

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**THAIS MOREIRA DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE SOLO REFORÇADO COM FIBRA DE PET E  
RCD EM OBRAS DE ATERROS SANITÁRIOS**

**FLORIANÓPOLIS, 2022.**



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**THAIS MOREIRA DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE SOLO REFORÇADO COM FIBRA DE PET E  
RCD EM OBRAS DE ATERROS SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira

Orientadora:  
Profa. Fernanda Simoni Schuch, Dra.

**FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2022**



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Santos, Thais

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE SOLO REFORÇADO COM FIBRA DE PET E RCD EM OBRAS DE ATERROS SANITÁRIOS** / Thais Santos; orientação de Fernanda Simoni Schuch. - Florianópolis, SC, 2022.

97 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.  
Inclui Referências.

1. Aterro sanitário. 2. PET. 3. RCD. 4. Solo melhorado.  
I. Simoni Schuch, Fernanda. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. **ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE SOLO REFORÇADO COM FIBRA DE PET E RCD EM OBRAS DE ATERROS SANITÁRIOS.**




**FLORIANÓPOLIS, 2022**  
**ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE SOLO REFORÇADO COM FIBRA DE PET E**  
**RCD EM OBRAS DE ATERROS SANITÁRIOS**

**THAIS MOREIRA DOS SANTOS**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em engenharia civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.


Florianópolis, 25 de Julho, 2022.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 FERNANDA SIMONI SCHUCH  
Data: 29/08/2022 14:57:19-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>


---

Fernanda Simoni Schuch, Doutora

Documento assinado digitalmente  
 FABIO KRUEGER DA SILVA  
Data: 12/09/2022 15:01:49-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Fábio Krueger da Silva, Doutor

Documento assinado digitalmente  
 ELIVETE CARMEN CLEMENTE PRIM  
Data: 29/08/2022 20:24:34-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Elivete Carmen Clemente Prim, Doutora



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e proteger até aqui. A minha família pelo apoio, dedicação e confiança, principalmente ao meu pai Gilson e minha mãe Mônica por toda educação, incentivo, dedicação e compreensão, além de seus ensinamentos e conselhos, a minha irmã Emanuely pelo companheirismo, brincadeiras, amizade e principalmente por não me deixar esquecer de onde vim, sem vocês eu não chegaria até aqui, e agradeço mais ainda por serem presentes em tudo apesar da distância.

A cada amigo que fiz durante esses anos de faculdade, aos que passei e aos que estão comigo até hoje, guardo comigo a contribuição de cada um para a minha vida acadêmica e pessoal.

A professora Fernanda Simoni Schuch pelos conhecimentos passados e pelos auxílios durante as bolsas de pesquisa e principalmente durante a orientação deste trabalho, sempre buscando o melhor e com muita dedicação, que me fizeram desenvolver uma grande admiração por ela.

A todos os professores e colaboradores do IFSC por todo suporte durante esse processo, disponibilização do laboratório de solos e de todos os equipamentos necessários.



## RESUMO

Considerando o cenário atual da alta produção de garrafas PET e também a grande geração de resíduos da construção civil, ambos muitas vezes sem uma destinação adequada, acabam sendo descartados de forma imprudente, poluindo o meio ambiente e alterando a qualidade de vida das pessoas. Pensando nisso este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade da adição desses materiais ao solo para a construção de aterros sanitários, realizando ensaios de caracterização, sendo massa específica dos grãos, granulometria e limites de atterberg, compactação, permeabilidade, PH, resistência a compressão uniaxial e resistência a compressão diametral. Os ensaios serão realizados para 4 composições, solo puro, solo mais 1,0% de fibra de PET, solo mais 15,0% de RCD e solo mais 1,0% de fibra de PET mais 15,0% de RCD. Analisando as características agregadas a partir da adição de fibra de PET e RCD concluiu-se que o uso das misturas estudadas em camada de aterros sanitários de pequeno porte, considerando boa resistência a tração e compressão, sendo até 3 vezes maiores quando comparadas com solo puro. Quanto à permeabilidade, apenas a mistura solo + RCD apresentou um coeficiente que se adequa as normas para ser usado como camada intermediária em aterro de pequeno porte, sendo o coeficiente permeabilidade na casa de  $10^{-6}$  cm/s.

**Palavras-chave:** Aterro sanitário; PET; RCD; Solo melhorado.



## ABSTRACT

Considering the current scenario of high production of PET bottles and also the large generation of construction waste, both often without an adequate destination, end up being discarded recklessly, polluting the environment and changing people's quality of life. With this in mind, this study aims to research the feasibility of adding these materials to the soil for the construction of sanitary landfills, performing characterization tests, being specific gravity of the grains, granulometry and atterberg limits, compaction, permeability, PH, uniaxial compression strength and resistance to diametric compression. The tests will be carried out for 4 compositions, pure soil, soil plus 1.0% PET fiber, soil plus 15.0% RCD and soil plus 1.0% PET fiber plus 15.0% RCD. Analyzing the aggregate characteristics from the addition of PET fiber and RCD, it was concluded that the use of the mixtures studied in a layer of small sanitary landfills, considering good tensile and compressive strength, being up to 3 times higher when compared to pure soil. As for permeability, only the soil plus RCD presented a coefficient that fits the norms to be used as an intermediate layer in small landfills, with the permeability coefficient around  $10^{-6}$  cm/s.

**Keywords:** Landfill; PET; RCD; Improved soil.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Representação da migração do percolado .....	30
Figura 02 - Elementos de contenção de um aterro de resíduos. ....	33
Figura 03 - Coeficientes de permeabilidade para aterros sanitários .....	34
Figura 04 - Curvas de compactação.....	36
Figura 05 - Decréscimo da massa específica aparente seca com a adição de fibra de PET. ....	36
Figura 06 - Variação da umidade ótima com a adição de fibra de PET. ....	37
Figura 07 - Tensão normalizada e deslocamento vertical para as amostras de solo natural, solo + fibras lisas e solo + fibras escarificadas. ....	37
Figura 08 - Curvas de compactação .....	38
Figura 09 - Curvas de compactação .....	39
Figura 10 - Organograma do método da pesquisa.....	40
Figura 11 - Local da coleta do solo.....	41
Figura 12 - Talude estudado.....	42
Figura 13 - Planos estruturais da rocha de granito em solo .....	42
Figura 14 - Fibra de PET.....	43
Figura 15 - Localização do ponto de coleta do RCD. ....	44
Figura 16 - Local do recorte da alvenaria.....	45
Figura 17 - Resíduos do recorte de alvenaria.....	45
Figura 18 - Moagem do RCD.....	46
Figura 19 – Resultado da moagem do RCD .....	46
Figura 20 - Aparelho de dispersão.....	50
Figura 21 - Picnômetro.....	50
Figura 22 - Peneiras utilizadas.....	52
Figura 23 - Ensaio de sedimentação .....	52

Figura 24 - Aparelho para determinação do limite de liquidez. ....	53
Figura 25 - Cinzel. ....	54
Figura 26 - Concha com o material.....	54
Figura 27 - Material com ranhura.....	54
Figura 28 - Lados da ranhura levemente em contato .....	55
Figura 29 - Rolinho de acordo com o gabarito .....	56
Figura 30 - Gráfico de Plasticidade de Casagrande .....	57
Figura 31 - Ensaio de compactação.....	58
Figura 32 - Permeâmetro com o corpo de prova posicionado .....	59
Figura 33 - Esquema de montagem do ensaio – Método B .....	60
Figura 34 – Corpo de prova posicionado no permeâmetro envolto com bentonita.....	61
Figura 35 – Conjunto bureta e permeâmetro montados para o ensaio .....	61
Figura 36 – Peagômetro digital.....	63
Figura 37 – Amostra com o peagômetro aferindo o PH. ....	64
Figura 38 - Cilindro de Harvard e tarugo.....	65
Figura 39 – Corpo de prova posicionado na prensa .....	65
Figura 40 – Portico de Lottman .....	67
Figura 41 – Corpo de prova posicionado na prensa .....	68
Figura 42 – Curva granulométrica do solo puro .....	71
Figura 43 – Limites de liquidez dos materiais ensaiados .....	72
Figura 44 – Curvas de compactação do solo puro e das misturas. ....	75
Figura 45 – Escala de PH.....	80
Figura 46 – Gráfico de compressão uniaxial de S. ....	80
Figura 47 – Gráfico de compressão uniaxial de S+PET. ....	81
Figura 48 – Gráfico de compressão uniaxial da mistura S+RCD.....	83

Figura 49 – Gráfico de compressão uniaxial da mistura S+PET+RCD .....83



## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Ângulo de atrito e coesão.....	39
Quadro 02 - Classificação do RCD de acordo com o CONAMA.....	44
Quadro 03 - Resultados de outros autores. ....	48
Quadro 04 - Misturas estudadas. ....	49
Quadro 05 – Ensaio de caracterização.....	57
Quadro 06 – Número de corpos de prova realizados por ensaio .....	68
Quadro 07 – Valores finais de massa específica dos grãos. ....	69
Quadro 08 – Dados do ensaio do limite de liquidez do solo puro e do solo + RCD....	72
Quadro 09 – Umidade a 25 golpes do solo puro e do solo + RCD.....	72
Quadro 10 – Umidade de cada amostra de solo puro.....	73
Quadro 11 – Resultado final do ensaio de limite de plasticidade .....	73
Quadro 12 – Índices de plasticidade do solo puro e do solo + RCD.....	74
Quadro 13 – Dados obtidos a partir dos ensaios de compactação.....	75
Quadro 14 – Dados de umidade ótima e densidade seca do solo puro e das misturas.....	76
Quadro 15 – Dados de volume e variação de tempo das composições .....	77
Quadro 16 – Valor de coeficiente de permeabilidade do solo puro, solo com adição de RCD e solo com adição de fibra de PET e RCD.....	78
Quadro 17 – Classificação de permeabilidade.....	78
Quadro 18 – Dados de permeabilidade comparando com a norma e outros autores .....	79
Quadro 19: PH dos teores analisados na pesquisa.....	79
Quadro 20: Tensão de compressão de S.....	81
Quadro 21: Controle de qualidade dos CP's da mistura S.....	81
Quadro 22: Tensão de compressão média de S + PET.....	82
Quadro 23: Controle de qualidade de S + PET.....	82
Quadro 24: Tensão de compressão média de S + RCD.....	83

Quadro 25: Controle de qualidade de S + RCD.....	83
Quadro 26: Tensão de compressão média de S + PET + RCD.....	85
Quadro 27: Controle de qualidade de S + PET + RCD.....	85
Quadro 28: Representação dos dados de resistênica à compressão (qu) e resistência ao cisalhamento (su) das composições.....	86
Quadro 29: Porcentagem de alteração das misturas em relação ao solo puro.....	87
Quadro 30: Resultados da resistência à tração e porcentagem de alteração das misturas e relação ao S.....	88
Quadro 31: Controle de qualidade dos CP's do ensaio de compressão diametral.....	89
Quadro 32: Relação entre compressão uniaxial (qu) e compressão diametral (qt).....	89
Quadro 33: Dados comparativos de resistência.....	90

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 01 - Percentagem de solo retido em cada peneira.....	70
Tabela 02 - Porcentagem de cada tipo de grão presente no solo.....	71



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET - politereftalato de etila

Abiplast – Associação brasileira da indústria do plástico

RCD – Resíduo da construção civil

IPEA – Instituto de pesquisa econômica aplicada

RSU – Resíduo sólido urbano

NBR – Norma brasileira

SPT - Standart Penetration Test

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

IP - Índice de plasticidade;

LL - Limite de liquidez;

LP - Limite de plasticidade.

S – Solo puro

S + PET – Solo com adição de fibra de PET

S + RCD - Solo com adição de RCD

S + PET + RCD – Solo com adição de fibra de PET e RCD

LSTM – Laboratório de solos e tecnologia dos materiais

CP – Corpo de prova



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
1.1	Justificativa .....	29
1.2	Objetivo geral.....	30
1.3	Objetivos específicos.....	31
1.4	Estrutura do trabalho.....	31
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEORICA</b> .....	<b>32</b>
2.1	Aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos .....	32
2.1.1	Propriedades geotécnicas para executar aterros sanitários .....	33
2.2	Solo melhorado.....	35
2.2.1	Solo compactado melhorado com PET .....	35
2.2.2	Solo compactado melhorado com RCD.....	38
<b>3</b>	<b>MÉTODO DA PESQUISA</b> .....	<b>40</b>
3.1	Materiais .....	41
3.1.1	Solo .....	41
3.1.2	Fibras de PET.....	43
3.1.3	Resíduo da construção civil.....	43
3.2	Programa experimental .....	47
3.2.1	Composição da mistura .....	47
3.2.2	Ensaio de caracterização.....	49
3.2.2.1	<i>Massa específica dos grãos</i> .....	49
3.2.2.2	<i>Granulometria</i> .....	51
3.2.2.3	<i>Limites de Atterberg</i> .....	53
3.2.3	Compactação.....	57
3.2.4	Permeabilidade.....	59
3.2.5	Determinação do PH .....	63
3.2.6	Resistência a compressão uniaxial não confinada .....	64
3.2.7	Resistência a compressão diametral .....	67
3.3	Análise dos resultados.....	69
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>69</b>
4.1	Ensaio de caracterização .....	69
4.1.1	Massa específica dos grãos.....	69
4.1.2	Granulometria do solo .....	70
4.1.3	Limite de liquidez.....	71
4.1.4	Limite de plasticidade.....	73
4.1.5	Índice de plasticidade.....	74
4.2	Compactação .....	74
4.3	Permeabilidade .....	77
4.4	PH.....	79

<b>4.5</b>	<b>Resistência a compressão uniaxial.....</b>	<b>80</b>
<b>4.6</b>	<b>Resistência a tração por compressão diametral .....</b>	<b>86</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>





## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescente uso e produção de garrafas PET (politereftalato de etila) pensa-se muito na reciclagem e reutilização desse material, sendo ele um material de lenta degradação no ambiente. Isso também se aplica para os resíduos da construção e demolição (RCD), que são gerados em grande escala em todo o mundo e tem uma destinação inadequada, é necessário que seja estudado um meio de amenizar os impactos desses materiais e uma destinação adequada. Esse trabalho vai analisar a viabilidade de incluir esses materiais ao solo de aterros sanitários.

Segundo Valt (2004) as embalagens de PET contribuem mais para a degradação do meio ambiente, comparando com embalagens de metal e vidro, e também a reciclagem desses materiais diminui o consumo de matéria-prima, energia e emissão de resíduos. De acordo com a associação brasileira da indústria do plástico (abiplast, 2020), em 2018 foram produzidas 757,6 mil toneladas de plástico no Brasil, já em 2019 esse número passou a ser 838,5 mil toneladas, sendo reciclado apenas 24% de todo o plástico produzido.

Na construção civil se pesquisa diversas áreas para a implantação, em forma de reciclagem, das garrafas de PET, Canellas e D'Abreu (2005) estudaram a substituição de areia por flocos de PET nas argamassas usadas na construção civil e observaram que a argamassa mantém suas características de plasticidade e resistência a compressão, substituindo 30% de areia pelos flocos de PET. Cândido et al (2014) avaliaram que é possível substituir 15% da areia natural, em blocos de concreto de vedação, por PET triturado, essa porcentagem resultou em uma maior resistência a compressão e uma menor absorção, em relação aos teores de 30% e 45%, que também foram testados. De acordo com Costa et al (2019) a resistência mecânica de um solo areno-argiloso com adição de 2% de PET triturado tem um aumento significativo e a expansão reduziu.

O RCC é outro material produzido em grande escala e com destinação inadequada. No Brasil são gerados anualmente cerca de 31 mil toneladas de RCD, representando aproximadamente 50% da produção total de resíduos sólidos urbanos (IPEA, 2012). Tais resíduos podem ser fonte alternativa de matéria-prima a ser reutilizada pelo setor, mudando da produção industrial para um sistema fechado de produção, onde os resíduos são reciclados, incorporando-se ao processo produtivo (Silva, 2014).

De acordo com Santos (2007) a inclusão de RCD a um solo arenoso apresentou pouca variação em suas propriedades físicas e teve um ótimo resultado a resistência mecânica, tornando seu uso viável para solos reforçados. Pessanha et al (2019) estudou a caracterização e compactação de um solo argiloso com adição de RCD, com teores de 10%, 15% e 25%, e observou que os valores de absorção de água e porosidade foram superiores aos de brita e que as curvas de compactação apresentaram um aumento na massa específica aparente seca máxima conforme se aumentava a porcentagem de RCD.

Muitos destes resíduos produzidos pela sociedade como as garrafas PET e os RCD são descartados em aterros sanitários. No entanto, tem-se a perspectiva de que estes resíduos podem ser incorporados aos aterros sanitários não sobre a ótica de resíduo, e sim, sob a ótica de material de adição na construção das camadas do próprio aterro.

Porém, segundo Boscov (2008), para o projeto e a operação, onde são depositados os resíduos sólidos urbanos (RSU), é importante conhecer o comportamento mecânico, hidráulico e bioquímico da massa de resíduos. De acordo com Silva (2016) os aterros sanitários visam diminuir os impactos causados pela degradação dos RSU's, com o objetivo de impedir a contaminação de águas subterrâneas e superficiais e também do ar, para isso se faz necessário o dimensionamento de camadas de proteção de base e cobertura, sistemas de drenagem dos efluentes líquidos e gasosos e de captação das águas da chuva.

Neste contexto, busca-se nesta pesquisa avaliar a utilização de fibras produzidas a partir de garrafas PET e RCD como adição em solo a ser utilizado em camadas de aterros sanitários. Para isso serão realizados ensaios de caracterização, obtendo-se as características físicas do solo, ensaio de compactação, descobrindo-se umidade ótima e densidade seca, ensaios de compressão uniaxial e compressão diametral, encontrando-se as resistências a compressão simples e a tração, e por fim realizou-se o ensaio de permeabilidade obtendo-se resultados de condutibilidade hidráulica.

## 1.1 Justificativa

Com o intuito de dar uma destinação adequada tanto para o PET quanto para o RCD desenvolveu-se o estudo para o uso desses materiais como adição com solo para aterros sanitários. Como citado por IPEA (2012) e ABIPLAST (2020) a produção desses itens vem crescendo cada vez mais com o passar dos anos, sendo um ponto preocupante para o cuidado com o meio ambiente, portanto, o uso desses materiais como parte construtiva de um aterro é de grande interesse para as políticas ambientais de desenvolvimento urbano.

O solo é indispensável na construção de aterros sanitários, sendo utilizado para construir camadas intermediárias de base ou de finalização, logo, o uso de PET e RCD seria um complemento, com a função de melhorar as características físicas e mecânicas desse elemento construtivo, visando um desempenho superior dos objetivos dos aterros sanitários.

Para a escolha dos materiais que compõem o aterro observam-se algumas normas, a NBR 15849:2010 que trata as diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e finalização de aterros de pequeno porte para deposição de resíduos sólidos urbanos, diz que, as jazidas de solos utilizadas ao longo da implantação e de toda a vida útil de um aterro sanitário devem ser ensaiados de modo a se conhecer sua caracterização geotécnica e a permeabilidade do solo compactado. Nestas obras, o solo é utilizado como base impermeabilizante, para capeamento diário e final do maciço e, para a manutenção de vias internas. De acordo com a referida norma existem critérios mínimos para a proteção ambiental na construção de aterros sanitários, deve-se aplicar, ao fim de cada jornada de trabalho, uma camada de solo compactado sobre os resíduos sólidos urbanos (RSU), visando minimizar infiltração, espalhamento de material e a presença de animais. Há também a necessidade de uma camada final de cobertura, mais espessa que as intermediárias, devendo todo aterro sanitário ter um sistema de impermeabilização na camada de base, sistema de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas e geotécnico.

Segundo Boscov (2008) para a proteção das águas, do solo e do ar, deve-se prevenir a formação e migração do percolado, isso pode ser feito com a secagem prévia do material, para reduzir a água contida no RSU, impermeabilizando a superfície do terreno, separar o aterro em células e revestir com materiais impermeáveis, drenar, coletar e tratar o percolado.

Figura 01: Representação da migração do percolado



Fonte: Boscov (2008)

A incorporação de materiais recicláveis em camada de aterro sanitário, além de ir ao encontro das boas práticas ambientais, pode trazer melhorias no comportamento mecânico de alguns solos. Dias (2014) por exemplo, observou que um solo argiloso reforçado com RCD, na proporção de 50/50, torna-se uma mistura menos erodível e com um melhor comportamento hidromecânico, tornando-se viável a utilização como camada de cobertura de aterros sanitários.

Portanto, entende-se como necessário e oportuno pesquisar e desenvolver conhecimento sobre o uso de materiais reciclados nas camadas de aterros sanitários, através do estudo das características obtidas na mistura com relação à condutibilidade hidráulica, compactação, resistência à compressão uniaxial e resistência à compressão diametral.

A partir desta ideia esta pesquisa tem como finalidade analisar as melhorias quanto a utilização de fibras de garrafa PET e RCD como adição em solos compactados de aterros sanitários de pequeno porte. Para responder a este questionamento, segue no próximo item os objetivos propostos para esta pesquisa.

## 1.2 Objetivo Geral

Analisar as melhorias no comportamento mecânico e hidráulico provocadas pela adição de RCD e fibra PET, em solo compactado, a ser utilizado em camadas de aterros sanitários.

### 1.3 Objetivos Específicos

- a) Avaliar as variações provocadas pela adição de RCD e PET nos parâmetros do solo compactado em comparação ao solo sem adição;
- b) Verificar se ocorrem variações na condutibilidade hidráulica do solo melhorado pela adição de RCD e fibra PET em comparação ao solo sem adição e quantificá-las;
- c) Avaliar as alterações provocadas no solo em sua resistência à compressão simples uniaxial e resistência a compressão diametral pela adição de fibra PET e RCD;
- d) Identificar possíveis variações no Ph do solo melhorado em função das adições no solo de modo;
- e) Indicar ou não o solo melhorado com PET e RCD como camada de aterro sanitário.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho será dividido em capítulos, de forma clara e objetiva. O primeiro capítulo é a introdução com uma explicação geral onde serão descritos: contextualização do tema, justificativa e objetivos do trabalho.

Em seguida, o capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, trazendo referências dos temas relevantes abordados nesta pesquisa.

O capítulo 3 trata da descrição do método desta pesquisa, descrevendo o programa experimental, as etapas e os ensaios necessários para se atingir os objetivos propostos.

No capítulo 4 apresenta-se os resultados finais da pesquisa e, por fim, no capítulo 5, as considerações finais e conclusões do trabalho

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os subitens abaixo descrevem em linhas gerais as temáticas principais desta pesquisa as quais são: aterros sanitários de solo compactado, solo melhorado com fibra PET e RCD.

### 2.1 Aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos

Aterro sanitário é uma obra de engenharia destinada à estocagem, ao armazenamento ou à guarda de resíduos ou lixo gerados pelas grandes aglomerações urbanas (Portella & Ribeiro, 2014).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na NBR 8419:92 define aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos como:

*“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando seus impactos ambientais, método este que utiliza princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores, se necessário.”*

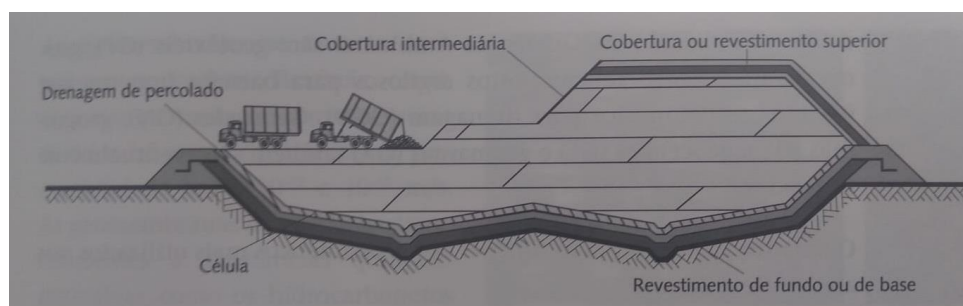
De acordo com a lei de resíduos sólidos, L12305 de 2010, os resíduos sólidos são classificados seguindo dois critérios, a origem e a periculosidade. Quando a origem os resíduos podem ser domiciliares, de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais, dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, de serviços hospitalares, da construção civil, agrossilvopastoris, de serviço de transporte e da mineração. Considerando a periculosidade, são definidos como resíduos perigosos, sendo eles inflamáveis, corrosivos, tóxicos e cancerígenos, materiais que apresentem risco a saúde pública e ao meio ambiente, e resíduos não perigosos que seriam o restante dos materiais.

Nesse estudo analisa-se a possibilidade de utilização de camada de solo melhorado como camadas de cobertura operacional que, de acordo com a NBR 15849:2010, trata-se de camada de material aplicada sobre os resíduos ao final de

cada jornada de trabalho, destinada a minimizar a infiltração das águas da chuva, evitar o espalhamento de materiais leves pela ação do vento, a presença de animais, a proliferação de vetores e a emissão de odores, ou ainda, utilizando-se o solo melhorado como camadas de cobertura final, ou seja, camada de material aplicada sobre os resíduos, para o fechamento da área aterrada, garantindo a integridade do maciço, minimizando a infiltração de águas e possibilitando o uso da área.

Segundo Boscov (2008) o aterro sanitário é constituído por células, prepara-se uma parte do terreno para receber os resíduos até atingir a cota determinada e em seguida começa-se a célula adjacente. A célula completa recebe cobertura intermediária, onde é alocado o sistema de drenagem da célula sobrejacente (Figura 02).

Figura 02: Elementos de contenção de um aterro de resíduos



Fonte: Boscov (2008)

### 2.1.1 Propriedades geotécnicas para executar aterros sanitários

Um dos critérios a se analisar sobre as propriedades dos materiais geotécnicos aplicados em aterro sanitário é a permeabilidade dos mesmos. A NBR 13896:1997 diz que o local escolhido para deposição dos resíduos sólidos será considerado adequado se tiver coeficiente de permeabilidade ( $K_p$ ) da ordem de  $10^{-6}$  cm/s em uma zona não saturada, mas que, a critério do Órgão de Controle Ambiental (OCA), dependendo do tipo de resíduo a ser disposto e das demais características hidrogeológicas do aterro, é aceitável um  $K_p$  da ordem de  $10^{-4}$ .

A NBR 15849:2010 dá diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários pequenos destinados aos resíduos sólidos urbanos. Ela cita que, para a construção de um aterro sanitário, deve-se apresentar investigação geológicas e geotécnicas da área a ser utilizada, sendo exigidos o ensaio de SPT (Standart Penetration Test) para sondagem do local e o

ensaio de permeabilidade do solo in situ. A referida norma cita ainda valores de coeficientes de permeabilidade, em sua tabela 1 (Figura 03), para os quais de dispensa uma camada de impermeabilização complementar ao projeto de aterro sanitário. Esta impermeabilização complementar pode ser executada com camada de solo compactado ou com aplicação de geossintético impermeabilizante.

Figura 03: Coeficientes de permeabilidade para aterros sanitários

Tabela 1 – Critérios para a dispensa de impermeabilização complementar

Limites máximos do excedente hídrico <sup>a</sup> (EH, mm/ano) para a dispensa da impermeabilização complementar <sup>b</sup>		Fração orgânica dos resíduos ≤ 30%				Fração orgânica dos resíduos > 30%			
		Profundidade do freático m				Profundidade do freático m			
		1,50 < n ≤ 3	3 < n < 6	6 ≤ n < 9	n ≥ 9	1,50 < n ≤ 3	3 < n < 6	6 ≤ n < 9	n ≥ 9
Coeficiente de permeabilidade do solo local k (cm/s)	$k \leq 1 \times 10^{-6}$	250	500	1000	1500	188	375	750	1125
	$1 \times 10^{-6} < k \leq 1 \times 10^{-5}$	200	400	800	1200	150	300	600	900
	$1 \times 10^{-5} < k \leq 1 \times 10^{-4}$	150	300	600	900	113	225	450	675

<sup>a</sup> O excedente hídrico é a quantidade de água (em mm/ano) que percola através da camada de cobertura do aterro sanitário, atingindo a massa de resíduos e posteriormente chegando até a base do aterro. Para seu cálculo devem ser utilizadas séries anuais de precipitações médias de temperaturas (que servem para estimar a evapotranspiração utilizando equações como a de Thornthwaite) e o coeficiente de escoamento superficial. O coeficiente de escoamento superficial deve ser adotado em função das características de permeabilidade do solo da camada de cobertura.

<sup>b</sup> Para superar características desfavoráveis da área, o projetista pode propor métodos construtivos, operacionais ou de gestão, atendendo diretrizes estabelecidas pelo órgão de meio ambiente.

Fonte: NBR 15849:2010

Segundo Boscov (2008) em camadas drenantes do aterro são utilizados solos arenosos e até materiais como brita e pedregulho, já para as camadas impermeabilizantes o solo utilizado deve ser uma argila compactada e para o revestimento de fundo ter um coeficiente de permeabilidade menor ou igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Além disso ter um limite de liquidez entre 30 e 60%, e um índice de plasticidade entre 11 e 30%.

Ainda de acordo com o mesmo autor o RSU em estado inicial não apresenta coesão, por ser granular, sua curva de tensão-deformação não apresenta um pico de resistência, a tensão desviadora continua a aumentar mesmo para altas deformações. A deformação volumétrica fica entre 10% e 15% para tensões confinantes de 100 a 400 kPa, enquanto isso a coesão varia entre 0 e 60 kPa e o ângulo de atrito entre 20,5° e 49°. O adensamento deve ser medido de tempos em tempos, já que inicialmente as camadas de solo ocupam cerca de 20% do volume do aterro e apenas 5% após o carregamento das camadas superiores.

A NBR 13896:1997 trata em seu item 5.2.1 das características mecânicas da camada de solo impermeabilizante afirmando que esta deve resistir aos gradientes de pressão acima e abaixo da impermeabilização de modo a evitar a ruptura por assentamento, compressão ou levantamento de aterro.

## **2.2 Solo melhorado**

O melhoramento do solo tem como objetivo aprimorar as características do mesmo (densidade, resistência ao cisalhamento, compressibilidade/adensamento, entre outros), dependendo de sua utilização, e existem vários materiais que possibilitam esse processo, como cimento, cal, fibra e RCD. Segundo Sachetti (2012) a técnica de melhoramento de solos se torna uma ferramenta eficaz para se atingir as resistências necessária para execução de obras geotécnicas.

Santos (2017) estudou um solo areno-siltoso com adição de 2% cimento, por exemplo, o qual apresentou menores teores de expansão e maiores de teores de resistência comparado ao solo natural. Sachetti (2012) observou que a adição de cal e fibras de polipropileno a um solo argilo-siltoso melhoram seu comportamento deixando-o mais dúctil quando submetido a tração axial.

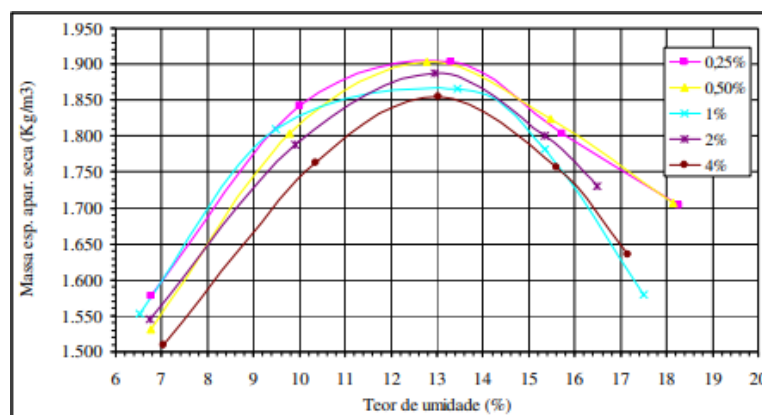
### **2.2.1 Solo compactado melhorado com PET**

Os estudos relacionados ao uso sustentável de PET vêm ganhando cada vez mais força, considerando que a produção desse material no mundo é cada mais maior. Autores da área geotécnica vêm buscando a inserção desse material em obras utilizando teores e solos distintos em busca do melhor resultado.

Segundo Donato (2007) a inclusão de fibras de polipropileno a um solo arenoso, analisando ensaios de prova de carga, melhora o solo aumentando a capacidade de suporte e alterando os mecanismos de ruptura.

De acordo com Pinto et al. (2010) para um solo definido como areia silto-argilosa, foram realizados ensaios de compactação com mistura de 0,25 a 4% de resíduos de PET (Figura 04) e observou-se que com a adição de PET tem-se uma melhora nas características do solo, principalmente na resistência mecânica.

Figura 04: Curvas de compactação

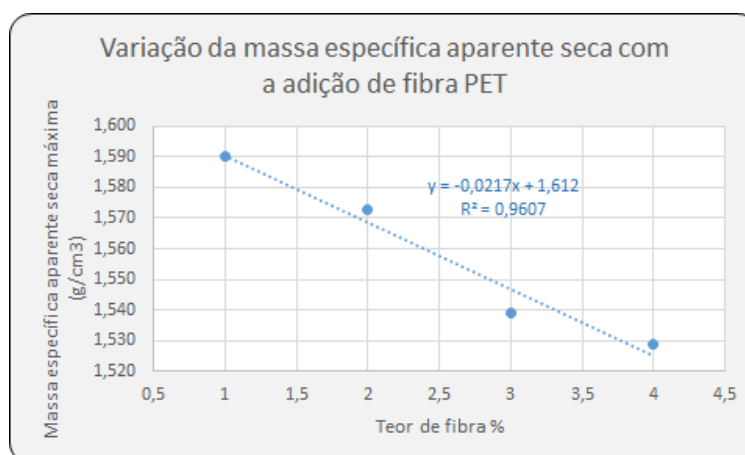


Fonte: Pinto et al (2010)

Mariano e Bueno (2018) por sua vez estudaram uma adição de 10% de fibra de PET em um solo silto-argiloso e concluíram que, o solo com a fibra, tem um aumento da umidade ótima, comparado com o solo natural, e que isso gera uma melhora na compactação do solo.

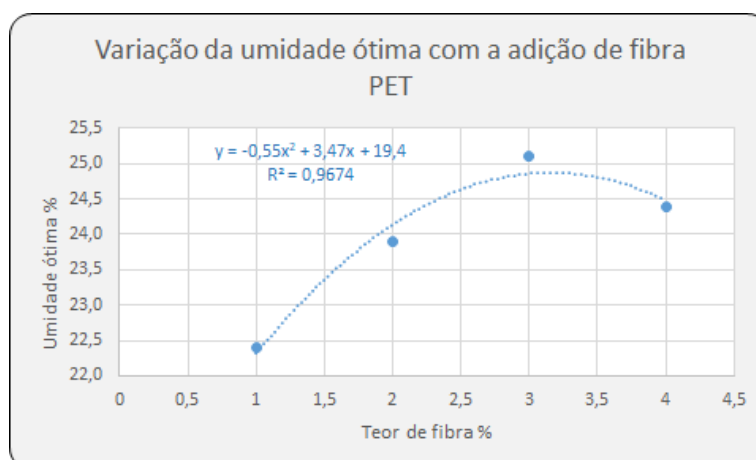
Schuch et al (2021) estudaram a adição de 3 teores de fibra de PET em um solo areno-siltoso, sendo eles 0,5%, 1,0% e 1,5%, constatou-se que com a adição a massa específica diminui de forma linear (Figura 05) e a umidade ótima cresce de forma exponencial (Figura 06), afetando negativamente na trabalhabilidade da mistura.

Figura 05: Decréscimo da massa específica aparente seca com a adição de fibra PET.



Fonte: Schuch et al (2021)

Figura 06: Variação da umidade ótima com a adição de fibra PET.

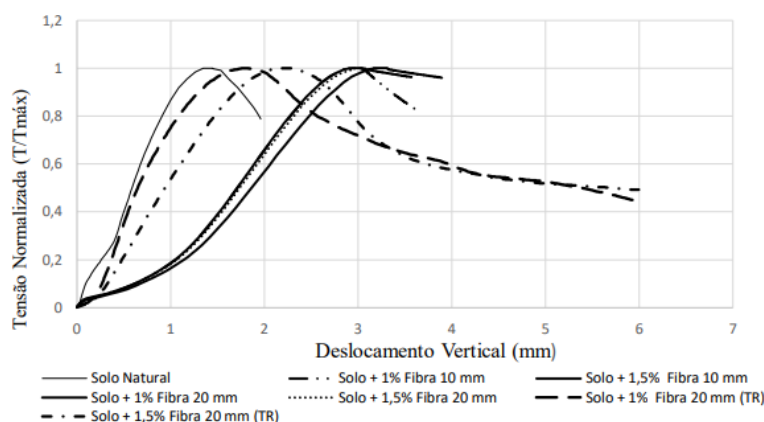


Fonte: Schuch et al (2021)

Reis e Junior (2011) observaram que em um solo siltoso a adição de 1% de fibra de PET melhorou a resistência ao cisalhamento, devido a coesão que é maior na mistura do que no solo puro, e afirmam que nessas condições é viável a utilização de fibra de PET adicionada ao solo para obras geotécnicas.

Segundo Kanaan (2018) a adição de fibra de PET em um solo arenoso gerou um aumento na resistência a compressão e maior ductilidade a mistura, pois apresentam maiores deformações até atingir a ruptura. Foram utilizadas fibras de 10 mm e 20 mm de comprimento, em teores de 1%, 1,5% e 2%, os melhores resultados foram obtidos com as fibras de 20mm e com 1% de fibra (Figura 07).

Figura 07: Tensão normalizada e deslocamento vertical para as amostras de solo natural, solo + fibras lisas e solo + fibras escarificadas



Fonte: Kanaan (2018)

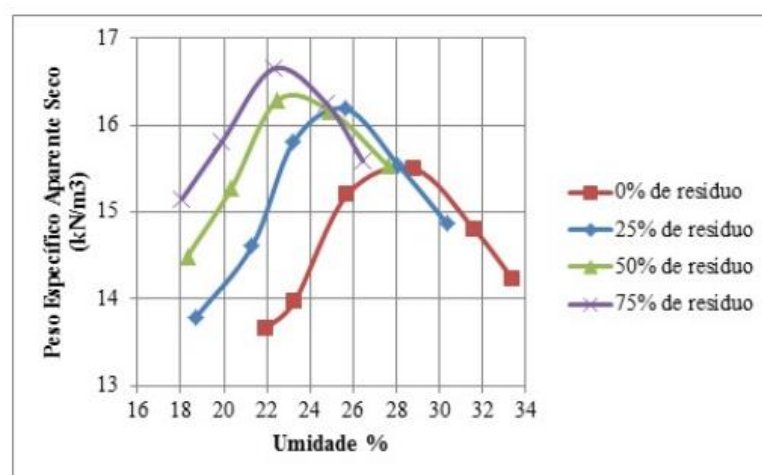
Dados os ganhos relatados em pesquisas anteriores e ainda, à possibilidade de reaproveitamento de resíduos de garrafa PET, a partir da incorporação de fibras produzidas a partir deste material ao solo, entende-se ser apropriado estudar esta mistura como alternativa para camada de solo em aterro sanitário.

### 2.2.2 Solo compactado melhorado com RCD

A produção de resíduo na construção civil (RCD) está em todas as etapas obra, desde de a terraplanagem até a entrega da edificação. Muitos dos materiais empregados não tem uma destinação adequada e alguns estudos apontam para uma alternativa viável e com menores danos para o meio ambiente e a sociedade, a partir da incorporação destes resíduos em algumas etapas construtivas (argamassa de assentamento, fabricação de blocos, entre outros).

Segundo Pivetta e Vendruscolo (2017) um solo argiloso com um acréscimo de RCD tende a ter uma queda na umidade ótima e um aumento no peso específico e na densidade aparente seca máxima (Figura 08). Há também um decréscimo na coesão enquanto o ângulo de atrito aumenta (Quadro 01).

Figura 08: Curvas de compactação



Fonte: Pivetta e Vendruscolo (2017)

Quadro 01: Ângulo de atrito e coesão

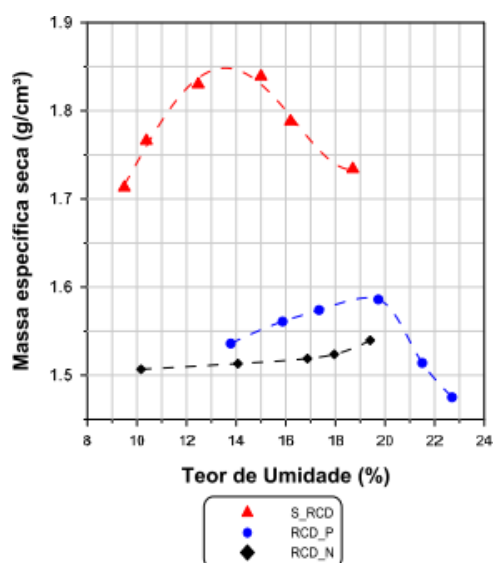
RCD	Ângulo de atrito interno (°)	Coesão (kPa)
0%	30,38	55,22
25%	30,05	45,01
50%	31,54	52,11
75%	32,81	45,09

Fonte: Pivetta e Vendruscolo (2017)

Dranka (2016) estudou a adição de resíduo de telha de fibrocimento em 4 teores (2%, 5%, 10% e 15%) a um solo classificado com silte arenoso de comportamento plástico, constatou-se que o índice de plasticidade teve uma melhora. Em relação a umidade ótima observou-se um leve aumento para o solo com 2% do resíduo em relação ao solo puro, de 30% para 33%, se mantendo para as misturas com 5% e 10% de resíduo e decaindo para 31%, para o teor de 15%. Já para a massa específica seca, o autor observou queda nos valores de solo melhorado em relação ao solo puro para os teores de 2%, 5% e 10%, e um leve aumento desses para a percentagem de 15%.

De acordo com Artuso et al (2016) uma mistura de 50/50 de RCD com um solo arenoso apresenta um aumento considerável de resistência, enquanto o grau de compactação e massa específica seca não variam significativamente (Figura 09).

Figura 09: Curvas de compactação



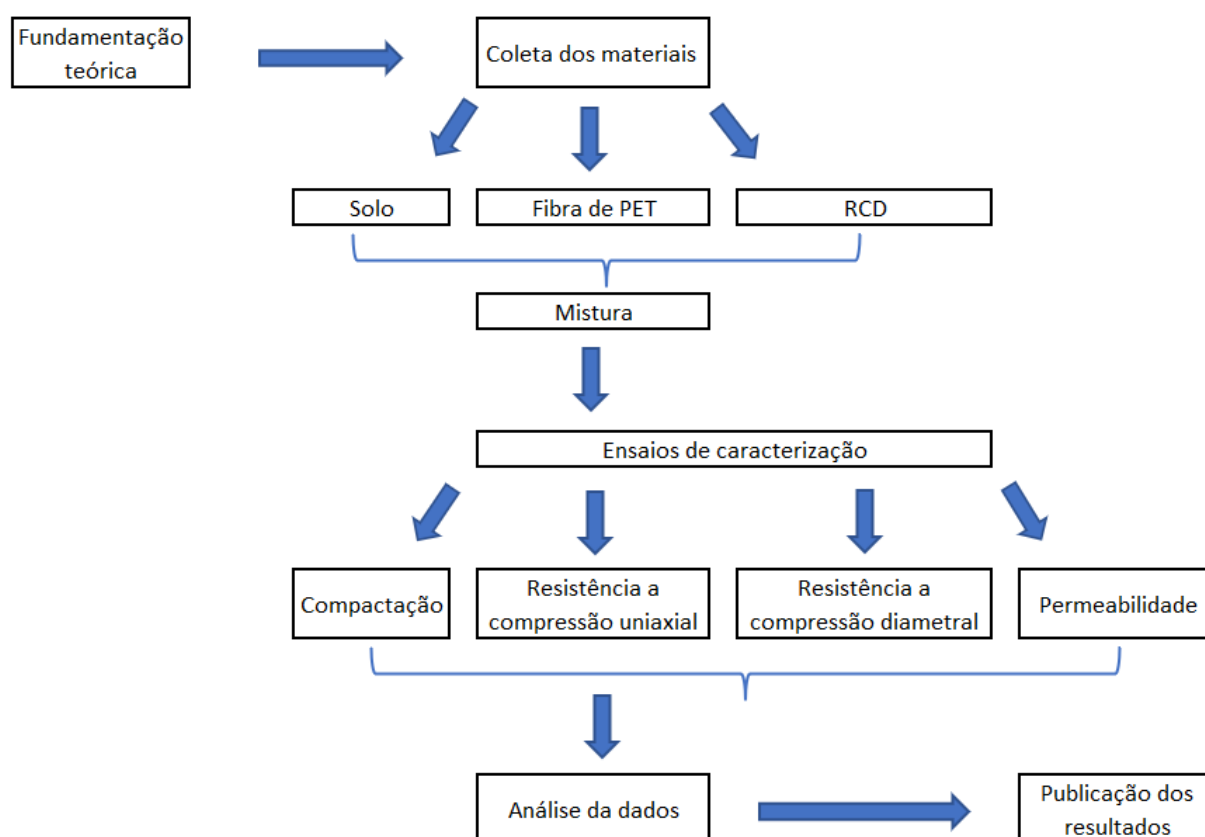
Fonte: Artuso et al (2016)

### 3 MÉTODO DA PESQUISA

Esse trabalho é realizado como uma pesquisa experimental, tendo uma base teórica, dados de diversos autores sobre o tema e um objetivo a ser alcançado, através de ensaios laboratoriais e diferentes situações que podem aparecer.

Abaixo serão descritos os materiais, métodos, ensaios e resultados esperados para esta pesquisa, bem como os processos experimentais realizados e as normas usadas como referência. A sequência, no entanto, pode ser observada no organograma que segue:

Figura 10: Organograma do método da pesquisa



Fonte: Própria, 2022

### 3.1 Materiais

Nesta pesquisa são usados como materiais: amostra de solo residual de granito, fibras de garrafas PET e resíduos da construção civil (RCD), os quais são descritos abaixo.

#### 3.1.1 Solo

A coleta do solo para este estudo foi realizada no município de Biguaçu – SC, que se encontra a cerca de 20 km de Florianópolis – SC, e está sob as coordenadas 27°29'38" de latitude e 48°39'21" de longitude (figura 11).

Figura 11: Local da coleta do solo



Fonte: Google imagens (2022), adaptado pela autora (2022)

A formação geológica do local, de acordo com CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2014) corresponde à formação do Granito Ilha, na Suíte Plutono-Vulcânica Cambirela, correspondendo a biotita monzogranitos e leucossienogranitos de coloração cinza a rósea, equigranulares médio a grossos, isotrópos ou com eventuais estruturas de fluxo ígneo (NP3ypi).

O solo foi coletado de modo manual com pá e picareta (Figura 12) e posteriormente armazenado em caixas plásticas de modo a serem levados ao laboratório de solos e tecnologia de materiais (LSTM) do IFSC (Instituto Federal de

Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina).

Figura 12: Talude estudado



Fonte: Própria, 2021

O solo encontrado no local é classificado como um residual de granito. Foi possível observar estruturas reliquias da rocha mãe no solo coletado como mostra a figura abaixo (figura 13):

Figura 13: Planos estruturais da rocha de granito em solo



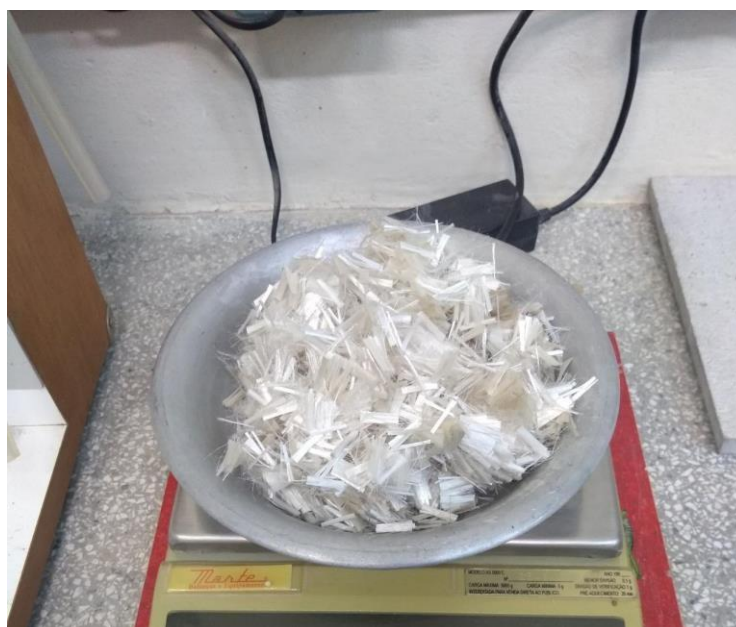
Fonte: Própria, 2021

### 3.1.2 Fibras de PET

A fibra de PET (Figura 14) foi doada pela empresa Cordoaria Brasil, localizada em Itajaí SC, para fins de pesquisa. A empresa desenvolveu tecnologias para a reciclagem do PET, fibras as quais são utilizadas no reforço de concretos, argamassas e solos e também no tratamento de trincas de paredes e pisos.

As fibras utilizadas neste estudo tinham 15mm de comprimento e para a mistura tiveram que ser separadas manualmente para facilitar a incorporação ao solo e ao RCD.

Figura 14: Fibra de PET



Fonte: Própria, 2021

### 3.1.3 Resíduo da construção civil

Coletou-se RCD em uma obra no norte da ilha de Florianópolis – SC, localizada nas coordenadas 27°26'11" de latitude e 48°28'45' de longitude (Figura 15), Bairro Canasvieiras.

Figura 15: Localização do ponto de coleta do RCD



Fonte: Google imagens (2022), adaptada pela autora (2022)

Classificou-se o resíduo como classe A baseando-se na resolução do CONAMA número 307 (Quadro 02), pois foi obtido de recorte de alvenaria executado com bloco cerâmico e argamassa de cimento (Figura 16).

Quadro 02: Classificação do RCD de acordo com o CONAMA

Classificação	Descrição
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregado, como: Tijolos, peças de concreto, argamassa, concreto, etc.
Classe B	Resíduos recicláveis para outras destinações, como: Plástico, metais, vidro, madeira, etc.
Classe C	Resíduos sem reciclagem ou recuperação viáveis, como: Gesso
Classe D	Resíduos perigosos, como: tintas, solventes, óleos, etc.

Fonte: CONAMA, 2002

Figura 16: Local do recorte da alvenaria



Fonte: Própria, 2021

Realizou-se os recortes em alvenaria com o objetivo de abrir passagem para as tubulações, de água e esgoto, e eletrodutos. Fez-se cortes a partir de blocos cerâmicos já assentados, após a aplicação do chapisco, portanto, os resíduos são compostos em sua maior parte por blocos cerâmicos (Figura 17).

Figura 17: Resíduos do recorte de alvenaria



Fonte: Própria, 2021

Realizou-se a moagem do RCD (Figura 18) no LSTM utilizando-se um moinho de discos em pedra almejando-se diminuir a granulometria do resíduo obtido diretamente em obra (Figura 19).

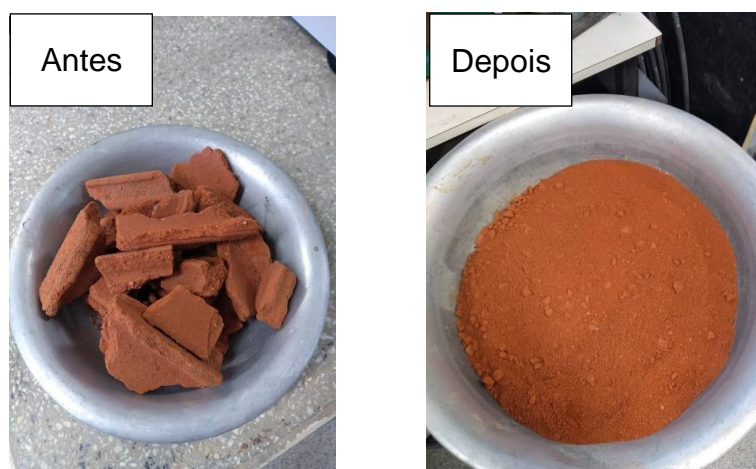
Figura 18: Moagem do RCD.



Fonte: Própria (2022)

Após o processo de moagem obteve-se um material com o aspecto observado na figura 19.

Figura 19: Resultado da moagem do RCD



Fonte: Própria (2022)

Após a moagem observou-se que ainda existiam agregados graudos que não seriam desejáveis para a mistura final, sendo assim optou-se pelo peneiramento do RCD e utilizou-se para isso a peneira de 0,42mm.

## **3.2 Programa experimental**

Nesse tópico descreve-se os ensaios planejados e executados para se alcançar os objetivos dessa pesquisa, os quais são: massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8mm; compactação; permeabilidade, PH, resistência a compressão uniaxial não confinada e resistência a compressão diametral.

### **3.2.1 Composição da mistura**

Após pesquisa na literatura verificou-se estudos com diferentes percentagens de adições de fibra PET a partir do qual se estabeleceu diretrizes para esta pesquisa.

Schuch et al. (2021) já realizaram estudos com solo coletado no mesmo talude, nos teores de 0,5%, 1,0% e 1,5 % em relação à massa seca de solo, e constataram que, o teor de 1% de adição de PET no solo provocou melhorias como a diminuição da massa específica aparente seca em 3%, para este solo residual de granito com característica silto-arenosa (o mesmo utilizado nesta pesquisa). Por este motivo adota-se o teor de adição de 1,0% de fibra como teor ótimo na mistura de solo melhorado com PET.

Para misturas de solo com RCD verificou-se existir porcentagens de mistura solo-RCD estudadas as quais variam em função do tipo de solo estudado (Quadro 03).

Quadro 03: Resultados de outros autores.

Autor	% de RCD	Tipo de Solo	Resultados
Pessanha, V.H.M; etal	10%	Argiloso	Aumento da massa específica aparente, diminuição da umidade ótima e diminuição do grau de saturação
Pessanha, V.H.M; etal	15%	Argiloso	Aumento da massa específica aparente, diminuição da umidade ótima e diminuição do grau de saturação
Pessanha, V.H.M; etal	25%	Argiloso	Aumento da massa específica aparente, diminuição da umidade ótima e igual grau de saturação
Da Silva, A.C; etal	10%	Areno argiloso	A massa específica real dos grãos se mantém, a umidade ótima diminui e a porosidade se mantém
Da Silva, A.C; etal	20%	Areno argiloso	A massa específica real dos grãos diminui, a umidade ótima diminui e a porosidade diminui
Da Silva, A.C; etal	30%	Areno argiloso	A massa específica real dos grãos diminui, a umidade ótima diminui e a porosidade diminui
Dias, M.C.C;	50%	Argiloso	A massa específica aumenta, a umidade ótima diminui e o grau de saturação diminui.

Fonte: Própria, 2022

Observa-se que aparentemente não há uma relação entre a granulometria do solo estudado e a percentagem de adição de RDC na mistura. Então, devido à limitação de tempo necessário para os ensaios a serem realizados num trabalho de conclusão de curso, optou-se pela adição de percentagens fixas de PET e RDC equivalentes a 1% e 15%, respectivamente, em relação à massa seca de solo.

Com isso definiu-se as misturas a serem estudadas (Quadro 04) nesta pesquisa:

Quadro 04: Misturas estudadas

Solo puro	S
Solo + 1,0% de fibra PET	S+PET
Solo + 15,0% de RCD	S+RCD
Solo + 1,0% de fibra PET + 15,0% de RCD	S+PET+RCD

Fonte: Própria

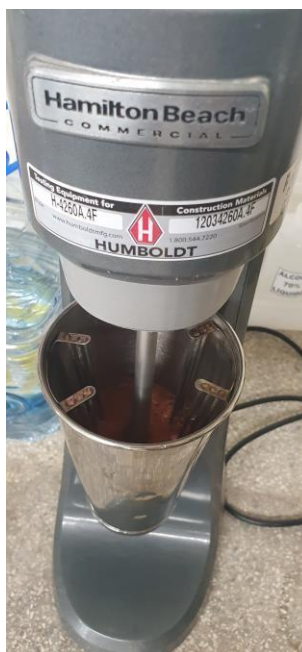
### 3.2.2 Ensaio de caracterização

Seguem nos próximos itens a descrição breve dos ensaios de caracterização do solo utilizados nesta pesquisa: massa específica dos grãos, granulometria e limites de Atterberg.

#### 3.2.2.1 Massa específica dos grãos

Preparou-se previamente o solo coletado em campo de acordo com a NBR 6457:2016 e o ensaio de massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8mm foi realizado seguindo as especificações da norma NBR 6458/2016 Anexo B, a qual determina os aparelhos a serem usados e o método adequado para a realização do ensaio. Os materiais necessários são estufa, aparelho de dispersão (Figura 20), picnômetro (Figura 21), bomba de vácuo, termômetro, balança, funil de vidro, conta gotas, banho maria, béquer de vidro e cápsulas para determinação de umidade.

Figura 20: Aparelho de dispersão



Fonte: Própria (2022)

Figura 21: Picnômetro



Fonte: Própria 2022

Realizou-se o ensaio de massa específica dos grãos para determinar o resultado da relação massa e volume do RCD e do solo, a partir da fórmula 01 abaixo descrita:

Formula 01: Cálculo da massa específica dos grãos

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

Fonte: NBR 6458/2016

Onde:

$\rho_s$  = Massa específica dos grãos (g/cm<sup>3</sup>);

$M_1$  = Massa do solo úmido;

$M_2$  = Massa picnômetro + solo + água, em temperatura de ensaio;

$M_3$  = Massa picnômetro + água até a marca de referência, em temperatura de ensaio;

$w$  = umidade inicial da amostra;

$\rho_{w(t)}$  = Massa específica da água, em temperatura de ensaio.

### 3.2.2.2 Granulometria

Para este ensaio seguiu-se as recomendações da NBR 7181/2016, onde os materiais são estufa, balanças, dessecadores, aparelho de dispersão, proveta de vidro, densímetro de bulbo simétrico, termômetro, relógio com indicação de segundos, béquer, tanque para banho, peneiras, escova com cerdas metálicas, agitador mecânico de peneiras, baqueta de vidro, bisnagas e cápsulas metálicas.

Este ensaio se divide em 2 etapas, peneiramento e sedimentação, e são utilizados 1000g de solo, inicia-se pelo preparo da amostra e peneiramento do solo na peneira de 2mm, em seguida esse material é lavado e secado em estufa para posteriormente ser peneirado novamente (Figura 22), a quantidade de material retida em cada peneira é pesada e definida sua porcentagem em relação ao volume total.

Figura 22: Peneiras utilizadas



Fonte: própria

No processo de sedimentação deixa-se 120 gramas de matéria passante na peneira de 2 mm em solução de água destilada e defloculante por 12h, em seguida agitou-se a solução com solo em dispersor elétrico por 15 min e transfere-se a mistura para uma proveta (Figura 23), completando-a com água destilada até a marca de 1l, inicia-se então a leitura do densímetro, nos tempos 30s, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos, 1 hora, 2, 4, 8 e 24 horas.

Figura 23: Ensaio de sedimentação



Fonte: própria

Com os resultados obtidos gera-se o gráfico e a tabela apresentados abaixo, no gráfico é apresentado a variação da altura de queda das partículas no processo de sedimentação e na tabela o resultado final do peneiramento fino e grosso do solo, apresentando as frações retidas em cada peneira utilizada para este ensaio, e através destes gerou-se a curva granulométrica e, posteriormente, a classificação do solo. Este ensaio de granulometria foi realizado por Broering e Silva (2018), com solo oriundo do mesmo talude onde a amostra desta pesquisa foi coletada e, portanto, seus dados serão utilizados como referência neste trabalho.

### 3.2.2.3 Limites de Attemberg

Os limites de Attemberg têm como objetivo determinar a consistência do solo estudado e são encontrados através de dois ensaios: limite de liquidez e limite de plasticidade.

O limite de liquidez é realizado seguindo a norma NBR 6459/2017, na qual estão determinados os equipamentos a serem utilizados, sendo eles estufa, capsulas de porcelana de 120 mm de diâmetro, espátula de lâmina flexível com 80 mm de comprimento e 20 mm de largura, aparelho para determinação do limite de liquidez (Figura 24), cinzel (Figura 25), recipientes que evitem perda de umidade, balança, gabarito para verificação de altura de queda de concha e esfera de aço com 8mm de diâmetro.

Figura 24: Aparelho para determinação do limite de liquidez



Fonte: Própria, 2022

Figura 25: Cinzel



Fonte: NBR 6459/2017

Para a realização desse ensaio utilizou-se o solo previamente seco e peneirado, adicionando-se água até que atinja uma consistência onde consiga-se formar bolinhas com as mãos sem que se quebrem. A partir disso coloca-se na concha uma porção de solo uniforme em sua extensão, retira-se em linha reta um pouco do solo da parte superior da concha (Figura 26) e abre-se com o cinzel uma ranhura exatamente no meio do solo restante (Figura 27).

Figura 26: Concha com o material



Fonte: Própria, 2022

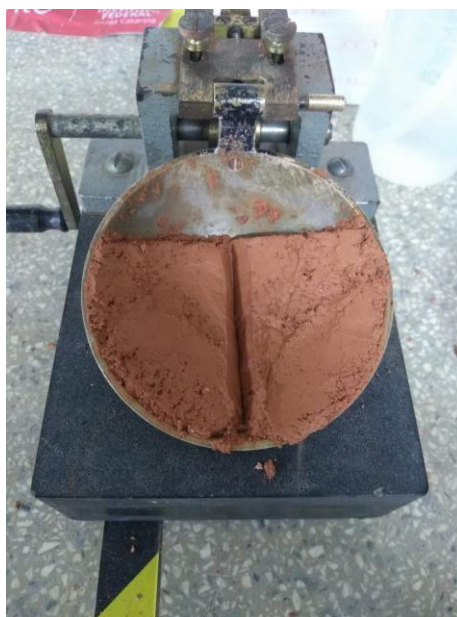
Figura 27: Material com ranhura



Fonte: Própria, 2022

Em seguida gira-se a manivela em ritmo constante, contabilizando os golpes, até que a ranhura comece a se fechar (Figura 28). Repete-se o processo por mais 5 vezes, adicionando um pouco de água a cada vez.

Figura 28: Lados da ranhura levemente em contato



Fonte: Própria, 2022

São recolhidas amostras do centro da concha, onde os dois lados entram em contato, em seguida essas amostras são pesadas, secas em estufas e pesadas novamente.

Já o limite de plasticidade é determinado seguido as especificações da NBR 7180/2016, necessitando-se para esse ensaio estufa, capsulas de porcelana de 120 mm de diâmetro, espátula de lâmina flexível com 80 mm de comprimento e 20 mm de largura, balança, gabarito cilíndrico com 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento e placa de vidro.

Realiza-se a mistura do solo, seco em estufa, com água até que se obtenha uma mistura pastosa, em que se consiga fazer bolinhas sem que se esfarelem. Em seguida pega-se uma porção e rolando-a em cima da placa de vidro, faz-se rolinhos de acordo com o gabarito (Figura 29), tentando evitar que se quebrem, caso isso ocorra acrescenta-se mais água, até que se consiga fazer os rolinhos sem que se rachem. Esse processo repete-se por 5 vezes e as amostras são recolhidas, essas amostras são pesadas ao final do ensaio e depois de secas em estufa.

Figura 29: Rolinho de acordo com o gabarito



Fonte: Própria, 2019

Neste ensaio também necessita-se a pesagem da amostra úmida e depois de seca em estufa para a determinação do teor de umidade com um erro admissível de 5%, de, ao menos 3 amostras.

Com o resultado dos limites de Attemberg utiliza-se da formula 02 para obter o índice de plasticidade (IP).

Fórmula 02: Índice de plasticidade.

$$IP = LL - LP$$

Fonte: NBR 7180/2016

IP = Índice de plasticidade;

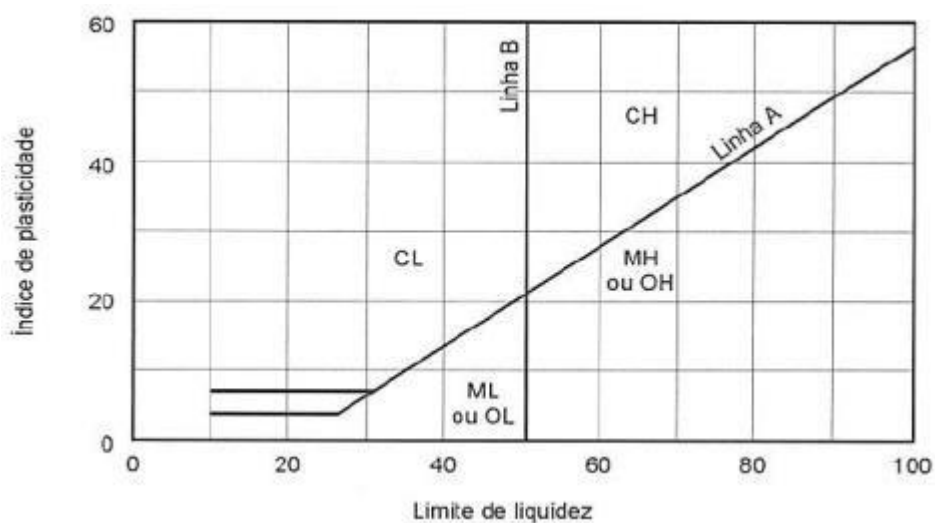
LL = Limite de liquidez;

LP = Limite de plasticidade.

Esses ensaios foram realizados para o solo puro e para o RCD puro, os resultados estão descritos no item 4.3.

Por fim o resultado é utilizado para análise da plasticidade de acordo com a Carta de Plasticidade de Casagrande (Figura 30).

Figura 30: Gráfico de Plasticidade de Casagrande



Fonte: Pinto, 2006

No quadro abaixo estão descritos todos os ensaios de caracterização realizados e suas respectivas normas.

Quadro 05: Ensaios de caracterização

Massa específica NBR 6458:2016 (Anexo B)	RCD Fibra PET – (já realizado por outra autora) Solo Solo + RCD
Granulometria NBR 7181: 2016	Solo
Limite de Liquidez NBR 6459:2016	Solo Solo + RCD
Limite de Plasticidade NBR 7180:2016	Solo Solo + RCD
Total realizado nesta pesquisa:	8 ensaios de caracterização

Fonte: Própria, 2022

### 3.2.3 Compactação

Inicialmente prepara-se a amostra de solo de acordo com a NBR 6457:2016 a qual prevê que o ensaio possa ser realizado com diferentes formas de secagem e diferentes tamanhos de cilindro conforme características físicas do solo em análise. Para esta pesquisa utilizou-se o solo com secagem higroscópica, com cilindro do conjunto de PROCTOR pequeno na energia normal (Figura 31).

Figura 31: Ensaio de compactação



Fonte: Própria (2021)

Deste ensaio resulta curvas de compactação, onde pode-se definir umidade ótima e densidade seca máxima, para esse estudo serão realizadas 4 curvas de compactação, solo natural (S), solo mais 1,0% de fibra de PET (S+PET), solo mais 15,0% de RCD (S+RCD) e solo mais 1,0% de fibra de PET e mais 15,0% de RCD (S+PET+RCD).

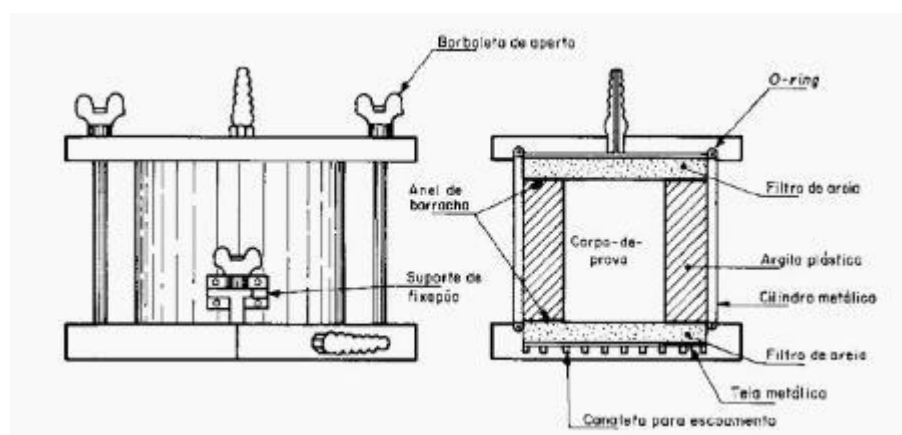
Para a realização deste ensaio inicialmente preparou-se o solo o qual foi seco em estufa e destorroado. O RCD foi produzido por moagem, seco em estufa e peneirado na peneira #4,8 mm. Neste estudo preparou-se para cada corpo de prova, respectivo a sua mistura, 3 kg de solo puro, 450 g de RCD e 30 g de fibra de PET, sendo que as massas das adições foram determinadas em relação ao peso de solo seco.

Em seguida, com as misturas prontas, acrescenta-se a quantidade de água inicial para que se aproxime da umidade ótima estimada (esta verificação inicial é feita por análise tátil visual), e inicia-se a moldagem dos corpos de prova de forma manual, a cada corpo de prova adiciona-se mais um pouco de água, ao fim de cada compactação pesa-se os corpos de prova e repete-se este processo até que o peso comece a diminuir. Notou-se uma certa dificuldade para a incorporação da fibra de PET ao solo e RCD e também que as misturas com RCD ficaram mais secas e quebradiças.

### 3.2.4 Permeabilidade

Ensaio realizado seguindo as especificações da NBR 14545/2021, na qual são descritos 2 métodos para a determinação da permeabilidade do solo, os materiais necessários para o método A são sistema para aplicação e medição de cargas hidráulicas, sistema de aplicação de contra pressão, sistema de medição de pressão neutra, sistema de pressurização da câmara do permeâmetro, câmara do permeâmetro, sistema pistão-deflectômetro, base e cabeçote, membrana flexível, pedras porosas, papel filtro e cilindro auxiliar. Já para o método B são necessários sistema para aplicação e medição de cargas hidráulicas, permeâmetro (Figura 32), argila plástica e areia grossa.

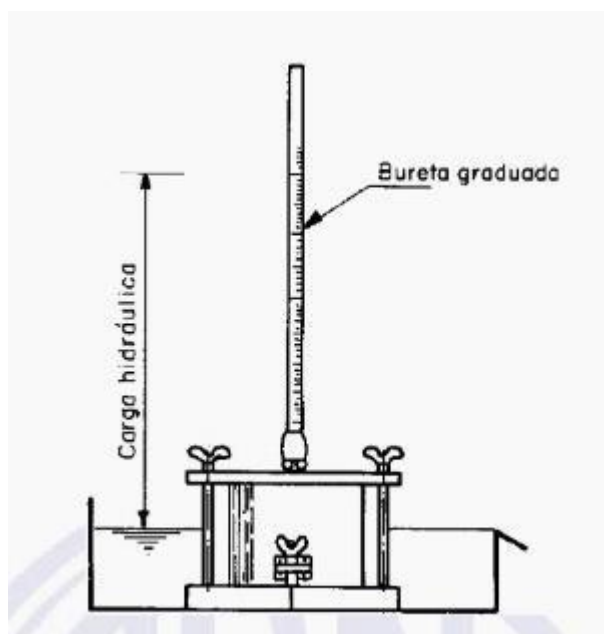
Figura 32: Permeâmetro com o corpo de prova posicionado



Fonte: NBR 14545/2021

Nesse estudo decidiu-se utilizar o método B (Figura 33).

Figura 33: Esquema de montagem do ensaio – Método B



Fonte: NBR 14545/2021

Foram preparados corpos de prova nos 4 diferentes teores estudados (S, S+PET, S+RCD e S+PET+RCD). A moldagem realizou-se em um cilindro de proctor tamanho pequeno, energia normal (com 3 camadas e 26 golpes em cada uma), de modo a se obter as mesmas condições da curva de compactação (umidade ótima e densidade seca máxima). Após a moldagem os CP foram armazenados em sacos plásticos e contidos num recipiente tampado para cura.

Para este ensaio preparou-se a argila plástica (bentonita), um material impermeável para realizar a vedação do fundo, topo e paredes do permeâmetro (conforme apontado na figura 33), deixando-a descansar por 48 horas acondicionada em sacos plásticos contidos num tambor.

Após, iniciou-se a montagem do equipamento em laboratório com a colocação da bentonita nas paredes de fundo do permeâmetro, seguida da colocação de uma camada drenante (pedrisco) no fundo e uma camada de geotêxtil para evitar o carreamento de finos da amostra durante a execução do ensaio. Então, posicionou-se o corpo de prova no centro do permeâmetro envolvendo-o com bentonita cuidadosamente para não danificar o CP, deixando o topo deste, livre (Figura 34), assim, garante-se que o fluxo de água atravesse apenas a amostra de solo. Em seguida colocou-se mais uma camada de geotêxtil e uma de pedrisco, fechando-se o permeâmetro.

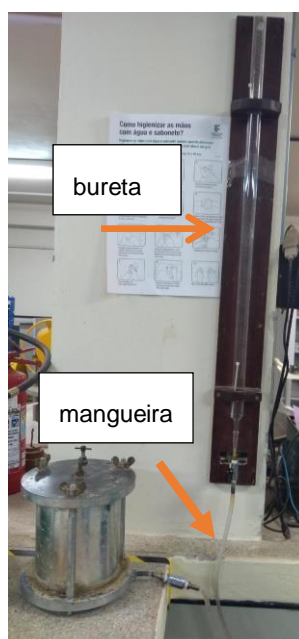
Figura 34: Corpo de prova posicionado no permeâmetro envolto com bentonita



Fonte: Própria, 2022

A realização do ensaio iniciou-se com a saturação do solo no sentido ascendente, para isso conecta-se a entrada inferior do permeâmetro uma mangueira de nível e 2 registros em uma bureta graduada, um posicionado na saída de água da bureta e o outro na entrada do permeâmetro (Figura 35), enche-se a bureta com água e abre-se os dois registros.

Figura 35: Conjunto bureta e permeâmetro montados para o ensaio



Fonte: Própria, 2022

Na tampa do permeâmetro há uma entrada de água e um respirador, quando o corpo de prova está saturado a água que entra pela base começa a sair pelo respirador (fluxo ascendente). Uma vez saturado o CP, fechou-se o respirador e os registros de entrada de água, e inverteu-se o fluxo da água (descendente), coloca-se a mangueira vinda da bureta na entrada de cima do permeâmetro e uma outra mangueira no fundo para a saída de água. Definiu-se a altura de água inicial na bureta como sendo a carga de altura máxima, abriu-se os registros ao mesmo tempo que ligou-se o cronômetro, deixando-se a água que sai do permeâmetro cair em uma proveta graduada. Marcou-se o tempo em que a água da bureta levou para variar a carga de água, anotando-se também o volume de água retido na proveta.

Com os dados coletados durante o ensaio utiliza-se a fórmula descrita abaixo e define-se a permeabilidade do solo.

Formula 03: Coeficiente de permeabilidade

$$k = \frac{aH}{A \Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Fonte: NBR 14545:2021

Onde:

K = Coeficiente de permeabilidade

a = Área interna da bureta (cm<sup>2</sup>)

H = Altura inicial do corpo de prova (cm)

A = Área inicial do corpo de prova (cm<sup>2</sup>)

$\Delta t$  = Diferença entre tempo final e inicial (s)

h<sub>1</sub> = Carga hidráulica inicial (cm)

h<sub>2</sub> = Carga hidráulica final (cm)

Realizou-se este ensaio para 4 composições de corpos de prova, solo puro, solo + RCD e solo + PET + RCD, os resultados estão apresentados no decorrer deste trabalho.

### 3.2.5 Determinação do PH

A medição do PH do solo é bastante na área da agricultura, para analisar a composição do solo, porém é muito importante realiza-lo também para obras geotécnicas, levando em consideração que na construção civil existem elementos corrosivos. Para se assegurar que a inserção de RCD e fibra PET não causa alteração no PH do solo a ser utilizado como camada em aterro sanitário, verificou-se seu valor no decorrer dos ensaios de laboratório.

Para esta pesquisa será realizada a medição do PH do solo puro e das misturas, totalizando em 4 resultados, utilizando um recipiente e um peagômetro digital (Figura 36). O peagômetro da marca Hanna é especificamente desenvolvido para medições de PH em solo sem a necessidade de se elaborar uma solução. Utilizou-se soluções padrão com PH 4.0 e 7.0 para calibrar o equipamento antes do uso.

Figura 36: Peagômetro digital



Fonte: Própria (2022)

Separou-se uma amostra de cada mistura em umidade ótima, colocando-a em um béquer, inserindo-se o peagômetro (Figura 37).

Figura 37: Amostra com o peagômetro aferindo o PH



Fonte: Própria, 2022

Os resultados destas medições estão apresentados no item 4.6 e serão posteriormente analisados.

### **3.2.6 Resistência à compressão uniaxial não confinada**

Para a realização deste ensaio segue-se as especificações da norma NBR 12770:2022. O equipamento utilizado é uma prensa universal de ensaios EMIC, automatizada, com célula de carga de 1.000 N, com velocidade constante de 1mm/s.

Para esse ensaio também realizou-se 4 teores e para cada um deles 3 corpos de prova, resultando nos gráficos de compressão-deformação.

Os CPs foram moldados na umidade ótima e massa específica seca máxima obtidos no ensaio de compactação, no cilindro Harvard (Figura 40) com dimensões aproximadas de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, compactados com torugo.

Figura 38: Cilindro de Harvard e tarugo



Fonte: Própria, 2022

Divide-se a massa de solo a ser compactada no cilindro em 7 partes iguais colocando-se as camadas uma a uma, compactando-as com o tarugo até que este desça até a linha nele demarcada. Com este método de moldagem produziu-se 3 CPs por teor. Realizou-se o controle da moldagem verificando-se as dimensões dos CPs e a massa dos mesmos observando-se, portanto, a densidade alcançada. Os CPs foram embalados um a um em sacos plásticos e acondicionados em recipiente vedado até a data de realização do ensaio de compressão (Figura 39).

Figura 39: Corpo de prova posicionado na prensa



Fonte Própria

Os dados fornecidos pelo equipamento são sendo eles tempo (s), deformação (mm) e força (N) aplicada no CP, os quais são armazenados em arquivo no formato \*.txt. Após, trabalhou-se estes dados em planilha excel para gerar os dados de acordo com as fórmulas descritas na NBR 12770/2022 e apresentadas abaixo.

Formula 04: Deformação axial especifica

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \times 100$$

Fonte: NBR 12770:2022

$\varepsilon$  = Deformação axial especifica (%);

$\Delta H$  = Deformação da altura do corpo de prova (mm), dada pela prensa;

H = Altura inicial do corpo de prova (mm).

Formula 05: Seção transversal média

$$A = \frac{(100 \cdot A_i)}{(100 - \varepsilon)}$$

Fonte: NBR 12770:2022

A = Seção transversal média;

$A_i$  = Área da seção transversal média inicial.

Formula 06: Tensão de compressão

$$q_u = \frac{P}{A}$$

Fonte: NBR 12770:2022

$q_u$  = Tensão de compressão;

P = Carga aplicada (kN).

Os resultados desse ensaio estão apresentados no item 4.7

### 3.2.7 Resistência à compressão diametral

Este ensaio realizou-se seguindo as orientações da NBR 7222:2011, na qual especifica-se que os materiais a serem utilizados são máquina de ensaios (nesta pesquisa utilizou-se a mesma prensa universal citada no ensaio de compressão simples), dotada de pratos de compressão superior e inferior com célula de carga de 1.000N. Utilizou-se paquímetro para conferir as medidas dos CPs, balança com 0,01 gr de resolução para medir a massa e dispositivos auxiliares para o melhor posicionamento do corpo de prova na prensa, chamado de pórtico de Lottman (Figura 40).

Figura 40: Pórtico de Lottman



Fonte: NBR 7222:2011

Este ensaio, assim como os anteriores, foi realizado para os 4 teores estudados nesta pesquisa. A moldagem dos CPs se deu de forma igual aos da resistência à compressão simples e de modo simultâneo, no mesmo dia e hora, para não haver diferença nas condições de moldagem e provocar alterações de resultado indesejadas.

Iniciou-se o ensaio de resistência a compressão diametral (tração na compressão) aplicando-se uma força no corpo de prova posicionado na prensa com o acessório de ensaio (Figura 41).

Figura 41: Corpo de prova posicionado na prensa



Fonte: Própria, 2022

Os resultados estão apresentados no item 4.8.

No quadro abaixo estão apresentados todos os ensaios realizados com suas respectivas normas e o número de CP's produzidos em cada um.

Quadro 06: Número de corpos de prova realizados por ensaio

Número de corpos de prova (CPs) por composição em cada ensaio				
Ensaio realizado	Composições			
	Solo puro	Solo + PET	Solo + RCD	Solo + PET + RCD
Compactação NBR 7182:2016	5	5	7	5
Permeabilidade NBR 14545:2021	1	1	1	1
Compressão uniaxial NBR 12770:2022	3	3	3	3
Compressão diametral NBR 7222:2011	3	3	3	3
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>			

Fonte: Própria, 2022.

### 3.3 Análise dos resultados

Para se obter uma maior organização e facilidade na análise dos resultados obtidos nesta pesquisa, utilizou-se planilha eletrônica (excel), realizando-se as etapas de tabulação, cálculos, geração de tabelas e planilhas e gráficos (quando necessário).

Estas etapas foram utilizadas tanto para os ensaios de caracterização quanto para os ensaios de compactação, permeabilidade, medição de PH, resistência à compressão simples não confinada, resistência à compressão diametral.

## 4 RESULTADOS

Abaixo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios propostos e realizados. Apresenta-se primeiramente os resultados de caracterização dos materiais, após a compactação, permeabilidade, PH, resistências à compressão uniaxial e diametral.

### 4.1 Ensaios de caracterização

Descreve-se aqui os resultados obtidos para caracterizar o solo utilizado na pesquisa bem como as adições: RCD e PET.

#### 4.1.1 Massa específica dos grãos

Realizou-se ensaios de massa específica dos grãos para o solo puro, para o RCD e para a mistura de solo e RCD nos teores propostos no método anteriormente descrito. Os valores obtidos estão no quadro 07:

Quadro 07: Valores finais de massa específica dos grãos

Teores	Valores de $\gamma_g$ (g/cm <sup>3</sup> )
S	2,56
RCD	2,18
S + RCD	2,51

Fonte: Própria (2022)

Analisando-se os dados acima verifica-se que a massa específica do grãos de solo é maior que a do RCD produzido a partir de recorte de alvenaria e, que a mistura de solo e RCD provoca uma diminuição na massa específica da mistura uma vez que grãos menos densos são incorporados ao solo.

#### 4.1.2 Granulometria do solo

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com o descrito no método desta pesquisa, os autores Broering e Silva (2018) realizaram este ensaio com o mesmo solo e os resultados apresentados foram os obtidos no estudo dos mesmos.

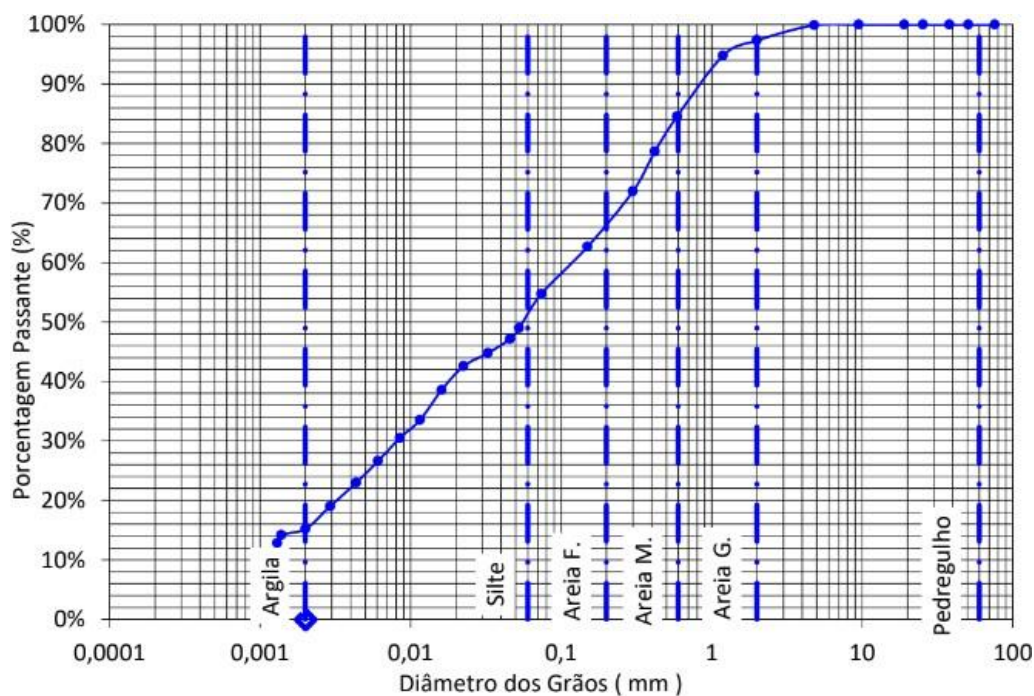
A partir do gráfico apresentado no item 3.2.1.2 obteve-se a tabela 01 e dela o gráfico representado abaixo e a partir deste, uma tabela descrevendo a porcentagem de cada tipo de grão presente neste solo.

Tabela 01: Percentagem de solo retido em cada peneira

Peneiras (mm)	RETIDA			PASSANTE	
	Fração fina (%)	Fração grossa (%)	Acumulada	Fração fina (%)	Fração grossa (%)
9,500	-	0,00	0,00	-	100,00
6,300	-	0,11	0,11	-	99,89
4,800	-	2,57	2,68	-	97,32
2,400	2,63	0,14	2,63	97,37	94,76
1,200	10,49	0,56	13,11	86,89	84,55
6,06	6,06	0,32	19,18	80,82	78,65
0,300	6,88	0,37	26,06	73,94	71,95
0,150	9,56	0,51	35,62	64,38	62,65
0,075	8,14	0,43	43,76	56,24	54,73

Fonte: Broering e Silva (2018)

Figura 42: Curva granulométrica do solo puro



Fonte: Broering e Silva (2018)

Tabela 02: Porcentagem de cada tipo de grão presente no solo

Fração	Partícula (mm)	Frações distribuídas (%)
Argila	0,000 – 0,002	15
Silte	0,002 – 0,060	36
Areia fina	0,060 – 0,200	15
Areia média	0,200 – 0,600	19
Areia grossa	0,600 – 2,000	13
Pedregulho	2,000 – 60,000	3
<b>Total</b>		<b>100</b>

Fonte: Broering e Silva (2018)

Observando a tabela define-se o solo como uma areia siltosa.

#### 4.1.3 Limite de liquidez

Realizou-se o ensaio para o solo puro e para o solo com RCD. Para cada material ensaiado obteve-se o número de golpes e o teor de umidade para o fechamento das ranhuras como descrito no método desta pesquisa. Os valores obtidos encontram-se no Quadro 08.

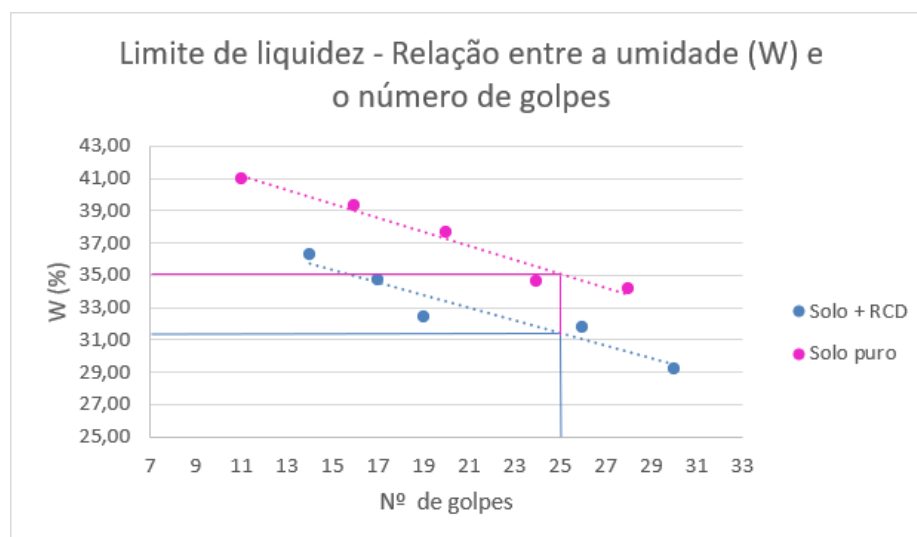
Quadro 08: Dados do ensaio de limite de liquidez do solo puro e do solo + RCD

Composição	Nº de golpes	Umidade (W)
Solo puro	28	34,16
	24	34,62
	20	37,62
	16	39,34
	11	40,93
Solo + RCD	30	29,22
	26	31,80
	19	32,41
	17	34,73
	14	36,31

Fonte: Própria, 2022

A partir dos valores cima gerou-se o gráfico de dispersão e inseriu-se a linha de tendência obtendo-se o valor do teor de umidade referente a 25 golpes obtendo-se assim o limite de liquidez (Figura 43).

Figura 43: Limites de liquidez dos materiais ensaiados



Fonte: Própria, 2022

No quadro abaixo está representado o resultado obtido no ensaio:

Quadro 09: Umidade a 25 golpes do solo puro e do solo + RCD

Composição	Nº de golpes	W (%)
Solo puro	25	35
Solo + RCD	25	31

Fonte: Própria, 2022

A diferença entre os valores de umidade ao mesmos 25 golpes se deve ao fato de o RCD ser composto em sua maioria por finos, os quais preenchem alguns vazios de solo que antes seriam preenchidos por água, fazendo com que se utilize menos quantidade de água e diminuindo a umidade.

#### 4.1.4 Limite de plasticidade

O ensaio foi realizado, seguindo os procedimentos descritos no item 3.2.1.4, para o solo puro e para solo + RCD.

Para o solo puro produziu-se 5 amostras, determinando-se a umidade de cada uma (Quadro 10) e em seguida fez-se uma média com os 3 valores mais próximos entre si e calculou-se também o erro admissível, considerando 5% da média da umidade, obtendo-se assim o valor do LP. (Quadro 11).

Quadro 10: Umidade de cada amostra do solo puro

Amostra	Umidade (%)
1	23,29
2	19,59
3	20,78
4	22,22
5	21,18

Fonte: Própria, 2022

Quadro 11: Resultado final do ensaio de limite de plasticidade

Média	22,23	
Erro	1,11	
Intervalo admitido	21,12	23,34
Valor de LP	22%	

Fonte: Própria. 2022

Para a mistura de solo + RCD não foi possível concluir e gerar dados para o ensaio com a mistura, já que a mesma não atingiu consistência para a moldagem dos rolinhos. Portanto a mistura é classificada como não plástica (NP) de acordo com a NBR 7180:2016, pois não foi possível realizar a moldagem dos rolinhos com 3mm de diâmetro.

#### 4.1.5 Índice de plasticidade

O índice de plasticidade é calculado utilizando os resultados de limite de liquidez e limite de plasticidade, e a fórmula descrita no item 3.2.1.2. Os resultados de IP estão apresentados no quadro abaixo.

Quadro 12: Índices de plasticidade do solo puro e do solo + RCD

Solo puro	
IP (%)	13
Solo + RCD	
IP (%)	NP

Fonte: Própria, 2022

O solo puro é considerado um material medianamente plástico e o solo + RCD uma mistura não plástica, já que não foi possível a obtenção de resultados para o índice LP. Segundo o gráfico de índice de plasticidade de casa grande o solo é considerado de baixa compressibilidade.

#### 4.2 Compactação

Realizou-se a curva de compactação os 4 teores estudados nesta pesquisa (S; S+PET; S+RCD e S+PET+RCD). Os autores Broering e Silva (2018) e Schuch et al (2021) já haviam determinado os parâmetros de compactação para S e S+PET respectivamente e, tais valores foram utilizados nesta pesquisa. Desta forma, para esta pesquisa realizou-se a determinação da curva de compactação para S+RCD e S+PET+RCD.

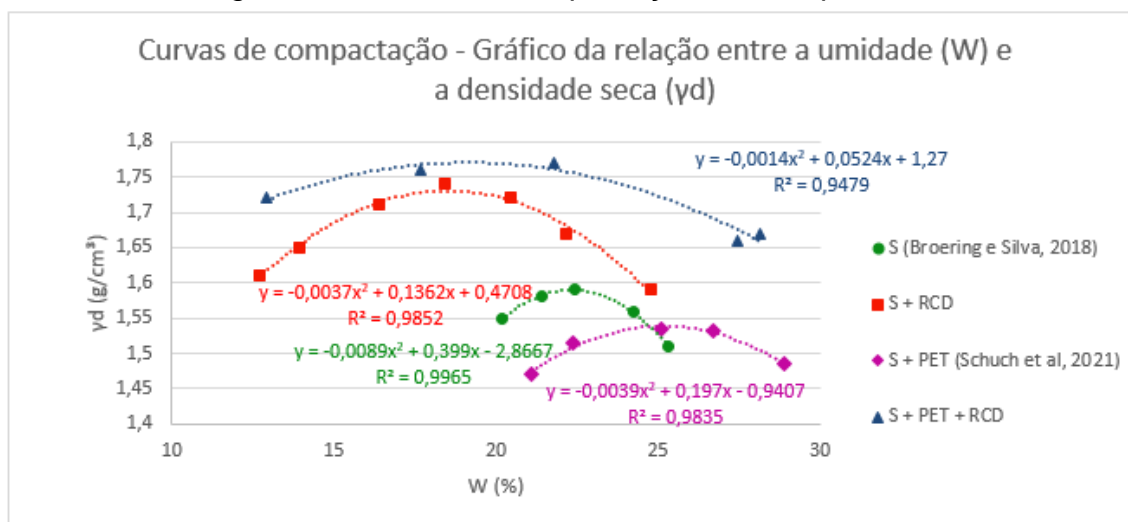
Para cada mistura determinou-se a partir dos dados obtidos em laboratório (Quadro 13) os valores de umidade e densidade seca de cada corpo de prova moldado e, a partir destes elaborou-se as curvas de compactação, obtendo-se as umidades ótimas e densidades secas máximas.

Quadro 13: Dados obtidos a partir dos ensaios de compactação

	Corpo de Prova	W (%)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )
S	1	20,19	1,55
	2	21,39	1,58
	3	22,41	1,59
	4	24,25	1,56
	5	25,31	1,51
S + RCD	6	12,71	1,61
	7	13,94	1,65
	8	16,37	1,71
	9	18,41	1,74
	10	20,45	1,72
	11	22,15	1,67
S + PET	12	24,76	1,59
	13	21,1	1,47
	14	22,4	1,51
	15	25,1	1,54
	16	26,7	1,53
S + RCD + PET	17	28,9	1,49
	18	12,93	1,72
	19	17,67	1,76
	20	21,8	1,77
	21	28,15	1,67
	22	27,43	1,66

Fonte: Própria

Figura 44: Curvas de compactação do solo puro e das misturas



Fonte: Própria

A partir das curvas de compactação obteve-se os valores de umidade ótima e densidade seca do solo puro e das misturas (Quadro 14), os quais são utilizados para a moldagem de CPs dos ensaios de resistência à compressão simples, PH, resistência à tração e permeabilidade.

Quadro 14: Dados de umidade ótima e densidade seca do solo puro e das misturas

Composições	W(%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
S	22,4	1,59
S + PET	25,2	1,54
S + RCD	18,2	1,74
S + PET + RCD	18,8	1,77

Fonte: Própria, 2022

Comparando-se os valores obtidos para os teores analisados com os valores obtidos para o solo puro, percebe-se que para o solo com a adição de fibra de PET há um aumento da umidade ótima e diminuição da densidade, ou seja, para se atingir uma maior densificação é necessária uma maior quantidade de água e, este fenômeno provavelmente é decorrente da ação da fibra na estrutura do solo compactado, aumentando a quantidade de vazios e promovendo um caminho preferencial para a água ao longo das fibras.

Já a composição com RCD provocou uma diminuição na umidade ótima e aumento na densidade seca máxima, provavelmente ocasionado pelo aumento na quantidade de finos no solo e consequente diminuição dos vazios.

Na mistura S+PET+RCD observou-se que as características agregadas do RCD se sobrepõem as da fibra de PET, deixando a mistura com umidade ótima menor e densidade maior em relação a mistura S, mostrando um comportamento mais próximo à mistura S+RCD do que da S+PET. Há que se considerar também que os teores de adição influenciam neste resultado pois adicionou-se 1% de PET e 15% de RCD em relação à massa seca de solo.

Para compreender a variação de índice de vazios ( $e$ ) nas densidades secas máximas, determinou-se seu valor utilizando-se os resultados das respectivas curvas de compactação aplicados na fórmula 07 obtendo-se: para S,  $e = 0,61$ ; S+PET com  $e = 0,66$ ; S+RCD com  $e = 0,47$  e S+PET+RCD com  $e = 0,45$ .

Fórmula 07:

$$e = \left( \frac{\gamma_g}{\gamma_d} \right) - 1$$

Os valores do índice de vazios das misturas confirmam que a inclusão de RCD provoca uma diminuição no índice de vazios das misturas deixando-o mais denso e necessitando, portanto, de menor quantidade de água para ser compactado quando comparado aos teores sem adição de RCD.

### 4.3 Permeabilidade

Este ensaio realizou-se para 4 composições, solo puro, solo com adição de fibra de PET, solo com adição de RCD e solo com adição de fibra de PET e RCD. Definiu-se para os teores de solo puro e solo com adição de fibra de PET e RCD as cargas hidráulicas inicial,  $h_1 = 119,5$  cm, e a final,  $h_2 = 59$  cm, já para os teores de solo com adição de fibra de PET e solo com adição de RCD, preferiu-se delimitar o tempo de ensaio, sendo 40 minutos e 1 hora respectivamente, e mediu-se o diâmetro interno da bureta utilizada,  $d_a = 2,9$  cm. Para cada corpo de prova fez-se 3 medições, obtendo assim o volume e a variação de tempo de cada um (Quadro 15).

Quadro 15: Dados de volume e variação de tempo das composições

Composição	Medições	$\Delta t$ (s)	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	V (ml)	$k_p$ (cm/s)
S	1	208	119,5	59	340	0,001826
	2	273	119,5	59	330	0,001391
	3	122	119,5	59	340	0,003114
S + PET	4	2400	119,5	116,2	15	0,000265
	5	2400	119,5	118,5	2,5	0
	6	2400	119,5	118,3	2,5	4,04E-05
S + RCD	7	6120	119,5	114,7	25	3,53E-06
	8	3600	119,5	115,7	13	4,74E-06
	9	3600	119,5	115,8	14	4,61E-06
S + PET + RCD	10	117	119,5	59	340	0,003183
	11	122	119,5	59	355	0,003052
	12	119	119,5	59	355	0,003129

Fonte: Própria, 2022

Calcula-se a média do  $k_p$  das 3 medições de cada teor para determinar o índice de permeabilidade do solo puro e das misturas (Quadro 16).

Quadro 16: Valor de coeficiente de permeabilidade do solo puro, solo com adição de RCD e solo com adição de fibra de PET e RCD

Composição	K
Solo +PET + RCD	$3,1 \times 10^{-3}$
Solo + RCD	$4,3 \times 10^{-6}$
Solo puro	$2,1 \times 10^{-3}$
Solo + PET	$1,0 \times 10^{-3}$

Fonte: Própria, 2022

De acordo com a NBR 15849:2010, valores de Kp superiores a  $10^{-4}$  podem ser utilizados sem a necessidade de impermeabilização complementar em aterros de pequeno porte, ou seja, dos valores representados acima, somente a mistura solo+RCD encontra-se apta para tal. Observando o quadro xx percebe-se que o solo puro e as misturas que possuem a adição da fibra de PET possuem um índice de permeabilidade próximos podendo ser associados a areias, com um grau médio de permeabilidade, já o solo com adição de RCD possui um grau de permeabilidade maior, podendo ser comparada a areias finas siltosas ou argilosas e a siltes argilosos, de acordo com o quadro 17.

Quadro 17: Classificação de permeabilidade

Coeficiente de Permeabilidade K (cm/s)	Grau de Permeabilidade Terzaghi & Peck (1967)	Tipo de Solo Mello & Teixeira (1967)
$10^9$ a 1	Alta	Pedregulhos
1 a $10^{-1}$		Areias
$10^{-1}$ a $10^{-3}$	Média	
$10^{-3}$ a $10^{-5}$	Baixa	
$10^{-5}$ a $10^{-7}$	Muito Baixa	
$< 10^{-7}$	Praticamente Impermeável	Argilas

Fonte: Santos, 2005

No quadro 18 estão representados valores de outros autores para permeabilidade, para fins de comparação.

Quadro 18: Dados de permeabilidade comparando com a norma e outros autores.

Autor	Tipo de solo	K (cm/s)	Finalidade
NBR 13896:1997	-	$< 5,0 \times 10^{-5}$	Impermeabilização
PRIM, Elivete C C. (2011)	Silto-argiloso com lodo	$1,2 \times 10^{-7}$	Cobertura de impermeabilização
MAGAGNATO, Matheus H; et al. (2019)	Areia argilosa	$2,0 \times 10^{-3}$	Não pode ser utilizado como impermeabilização
	Areia argilosa com 4% de cimento	$5,1 \times 10^{-5}$	Pode ser usado como impermeabilização
DOS SANTOS, Thais M. (2022)	Areia siltosa	$2,1 \times 10^{-3}$	Camada drenante
	Areia siltosa com fibra de PET	$1,0 \times 10^{-3}$	Camada drenante
	Areia siltosa com RCD	$4,3 \times 10^{-6}$	Pode ser usado como impermeabilização
	Areia siltosa com fibra de PET e RCD	$3,1 \times 10^{-3}$	Camada drenante

Fonte: Própria, 2022

As pesquisas acima citadas mostram que adições ao solo provocam, nestes casos, uma diminuição de permeabilidade dos solos, possibilitando a utilização destas como camada de aterro sanitário.

#### 4.4 PH

O ensaio foi realizado para o solo puro e para as misturas e os resultados os apresentados abaixo.

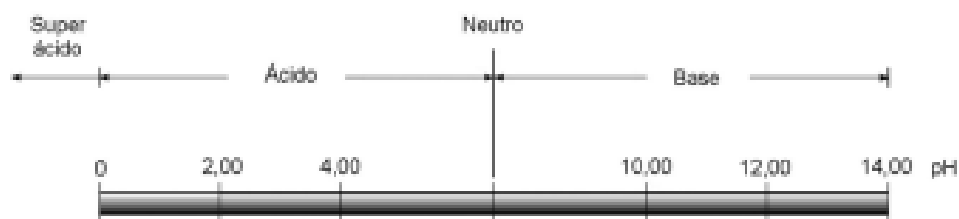
Quadro 19: PH dos teores analisados na pesquisa.

Composição	PH
Solo puro	8,52
Solo + PET	8,17
Solo + RCD	8,29
Solo + PET + RCD	8,20

Fonte: Própria, 2022

Observa-se no quadro a cima que tanto o RCD quando a fibra de PET diminuem o PH do solo, a fibra em uma proporção maior, e a mistura com 2 componentes também fica abaixo, entre os valores de cada mistura individual, e mais próxima do valor do solo + PET. De acordo com a escala de PH's (Figura 45) o solo puro e as misturas estão classificados alcalinos.

Figura 45: Escala de PH



Fonte: Andrade, 2010

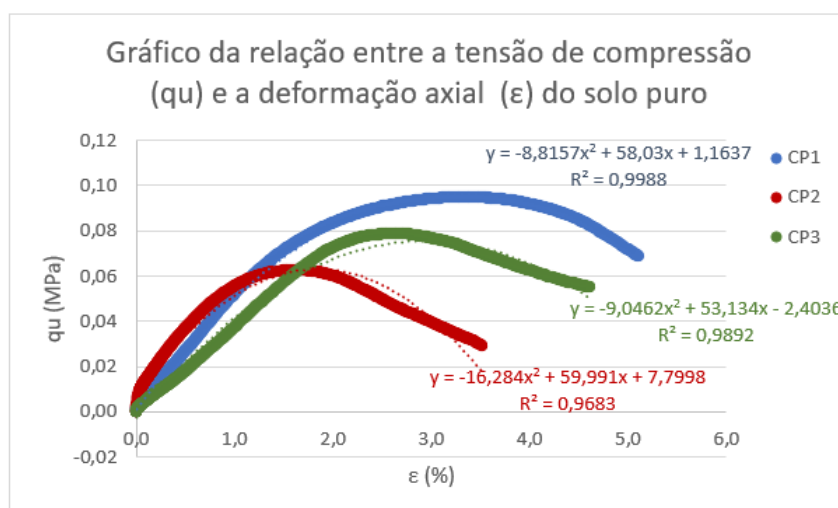
Observa-se que não houveram grandes influências no PH do solo com adições de fibra de PET e RCD, porém as verificações foram realizadas em um curto período de tempo, podendo haver modificações em outras condições.

#### 4.5 Resistência a compressão uniaxial

Conforme descreveu-se no método experimental desta pesquisa, moldou-se 3 CPs para cada teor de mistura, em prensa de ensaio universal devidamente calibrada.

A partir dos dados obtidos na prensa e da aplicação das formulações previstas em norma, gerou-se os gráficos apresentados a seguir.

Figura 46: Gráfico de compressão uniaxial de S



Fonte: Própria, 2022

Do gráfico acima obtém-se os valores da tensão de pico em cada corpo de prova (quadro 20).

Quadro 20: Tensão de compressão de S

	qu (Mpa)	ε (%)	qu médio (Mpa)	Desvio padrão
CP1	0,095	3,5	0,088	0,008
CP2	0,600	1,5		0,513
CP3	0,080	2,5		0,007

Fonte: Própria, 2022

Observando as curvas geradas percebeu-se que entre os três valores de tensão a compressão gerados um deles ficou fora da porcentagem admitida pela norma e desconsiderou-se este valor e fez-se a média entre os outros dois para a obtenção do valor da tensão de compressão do solo puro, sendo 0,088 MPa.

Abaixo está apresentado o quadro com os dados de controle, adquiridos dos corpos de prova antes da realização do ensaio na prensa e também o desvio padrão e a porcentagem de alteração considerando a densidade obtida no ensaio de compactação.

Quadro 21: Controle de qualidade dos CP's da mistura S.

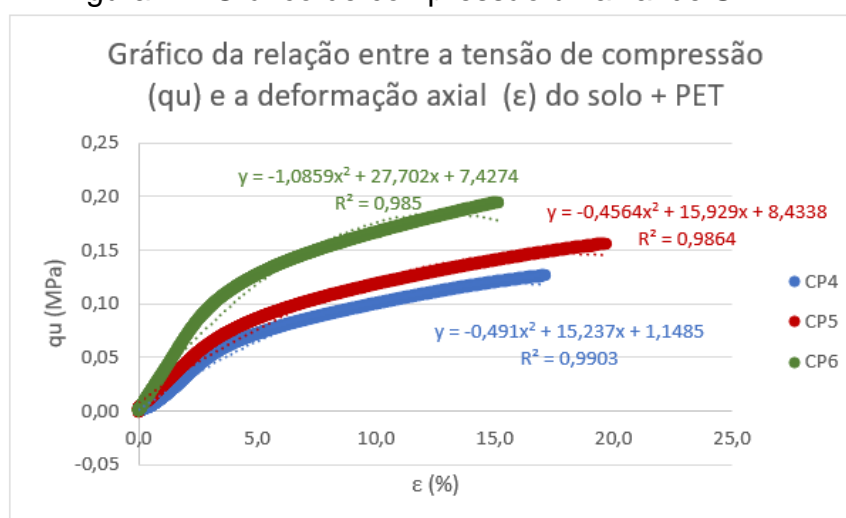
CP	φ (cm)	H (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	γw (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão
1	5,10	9,20	20,43	349,38	187,94	1,86	0,09
2	5,10	9,20	20,43	340,01	187,94	1,81	0,14
3	5,10	9,30	20,43	340,91	189,98	1,79	0,15

Fonte: Própria, 2022

Observa-se uma variabilidade máxima de 7,8% da massa específica do CP em relação à massa específica da curva de compactação.

Para a mistura S+PET obteve-se os seguintes gráficos de tensão de compressão para a deformação axial:

Figura 47: Gráfico de compressão uniaxial de S+PET



Fonte: Própria, 2022

A figura 47 mostra um comportamento onde não se verifica uma tensão máxima de compressão de pico e sim uma deformação plástica, decorrente da adição de fibra PET. Portanto, os resultados obtidos foram:

Quadro 22: Tensão de compressão média de S + PET

	qu (Mpa)	$\epsilon$ (%)	qu médio (Mpa)	Desvio padrão
CP4	0,140	17,0	0,150	0,01
CP5	0,160	19,0		0,01
CP6	0,190	14,9		0,04

Fonte: Própria

Nas curvas do solo com adição de fibra de PET não pode ser observado um pico, ou seja, não se tem um ponto de ruptura máxima, os CP's se deformam de forma constante sem que haja um rompimento. Novamente observa-se uma valor discrepante entre os três obtidos e calculou-se a média para os dois restantes, resultando em uma valor de tensão de compressão de 0,150 Mpa.

No quadro apresentado abaixo serão mostrados os dados de controle de qualidade dos corpos de prova utilizados para a cálculo da tensão de compressão média de solo + PET, comparando-os com os parâmetros da curva de compactação para esta mistura.

Quadro 23: Controle de qualidade de S + PET.

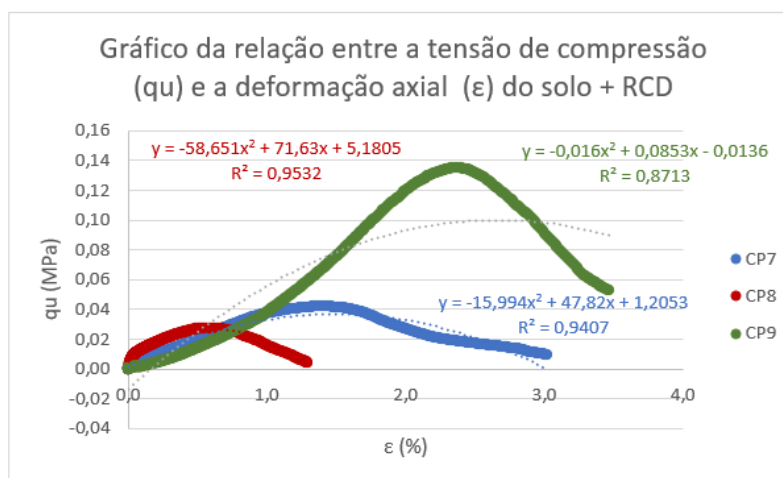
CP	$\phi$ (cm)	H (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão
4	4,90	9,30	18,86	338,29	175,37	1,93	0,00
5	5,00	9,30	19,63	348,44	182,61	1,91	0,02
6	5,00	9,40	19,63	354,00	184,57	1,92	0,01

Fonte: Própria, 2022

Neste caso houve uma variabilidade máxima de 0,9% da massa específica do CP em relação à massa específica obtida da curva de compactação.

Para a mistura de solo e RCD o resultado do ensaio de compressão simples é demonstrado na figura 48.

Figura 48: Gráfico de compressão uniaxial da mistura S+RCD



Fonte: Própria, 2022

O gráfico acima mostra uma tensão máxima de pico para o S+RCD, observou-se, no entanto uma discrepância grande entre os valores de tensão de pico obtidos como mostra o quadro 24.

Quadro 24: Tensão de compressão média de S + RCD

	qu (Mpa)	ε (%)	qu médio (Mpa)	Desvio padrão
CP7	0,043	1,5	0,091	0,048
CP8	0,028	0,5		0,063
CP9	0,139	2,5		0,048

Fonte: Própria, 2022

A mistura de solo com adição de RCD também apresenta pico de ruptura, menores que os valores obtidos para S, também excluiu-se o valor mais distinto entre os três obtidos no ensaio e em seguida calculou-se a tensão de compressão média, sendo ela 0,091 Mpa.

No quadro xx estão apresentados os dados de controle de qualidade dos CP's moldados com a mistura de solo com RCD, em comparação com a densidade seca máxima e umidade ótima da curva de compactação da mistura.

Quadro 25: Controle de qualidade de S + RCD.

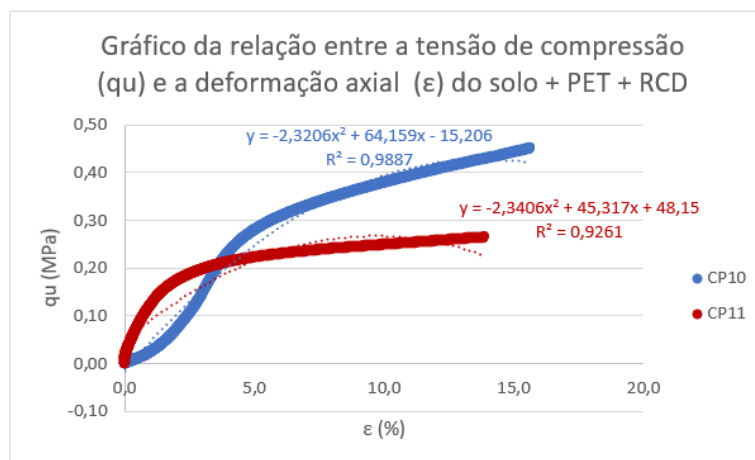
CP	φ (cm)	H (cm)	A (cm²)	m (g)	V (cm³)	γw (g/cm³)	Desvio padrão
7	5,00	9,20	19,63	301,62	180,64	1,67	0,38
8	5,10	9,30	20,43	310,59	189,98	1,63	0,42
9	5,10	9,30	20,43	314,98	189,98	1,66	0,40

Fonte: Própria, 2022

Houve uma variabilidade elevada de densidade com a relação a curva de compactação, de 20,4%, porém, a variabilidade entre o CP's moldados foi baixa, na ordem de xx.

Para a mistura S+PET+RCD, o resultado obtido no ensaio de compressão simples é mostrado na figura 49.

Figura 49: Gráfico de compressão uniaxial da mistura S+PET+RCD



Fonte: Própria, 2022

Quadro 26: Tensão de compressão média de S + PET + RCD

	qu (Mpa)	ε (%)	qu médio (Mpa)	Desvio padrão
CP10	0,450	16,0	0,365	0,085
CP11	0,280	14,0		0,085

Fonte: Própria, 2022

Para a mistura de solo com adição de fibra de PET e RCD um dos corpos de prova rompeu-se durante o processo de posicionamento da prensa, restando apenas dois para a realização do ensaio. Neste caso também não pode-se observar o pico de ruptura e a média da tensão de compressão resultou em 0,365 Mpa.

Para o controle de qualidade gerou-se os dados apresentados abaixo, no entanto, há uma grande discrepância entre os valores utilizados para está média, o ideal seria repetir a moldagem e ruptura dos CP's mas, por não se dispor de mais tempo para a realização da pesquisa, aceitou-se os resultados obtidos.

Quadro 27: Controle de qualidade de S + PET + RCD

CP	φ (cm)	H (cm)	A (cm²)	m (g)	V (cm³)	γw (g/cm³)	Desvio padrão
10	5,20	9,50	21,24	324,77	201,75	1,61	0,49
11	5,10	9,30	20,43	324,68	189,98	1,71	0,39

Fonte: Própria, 2022

Para a mistura de solo com fibra de PET e RCD houve uma variabilidade máxima de 23,4% da massa específica do CP em relação à massa específica da curva de compactação. Entre os CP's a variabilidade da massa específica foi inferior a 5,85% e essa variabilidade pode explicar a diferença entre os valores obtidos para os CP's, pode ter havido algum problema na moldagem dos CP's.

O quadro abaixo representa os valores de tensão de compressão, deformação axial e resistência ao cisalhamento.

Quadro 28: Representação dos dados de resistênica à compressão (qu) e resistênica ao cisalhamento (su) das composições

Composição	qu (Mpa)	su (Mpa)
S	0,0880	0,0440
S + PET	0,1500	0,0750
S + RCD	0,0910	0,0455
S + PET + RCD	0,3650	0,1825

Fonte: Própria, 2022

Analisando os dados percebe-se que as curvas que possuem fibra de PET em sua mistura não apresentaram pico de ruptura, elas deformam de forma constante apesar do aumento de carga, acredita-se que as fibras de PET mantenham o solo o solo deformando sem ruptura por mais tempo, ou seja, a fibra PET provoca nos CPs um entrelaçamento entre as partículas constituintes do solo distribuindo as tensões aplicadas e promovendo uma maior deformação mantendo um comportamento plástico na mistura. Este entrelaçamento era visível após a ruptura dos CPs quando se manuseava o material rompido e percebia-se a quão incorporada à mistura estavam as fibras.

A curva da mistura S+ RCD observa-se ser a mais frágil, suportando uma carga menor antes da ruptura, se comparados à mistura com fibras. Porém a mistura de S+PET+RCD foi para a qual obteve uma maior tensão máxima de ruptura, para representar essas diferenças calculou-se a média entre os valores de tensão a ruptura e comparou-se com o solo puro, todos os valores em porcentagem.

Quadro 29: Porcentagem de alteração das misturas em relação ao solo puro

Composição	qu (Mpa)	Alteração em relação ao solo puro
S	0,088	-
S + PET	0,150	70,45%
S + RCD	0,091	3,41%
S + PET + RCD	0,365	314,77%

Fonte: Própria, 2022

Todas as misturas suportaram uma porcentagem a mais de carga do que o solo puro, observa-se no quadro a cima, sendo a composição de solo com adição de fibra de PET e RCD a mais resistente, chegando a mais de 300% superior.

#### 4.6 Resistência a tração por compressão diametral

Os 3 CPs de cada teor estudado, moldados e armazenados como descrito no método experimental desta pesquisa, foram submetidos ao ensaio de compressão diametral objetivando-se determinar a resistência a tração das misturas. Posicionou-se cada um deles no acessório de ensaio e o conjunto foi colocado na prensa, em seguida inicia-se a aplicação da carga. A força máxima de ruptura pela prensa foi então utilizada na fórmula 08, juntamente com o diâmetro e o comprimento do CP para se obter a resistência a tração. O resultado para cada mistura é a média obtida entre os valores de resistência de cada teor analisado.

Formula 08: Resistência à tração por compressão diametral

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d l}$$

Fonte: NBR 7222:2011

$f_{ct,sp}$  = Resistência à tração por compressão diametral (Mpa)

F = Força máxima obtida no ensaio (N)

d = Diâmetro do corpo de prova (mm)

l = Comprimento do corpo de prova (mm)

Para S e S+RCD houve a perda de um corpo de prova, ocasionando a existência de apenas 2 valores para obtenção do valor médio.

Quadro 30: Resultados da resistência à tração e porcentagem de alteração das misturas e relação ao S.

Composição	Corpo de prova	fct,sp (Mpa)	fct,sp Médio (Mpa)	Alteração em relação ao solo puro
S	1	0,0180	0,0189	-
	2	0,0198		
S + PET	3	0,0324	0,0332	75,7%
	4	0,0309		
	5	0,0363		
S + RCD	6	0,0158	0,0156	-17,2%
	7	0,0155		
S + PET +RCD	8	0,0538	0,0536	183,6%
	9	0,0605		
	10	0,0465		

Fonte: Própria, 2022

Observando-se o quadro a cima percebe-se que, comparando-se a resistência a tração de S com S+RCD há uma queda na resistência à tração (-20%), ou seja, a incorporação das partículas menores que 0,42mm de RCD não provocam ganhos da resistência a tração da mistura.

Os teores S+PET e S+PET+RCD mostram valores resistência à tração superiores a S, na ordem de 80% e 180% respectivamente.

Dentre os teores analisados a composição S+PET+RCD foi a que apresentou valores mais elevados de resistência à tração. Este resultado está relacionado a forma como a fibra interage com as partículas de solo que, assim, como na análise realizada para resistência à compressão simples, provoca um entrelaçamento nos grãos distribuindo as tensões no solo e provocando um aumento no valor máximo resistido.

No quadro abaixo estão representados os dados de controle de qualidade dos corpos de prova utilizados para a realização do ensaio em relação à curva de compactação.

Quadro 31: Controle de qualidade dos CP's do ensaio de compressão diametral

Composição	CP	$\phi$ (cm)	H (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão
S	4	5,10	9,20	20,43	343,09	187,94	1,83	0,12
	5	5,20	9,30	21,24	340,21	197,51	1,72	0,22
	6	5,10	9,20	20,43	343,60	187,94	1,83	0,12
S+PET	4	5,10	9,30	20,43	348,03	189,98	1,83	0,09
	5	5,1	9,3	20,43	359,63	189,98	1,89	0,03
	6	5,1	9,3	20,43	360,23	189,98	1,90	0,03
S+RCD	4	5,00	9,30	19,63	324,57	182,61	1,78	0,28
	5	5,10	9,30	20,43	326,93	189,98	1,72	0,33
	6	5,10	9,30	20,43	327,03	189,98	1,72	0,33
S+PET+RCD	4	5,10	9,40	20,43	318,76	192,03	1,66	0,44
	5	5,10	9,40	20,43	315,91	192,03	1,65	0,46
	6	5,10	9,40	20,43	314,94	192,03	1,64	0,46

Fonte: Própria, 2022

Observa-se que houve variabilidade entre a massa específica dos Cp's e a obtida em cada respectiva curva de compactação porém, entre as composições, não houve variabilidade maior que 5%.

Realizou-se também a tabela e gráfico da relação entre a compressão uniaxial e a compressão diametral, esses dados serão apresentados abaixo.

Quadro 32: Relação entre compressão uniaxial ( $q_u$ ) e compressão diametral ( $q_t$ )

Composições	$q_t$ (Mpa)	$q_u$ (Mpa)	$q_t/q_u$ (Mpa)
S	0,0189	0,088	0,215
S + PET	0,0332	0,080	0,415
S + RCD	0,0156	0,036	0,435
S + PET + RCD	0,0536	0,260	0,206

Fonte: Própria, 2022

As maiores relações entre a resistência à tração de compressão são das misturas S+PET e S+RCD. A incorporação dos dois resíduos ao solo, provocou uma ligeira redução nesta relação (4,2%), ou seja, aparentemente, o ganho de resistência provocado pela adição de fibra de PET compensa a perda provocada pela adição de RCD.

No quadro abaixo serão apresentados dados comparativos de resistências desta pesquisa com resultados de outros autores.

Quadro 33: Dados comparativos de resistência

Autor	Tipo de solo	Fibra	Proporção	qt (Mpa)	qu (Mpa)
GOULART, Daniel S. (2020)	Arenoso	-		0,0019	-
	Arenoso	Polipropileno	1 kg/m <sup>3</sup>	0,0062	-
	Arenoso	Sisal	1 kg/m <sup>3</sup>	0,0065	-
SILVEIRA, Maite R. (2019)	Arenoso	PET	1%	-	0,096
WINTER, Daniel. (2018)	Arenoso	Vidro	10%	-	0,099
	Arenoso	Vidro	20%	-	0,252
DOS SANTOS, Thais M. (2022)	Areia siltosa	PET	1%	0,0189	0,088

Fonte: Própria, 2022

## 5 CONCLUSÕES

Com o objetivo de se verificar as melhorias obtidas pela adição de fibra de PET e RCD em solo a ser utilizado em aterro sanitário de pequeno porte, concluiu-se que:

- a) Nos parâmetros de compactação a adição de RCD provocou uma diminuição dos vazios e um aumento na massa específica aparente seca da mistura, tornando-a mais densa, enquanto a adição de fibra PET provocou um aumento na umidade ótima e diminuição na massa específica aparente seca da mistura, tornando-a mais leve. Para a mistura de S+PET+RCD houve uma queda na umidade ótima e um aumento na massa específica aparente seca, tornando-a mais densa.
- b) O valor obtido de K para S, S+PET e S+PET+RCD faz com que possam ser utilizados como camada drenante em aterros sanitários, aproveitando-se assim os resíduos estudados, porém as misturas não possuem um valor de K da ordem de  $10^{-4}$  ou inferior que possibilitem o uso deste material dispensando uso de camada impermeabilizante complementar.
- c) O valor do coeficiente de permeabilidade das misturas mostrou-se maior na mistura S+RCD ficando na ordem de  $10^{-6}$ . Para as demais misturas analisadas a condutibilidade hidráulica manteve-se na ordem de  $10^{-3}$ , como ocorre para S, ou seja, sob a ótica da NBR 15849:2010 apenas a mistura S+RCD pode ser utilizada como camada impermeável para aterros de pequeno porte.
- d) A resistência à compressão simples das misturas foi maior para S+PET+RCD ficando 3,15 vezes maior do que S. As demais misturas apresentaram valores de resistência inferiores a S, sendo que S+RCD apresentou a menor dentre as misturas analisadas.
- e) Em relação à resistência à tração a mistura S+PET+RCD apresentou o maior valor ficando 1,8 vezes maior que S, enquanto S+PET apresentou um resultado 0,8 vezes maior que S e, S+RCD apresentou uma resistência à tração menor que S. Tornando-se assim uma boa opção em relação a compressão, pois é um material

com deformação constante e sem ruptura abrupta, apesar da carga aplicada. Ou seja, as misturas com adição de PET mostram aumento na resistência à tração.

- f) O ph de S e, S+PET, S+RCD, S+PET+RCD se manteve por volta de 8 sendo considerado alcalino, na mistura recente. Não se estudou a alteração do Ph ao longo do tempo onde estes valores podem variar.

Para finalizar, sob a ótica da NBR 15849:2010 verificou-se que a mistura S+RCD foi a que apresentou o coeficiente de condutibilidade hidráulica adequado para que este material seja utilizado como camada impermeabilizante de aterro de pequeno porte. A resistência a compressão da mistura foi ligeiramente superior a do solo puro, a tração, ligeiramente menor em relação ao mesmo. Ou seja, entre as misturas estudadas, S+RCD mostra-se mais adequado para cumprir os pré-requisitos da referida norma.

No entanto, as demais misturas mostram ganhos do ponto de vista mecânico com aumento das resistências pela inserção da fibra PET e, ao mesmo tempo, a inserção desta, não provocou a diminuição do gradiente hidráulico e, portanto, não estando aptas a serem utilizadas como camada impermeabilizante única. Porém, estas podem ser utilizadas desde que com a adição de elemento de impermeabilização.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Julga-se interessante a verificação da alteração de PH do solo com as adições ao longo do tempo, bem como estudar variados teores de fibra de PET e RCD acrescentados nas misturas, obtendo-se talvez um teor ótimo que possibilite a utilização de ambos em camada impermeabilizante. Indica-se também, a realização de testes em campo a modo de observar a trabalhabilidade das misturas em condições práticas da execução de camadas, além de se verificar as propriedades de compressibilidade e adensamento dos aterros.

## REFERÊNCIAS

ABIPLAST. **Perfil 2020, a indústria de transformação e reciclagem de plástico no Brasil**. 2020.

ARTUSO, Fabiana; et al. **Estudo do efeito do aumento de resistência à compressão simples ao longo do tempo em resíduos de construção e demolição (RCD)**. 2016. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia geotécnica, 2016, Belo Horizonte – MG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Brasil. 2016  
\_\_\_\_\_. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Brasil. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Brasil. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Brasil. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Brasil. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Brasil. 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Brasil. 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12770**: Solo – Determinação da resistência a compressão não confinada de solo coesivo. Brasil. 2022.

\_\_\_\_\_. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Brasil. 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Brasil. 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – aterros sanitários de pequeno porte – diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Brasil. 2010.

BOSCOV, Maria E G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

BROERING, Wellington B; SILVA, Patricia O. **Caracterização geotécnica e dimensionamento de pavimentos semirrígidos em solos residuais de Biguaçu/SC**. 2018. Dissertação (Engenharia Civil) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2018.

CÂNDIDO, Felipe L; et al. **Avaliação de blocos de concreto produzidos com PET reciclado**. 2014. XV Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído (ENTAC), Maceió – AL, 2014.

CANELLAS, Susan S; D'ABREU, José C. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. 2005. XXI ENTMME, Natal – RN, 2005.

COSTA, Lívia I; et al. **Efeito da adição do politereftalato de etileno (PET) e cal no comportamento mecânico de um solo areno-argiloso para aplicação em rodovia**. 2019. Jornada de educação, ciência e tecnologia 2019, Instituto Federal do Ceará.

DIAS, Mônica C C. **Viabilidade do uso de solo tropical e resíduos da construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário**. 2014. Dissertação (Engenharia civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2014.

DRANKA, Ricardo B. 2016. Dissertação (Engenharia civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

GOULART, Daniel S. **Influência do tipo de fibra no comportamento mecânico de um solo arenoso cimentado sob ações estáticas e dinâmicas**. 2020. Dissertação (Mecânica dos solos e engenharia geotécnica) – Universidade de Coimbra. 2020.

IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil**. 2021.

KANAAN, Saed H H. **Análise da resistência a compressão de um solo arenoso com a adição de fibras provenientes de garrafa PET**. 2018. Dissertação (Engenharia civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.

MAGAGNATO, Matheus H; et al. **Avaliação do coeficiente hidráulico de solos arenosos a partir de acréscimos percentuais gradativos de cimento visando a impermeabilização de fundos de aterros e lagos de estabilização**. 2019. ANAP Brasil – Revista científica, v. 12, n.25. 2019.

MARIANO, Victor M Q; BUENO, Maruska T N S. **Análise da capacidade de suporte em solos finos misturados com fibra de garrafa PET para uso em obras rodoviárias**. 2018. VII Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e

Sustentabilidade, 2018, São Paulo – SP.

PESSANHA, Victor H M. **Caracterização e compactação de misturas de solo argiloso com resíduos da construção civil**. 2019. Geocentro, 2019, Brasília – DF.

PINTO, Luiz E M; et al. **Estudo de viabilidade do uso de resíduo PET em obra rodoviária**. 2010. I Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2010, Bauru – SP.

PIVETTA, Carlise P; VENDRUSCOLO, Márcio A. **Análise de solo compactado com resíduo de construção e demolição**. 2017. XXV Seminário de Iniciação Científica, 2017, Rio Grande do Sul.

PORTELLA, Márcio O; RIBEIRO, José C J. **Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos**. 2014. Revista direito ambiental e sociedade, v.4, n. 1, 2014 (p. 115 – 134).

PRIM, Elivete C C. **Utilização de lodo de estação de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. 2011. Dissertação (Engenharia ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

REIS, Klauber H; JUNIOR, Ilçó R. **Reforço de um solo residual expansivo com fibra de poliéster oriundas do PET**. 2011. II Geocentro, 2011, Brasília – DF.

SACHETTI, Álisson S. **Solo reforçado com cal e fibras de polipropileno: comportamento quando submetido à compressão triaxial**. 2012. Dissertação (Engenharia civil) – Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, Eder C G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. Dissertação (Geotecnia) – Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTOS, Larissa D F. **Estudo do comportamento do solo melhorado com cimento**. 2017. Dissertação (Engenharia civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

SANTOS, Mauricio M. **Avaliação hidrogeológica para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero freático em área selecionada na cidade de londrina (PR)**. 2005. Dissertação (Geociências) - Universidade estadual paulista instituto de geociências e ciências exatas, Rio Claro, São Paulo, 2005.

SCHUCH, Fernanda S; et al. **Melhorias de solo residual de gnaise compactado com adição de fibra PET**. 2021. II Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, 2021, evento online.

SILVA, Karine T. **Projeto de um aterro sanitário de pequeno porte**. 2016. Dissertação (Engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, Margarete B L. **Novos materiais a base de resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos de produção de cal (RPC) para uso na construção civil**. 2014. Dissertação (Engenharia e ciência dos materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

VALT, Renata B G. **Análise do ciclo de vida de embalagens de PET, de alumínio e de vidro para refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais**. 2004. 209 f. Dissertação (Engenharia de processos térmicos e químicos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.