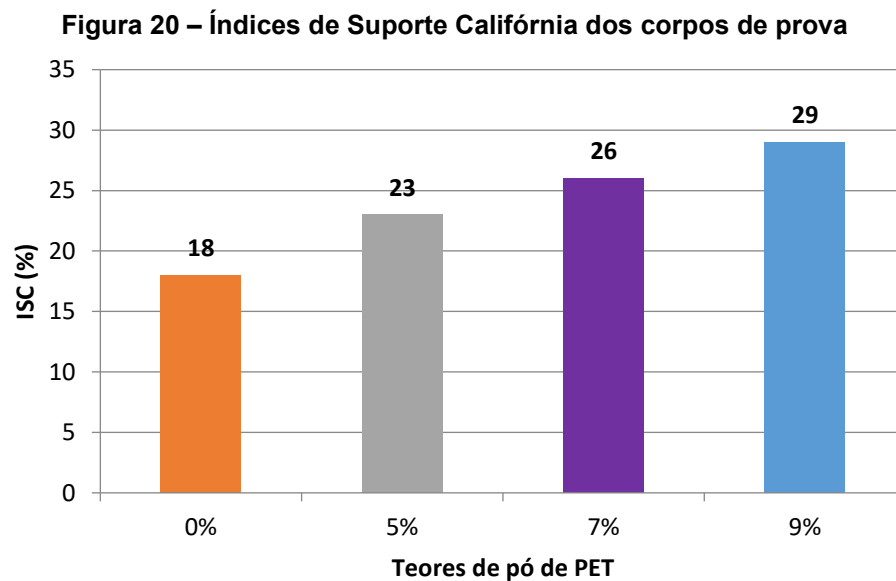


Fonte: Autoria própria (2023).

Em análise dos resultados obtidos, percebe-se que à medida que se aumentou o teor de pó de PET ao solo, a expansão diminuiu. Houve diminuição de 19,0%, 28,6% e 41,3% para as misturas com 5%, 7% e 9% de pó de PET, respectivamente, em relação à expansão do solo natural. Isso se deve provavelmente à maior resistência do compósito. O ganho de massa específica apontado no ensaio de compactação significa também diminuição dos vazios agora parte ocupados por pó de PET. Isso acarreta possivelmente em uma maior estabilidade das cargas elétricas entre solo e PET e maior contato interagregado que faz com que os espaços vazios sejam menores, dificultando a absorção de água do compósito e conseqüentemente diminuindo sua expansibilidade.

### 5.5.1 Penetração

Na Figura 20, são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de ISC para a amostra de solo natural e com adição de diferentes teores de pó de PET.



Fonte: Autoria própria (2023).

Em função dos resultados obtidos, pode-se perceber que houve um aumento de 27,8% na resistência à penetração do pistão do compósito com 5% de teor de pó de PET em relação à amostra pura. Já na amostra com 7%, houve acréscimo de, aproximadamente, 44,4% quando comparada à amostra de solo natural e na amostra com 9% de pó de PET, houve um ganho de 61,1% na resistência.



Esses ganhos de resistência já eram esperados em virtude dos resultados do ensaio de compactação, visto que à medida que se aumentou a quantidade do material pó de PET ao solo, a massa específica aparente seca também aumentou. Ou seja, o compósito ganhou menos água e diminuiu sua perda de capacidade de suporte em virtude da saturação, aumentando conseqüentemente sua resistência.

Analisados os resultados de ISC de acordo com a sua aplicação em camada final de aterros de pavimentos rodoviários (subleito ou reforço de subleito), verificou-se que a norma ES-138 (DNIT, 2010b) estabelece critérios, em termos de valores de ISC e expansão da amostra, para a utilização de solos como reforço de subleito. Para camada de subleito, é exigido  $ISC \geq 6,0\%$  e  $expansão \leq 2,0\%$ . Além disso, a mesma norma estabelece que os materiais constituintes da camada de reforço devem ser de qualidade superior ao do subleito, assim como possuir maior capacidade de suporte.

## 6 CONCLUSÕES

Com o término do presente trabalho, que avaliou o desempenho de um solo argiloso com adição de pó de PET, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- com relação à classificação do solo, tanto os limites de Atterberg quanto a granulometria estão de acordo com a faixa de variação disponível na literatura correlata aos solos residuais de basalto, de  $w_L$  entre 45 e 70,  $w_P$  na faixa entre 25 e 40 e granulometria com % passante na peneira n° 200 maior que 50%;
- no que diz respeito ao ensaio de compactação, os resultados mostraram que a adição de pó de PET atua diretamente nos valores de massa específica e umidade ótima do material. Os resultados apontaram que a adição de diferentes teores de pó de PET aumentou, significativamente, os valores de massa específica aparente seca máxima enquanto diminuiu o teor de umidade ótimo. O aumento da massa específica aparente seca do solo pode ser explicado, pois, embora as partículas de pó de PET possuam massa específica menor que as dos grãos do solo, o plástico possui partículas menores que a do solo, podendo preencher os vazios;
- no ensaio de Índice de Suporte Califórnia, a inserção de pó de PET aumentou, consideravelmente, a capacidade de suporte do solo e diminuiu a expansibilidade. O ganho de massa específica aparente seca obtido no ensaio de compactação significou diminuição do índice de vazios, acarretando menor nível de saturação da amostra em decorrência da menor concentração de água nos vazios, diminuindo sua expansibilidade. Conclui-se dessa forma, que o compósito diminuiu sua perda de capacidade de suporte em virtude da saturação, aumentando conseqüentemente sua resistência;
- em face dos resultados obtidos e, de acordo com a norma ES-138 (DNIT, 2010b), pode-se afirmar que o material obtido da mistura do solo natural com pó de PET pode ser utilizado como reforço do subleito, já que todas as amostras mostraram capacidade de suporte superior ao solo natural assim como expansão menor que 1,0%;
- como sugestão, outros trabalhos como esse podem ser desenvolvidos, com teores de pó de PET diferentes, ou com uma maior quantidade de ensaios,

com o objetivo de conhecer melhor o compósito formado a partir da mistura do solo mais pó de PET.

## REFERÊNCIAS

- ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET. **12º Censo da Reciclagem de PET no Brasil**, 2022. Disponível em: [https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico\\_12\\_Censo\\_da\\_Reciclagem\\_no\\_Brasil-Novembro\\_2022.pdf](https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico_12_Censo_da_Reciclagem_no_Brasil-Novembro_2022.pdf). Acesso em: 13 mai. 2023.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2023/>. Acesso em: 13 mai. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12752**: execução de reforço do subleito de uma via - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016f.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9604**: abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016g.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9895**: solo: índice de suporte califórnia - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016h.
- BALBO, J.T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BATELO, L.C.E. **Estudo das características físicas de um solo de Campo Mourão por meio de ensaios de laboratório**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

BATISTA, C.F.N. **Ensaio fundamentais para a pavimentação e dimensionamentos dos pavimentos flexíveis**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1976.

BERNUCCI, L.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiro**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.

BRITO, L.C.; PARANHOS, H.S. **Estabilização de solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, setembro de 2017. ISSN:2448-0959.

CHOUDHARY, A. K.; JHA, J. N.; GILL, K. S. Utilization of Plastic Wastes for Improving the Sub-Grades in Flexible Pavements. **Proceedings of the GeoShanghai International Conference**. p. 320-326, maio 2010.

DAS, B.M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 – ES: pavimentos flexíveis - concreto asfáltico - especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 137/2010 – ES: pavimentação – regularização do subleito - especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2010a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 138/2010 – ES: pavimentação – reforço do subleito - especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2010b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010 – ES: pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente - especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2010c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2022 – ES: pavimentação – base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT/Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

FERREIRA, M.M. **Caracterização física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

GUITARRARA, P. "Desenvolvimento sustentável"; **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/desenvolvimento-sustentavel.htm>. Acesso em: 13 mai. 2022.

HADDAD, E. **Riscos associados aos produtos perigosos**. Revista saúde, 2013. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/documento\\_referencia\\_programa\\_nacional\\_seguranca.pdf](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/documento_referencia_programa_nacional_seguranca.pdf). Acesso em: 22 mar. 2021.

LASTRAN, C. **Concessão de rodovias no Rio Grande do Sul**. Rio Grande do Sul: Relatório Interno, 1998.

LITTLE, D. N. Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Dubuque, Iowa: Kendall/Hunt Publishing Company, 1995. 244 p. ISBN 0840396325.

MACCAFERRI DO BRASIL. **Reforço de solos**: Manual técnico. Maccaferri, 2009. 168 p. Disponível em: [https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/maccaferri/manual\\_tecnico\\_reforco\\_de\\_solos.pdf](https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/maccaferri/manual_tecnico_reforco_de_solos.pdf). Acesso em: 10 jul. 2023.

MANJUNATH, K. R.; VENUGOPAL, G.; RUDRESH, A. N. Effect Of Random Inclusion Of Sisal Fibre On Strength Behavior Of Black Cotton Soil. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, [s. l.], v. 2, p. 2227-2232, jul. 2023.

MANO, E.B.; MENDES, L.C. **Introdução aos polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1987.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

MELO, J.W. **Produção e caracterização de pó de PET, obtido a partir de garrafas pós-consumo**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

METHA, P.K. Reducing the environment impact of concrete: concrete can be durable and environmentally friendly. **Concrete International**, Vol.10, p. 61-66, out. 2001. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=10735>. Acesso em 10 de jul. de 2023.

MURRIETA, P. **Mecânica dos solos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788595156074/>. Acesso em: 08 ago. 2021.

OLIVEIRA, J.C. **Caracterização geotécnica de materiais inconsolidados arenosos do Distrito Federal utilizados como material de construção**. 2000.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

ONYELOWE, K.C.; OKAFOR, F.O. A comparative review of soil modification methods. **ARPJ Journal of Earth Sciences**, v.1, n.2, p.36-41, nov. 2012.

PALMEIRA, E.M. **The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests**. 1987. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Oxford, Oxford, 1987.

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

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

PORTER, O.J. Development of the original method for highway design: development of CBR flexible pavement design method for airfields, **American Society of Civil Engineers**, New York, v. 115, p. 461-467, 1950.

Recicla Latas. **Fechando o ciclo da reciclagem para a embalagem mais sustentável do planeta**, 2021. Disponível em: <https://reciclalatas.com.br/>. Acesso em: 13 mai. 2023.

REVISTA PLÁSTICO INDUSTRIAL, Notícias, Aranda Editora, ed. Nº 53, pp 14, janeiro de 2003, São Paulo.

SANTOS, G. B. D.; SILVEIRA, M. R.; GARCIA, R. R.; GIACOMETTI, W. B. Avaliação da Influência do Teor de Fibras de Polietileno Tereftalato nos Parâmetros Ótimos de Compactação de um Solo Arenoso. **VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019)**, São Carlos, São Paulo, p. 405-410, 2019.

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. Orientador: Khosrow Ghavami. 2012. 15 f. Relatório Final de Iniciação Científica (Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, jul. 2012.

SOLIZ, V.V.P. **Estudo dos três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, J. V. B.; COSTA, W. G. S. Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno Provenientes de Copos Descartáveis. **VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019)**, São Carlos, São Paulo, p. 225-230, ago. 2019.

TERZAGHI, K; PECK, R.B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia**. Rio de Janeiro: SEDEGRA, 1962.

THOMAS, M.; HARTMANN, D.A; KOSTESKI, L.E; GARCIA, A.P. Análise da influência da adição de resíduos de PET em floco e em pó na curva de compactação

de um solo argiloso. **VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019)**, São Carlos, São Paulo, p. 427-434, ago. 2019.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. Ed. McGraw - Hill do Brasil LTDA, São Paulo, SP, 1978. 509p.

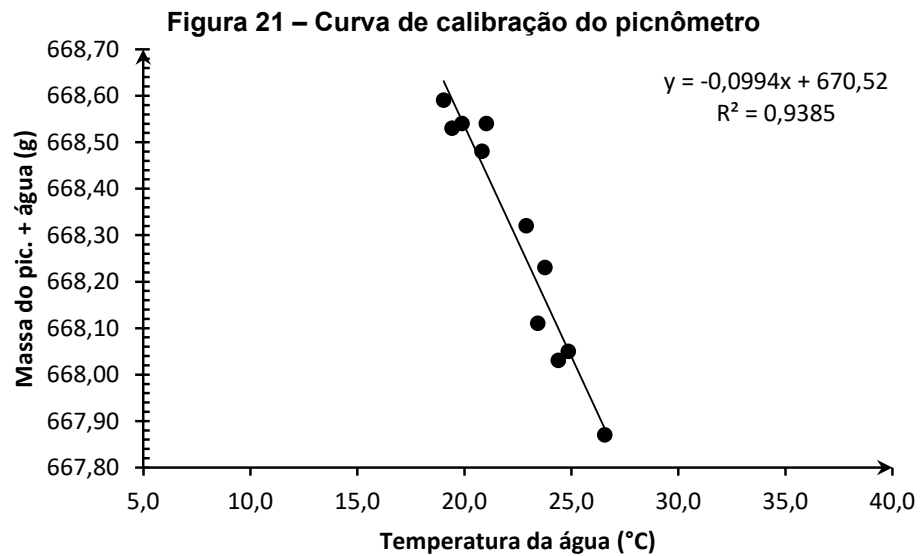
VILLIBOR, D.F. **Estabilização granulométrica ou mecânica?**. São Carlos: Gráfica da EESC/USP, 1982.

VIZCARRA, G.O.C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.



## APÊNDICE A – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

Neste Apêndice está contemplada a curva de calibração do picnômetro utilizado no ensaio de massa específica das partículas sólidas, representado na Figura 21.

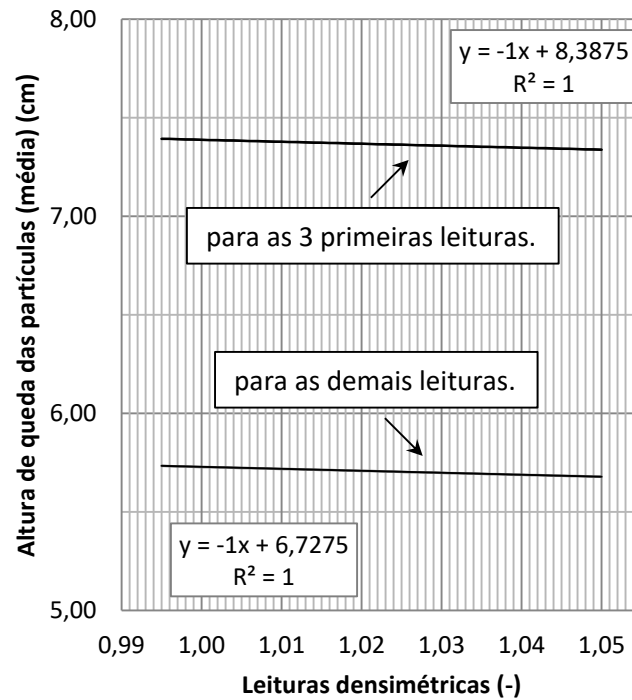


Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR-CM (2023).

## APÊNDICE B – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO

Neste Apêndice é mostrada a curva de calibração do densímetro utilizado no ensaio de sedimentação, representado na Figura 22.

Figura 22 – Curva de calibração do densímetro



Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR-CM (2023).