



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

ADRIANO FEITOSA ISAIAS

**PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE SOLO ARGILOSO E FIBRAS DE
POLIPROPILENO**

FORTALEZA

2022

ADRIANO FEITOSA ISAIAS

PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE SOLO ARGILOSO E FIBRAS DE
POLIPROPILENO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

I74p

Isaias, Adriano Feitosa.

Permeabilidade de misturas de solo argiloso e fibras de polipropileno / Adriano Feitosa Isaias. – 2022.
49 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Solo reforçado. 2. Permeabilidade. 3. Fibras de polipropileno. 4. Camada impermeabilizante. I. Título.

CDD 628

ADRIANO FEITOSA ISAIAS

PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE SOLO ARGILOSO E FIBRAS DE
POLIPROPILENO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. Área de concentração: Geotecnia Ambiental.

Aprovada em: ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Mariana Vela Silveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Deyvid de Souza Elias
Centro Universitário 7 de Setembro (UNI7)

Dedico este trabalho à minha mãe, Luiza, por ser minha inspiração e meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pela força e saúde concedidos para que eu pudesse trilhar minha jornada.

Aos meus pais, Luiza e José, por todo amor, apoio e exemplo que sempre me proporcionaram e pelos sólidos valores com os quais moldo minha personalidade.

A todos os meus queridos irmãos, Lena, Leda, Antônio, André, Anacleto, Célio e Clécio, e às minhas cunhadas, Alcileide e Daniele, pelo amor e apoio em todos os momentos.

Ao Lucas, pelo carinho, atenção, companheirismo e pelo apoio e incentivo que tem dado nos últimos anos e em especial no período da execução deste trabalho.

Ao professor Dr. Anderson Borghetti, agradeço a excelente orientação, compreensão, paciência, pela sugestão do tema e pela grandiosa contribuição na elaboração deste trabalho.

Agradeço à banca examinadora, Prof.^a Dra. Mariana Vela e Prof. Me. Deyvid de Souza por aceitar o convite, pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho e pelas colaborações e sugestões.

Ao Prof. Me. Deyvid de Souza, também agradeço pela contribuição no planejamento dos ensaios laboratoriais.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC), por todo apoio na realização dos ensaios. Em especial, ao Anselmo, Roberto e Ciroca.

À empresa Maccaferri Brasil por doar as fibras utilizadas na pesquisa e por apoiar tantas outras pesquisas.

Aos amigos do Apê 401, Victória, Gracinha, Ygor, Ana Katrine, Jordana e Davi, pelos momentos de descontração e alegria. Em meio às dificuldades de morar longe da família, vocês me propiciaram um verdadeiro lar onde pude viver momentos inesquecíveis.

Ao amigo Daniel Alexandre por toda ajuda e companheirismo no início da graduação.

Aos colegas do grupo Aprovações Infinitas, Aline, Flávio Lucas, Jonathan, Natasha, Natália e Ester, pela parceria e ajuda nos inúmeros trabalhos e atividades realizados nesses cinco anos.

A todos os colegas de curso, pelos momentos de aprendizado e descontração.

Agradeço a todos os colegas e amigos do Instituto Federal do Ceará – Campus Maracanaú, onde iniciei minha jornada na Engenharia Ambiental, em especial, aos meus

queridos amigos, Camila Feitosa, Jéssica Leite, Gabriella Viana, Thaís Gomes e João Mendes. Obrigado pelo acolhimento, companheirismo e amor que vocês sempre me proporcionaram.

À Enactus UFC, pelos inúmeros momentos de aprendizado, conquistas e experiências enriquecedoras durante os anos que tive a honra de participar dos projetos desenvolvidos. E pelos grandes amigos, Marcos Alex, Fernanda, Érica, e tantos outros que conheci, obrigado por todas as experiências.

Agradeço também à empresa Braslimp e todos os seus colaboradores, pela rica experiência profissional no universo gerenciamento de resíduos sólidos e logística.

À Universidade Federal do Ceará, em especial à Pró-Reitoria de Assuntos Estudantis, por me propiciar a concessão de bolsa remunerada no Programa de Iniciação Acadêmica, e pelo grande apoio advindo do Programa de Moradia Universitária.

A todos os professores do curso de Engenharia Ambiental da UFC e do IFCE-Maracanaú, que com maestria e dedicação me proporcionaram momentos de valiosos aprendizados.

A todos, Muito Obrigado!

“A única pessoa que você está destinado a se tornar é a pessoa que decide ser.”

Ralph Waldo

RESUMO

A utilização de fibras como reforço de solos é uma técnica fundamentada na tecnologia dos materiais compósitos, onde se busca criar um novo material com propriedades e características específicas através da combinação de dois ou mais materiais conhecidos. Esses materiais constituem uma boa alternativa para solucionar problemas geotécnicos, pois tendem a aumentar a resistência do solo em relação à condição natural. No entanto, na literatura há poucos estudos que investiguem o comportamento da permeabilidade em solos reforçados com fibras com vistas em sua utilização em camadas impermeabilizantes de cobertura de aterros de resíduos. Dessa forma, o presente trabalho, busca avaliar a influência na permeabilidade provocada pela inserção de fibras de polipropileno (teor de 0,5 e 1,0% em relação ao peso de material seco) de 6mm de comprimento e 18 μ m de diâmetro. O programa experimental constou de ensaios de caracterização geotécnica do solo e ensaios de compactação e de permeabilidade saturada no solo e no compósito de modo a verificar se ocorrem mudanças significativas na permeabilidade do solo com a inclusão de fibras de polipropileno, com vista em aplicações futura em camadas de impermeabilização de coberturas de aterros de resíduos. A análise global dos resultados indicou a classificação do solo como argiloso e a partir dos ensaios de compactação foi possível observar, através das curvas de compactação, uma leve redução da massa específica aparente seca máxima e um aumento da umidade ótima com o aumento dos teores de fibras de polipropileno na mistura. Já em relação à permeabilidade do solo argiloso e das misturas de solo e fibras, constatou-se que houve aumento da permeabilidade com o aumento dos teores de fibras. Contudo, esse acréscimo geral não foi tão significativo para alterar a ordem de magnitude do valor de permeabilidade.

Palavras-chave: solo reforçado; permeabilidade; fibras de polipropileno; camada impermeabilizante.

ABSTRACT

Using fibers as soil reinforcement is a technique based on composite materials technology, where it seeks to create a new material with specific properties and characteristics through the combination of two or more materials already known. These materials are a good alternative to solve geotechnical problems, as they use to increase soil resistance compared to the natural condition. However, in the field of study there are just few surveys that investigate the conduct of permeability by soil reinforcement with fibers, in attention to their use as waterproof layers that cover waste landfills. Thus, this research seeks to evaluate the influence on the permeability presented by the insertion of polypropylene fibers (content of 0.5 and 1.0% from the dry material weight) of 6mm in length and 18 μ m in diameter. The experiment consisted of tests such as geotechnical characterization of soil, compaction measuring and saturated permeability on the soil and on the composite tests, in order to verify if there are significant changes in soil permeability with the inclusion of polypropylene fibers, with a view to future applications in waterproofing layers of waste landfill covers. A global analysis of the experiment results indicated the classification of the soil as clayey, and from the compaction tests it was possible to see, through the compaction curvatures, a soft reduction in the maximum dry apparent specific mass and an increase in the optimal moisture with the rate increasing of fiber of polypropylene in the mixture. As for the permeability of the clayey soil and the soil and fiber mixed, it was possible to check that there is a proportion of the increase in permeability with the increase in fiber contents. However, this general increase was not significant enough to change the permeability's magnitude value.

Keywords: reinforced soil; permeability; polypropylene fibers; waterproof layers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Principais elementos presentes em um aterro sanitário.....	17
Figura 2	– Esquema ilustrativo da cobertura ou revestimento impermeável superior.....	19
Figura 3	– Classificação do solo de acordo com o diâmetro dos grãos.....	21
Figura 4	– Efeitos da compactação na estrutura do solo.....	22
Figura 5	– Permeabilidade ao longo da curva de compactação.....	23
Figura 6	– Influência da energia de compactação no comportamento do solo.....	23
Figura 7	– Curva de retenção típica do solo.....	24
Figura 8	– Fluxograma dos ensaios utilizados na pesquisa.....	31
Figura 9	– Fibras de polipropileno.....	32
Figura 10	– Amostras: (a) Solo e 0,5% de fibras; (b) Solo e 1,0% de fibras	33
Figura 11	– Curva granulométrica.....	36
Figura 12	– Gráfico de liquidez.....	37
Figura 13	– Curvas de compactação solo natural e solo-fibras.....	38
Figura 14	– Compactação: (a) Solo+0,5% de fibras; (b) Solo+ 1,0% de fibras	40
Figura 15	– Efeito da adição de fibras na permeabilidade das amostras.....	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Contribuição percentual das regiões do Brasil no total de RSU coletados.... 16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos para camada de impermeabilização.....	20
Tabela 2 – Valores típicos de condutividade hidráulica pelo tipo de material.....	21
Tabela 3 – Especificações das fibras utilizadas na pesquisa.....	32
Tabela 4 – Normas utilizadas nos ensaios de caracterização geotécnica.....	32
Tabela 5 – Nomenclaturas utilizadas para as amostras.....	34
Tabela 6 – Índices Físicos	37
Tabela 7 – Plasticidade do solo pelos limites de Atterberg.....	37
Tabela 8 – Classificação do solo	37
Tabela 9 – Parâmetros obtidos pelas curvas de compactação.....	39
Tabela 10 – Coeficientes de permeabilidades (k) pelos ensaios de laboratórios.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CCL	Compacted Clay Liner
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
HRB	Highway Research Board
IFCE	Instituto Federal do Ceará
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PET	Polietileno Tereftalato
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SUCS	Sistema Universal de Classificação de Solos
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

A6	Solo argiloso
G_s	Densidade real dos grãos
k	Coefficiente de permeabilidade
SC	Areia argilosa
%	Porcentagem
Δh	Variação da carga total
θ_r	Teor de umidade volumétrica residual
θ_s	Teor de umidade volumétrica saturada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	15
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Geração de resíduos sólidos	16
2.2	Aterros sanitários	17
2.3	Sistemas de coberturas de aterros de resíduos	18
<i>2.3.1</i>	<i>Camada impermeabilizante</i>	20
2.4	Parâmetros hidráulicos	24
<i>2.4.1</i>	<i>Curva de retenção de água no solo</i>	24
<i>2.4.2</i>	<i>Permeabilidade saturada</i>	25
<i>2.4.3</i>	<i>Permeabilidade não saturada</i>	26
2.5	Solos reforçados com fibras	26
<i>2.5.1</i>	<i>Tipos de fibras utilizadas como reforço</i>	26
<i>2.5.1.1</i>	<i>Fibras poliméricas</i>	27
<i>2.5.2</i>	<i>Comportamento de misturas solo-fibras</i>	28
<i>2.5.2.1</i>	<i>Compactação</i>	29
<i>2.5.2.2</i>	<i>Permeabilidade</i>	30
3	METODOLOGIA	31
3.1	Fibras de polipropileno	31
3.2	Ensaio geotécnicos	32
<i>3.2.1</i>	<i>Preparação das amostras</i>	33
<i>3.2.2</i>	<i>Análise granulométrica</i>	34
<i>3.2.3</i>	<i>Limites de consistência</i>	34
<i>3.2.4</i>	<i>Densidade real</i>	35
<i>3.2.5</i>	<i>Ensaio de compactação</i>	35
<i>3.2.6</i>	<i>Ensaio de permeabilidade</i>	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Análise granulométrica	36

4.2	Limites de consistência	36
4.3	Classificação do solo	37
4.4	Densidade real dos grãos	38
4.5	Ensaio de compactação	38
4.6	Ensaio de permeabilidade	40
4.7	Análise dos resultados	41
5	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

O solo é um dos materiais mais importantes na construção civil, sendo empregado em diferentes projetos de engenharia. Estruturas da construção civil e da engenharia geotécnica são assentadas sobre o solo e em algumas delas, como nos aterros, o solo é o principal constituinte, fazendo parte da estrutura. Portanto, compreender as propriedades do solo é de suma importância na engenharia geotécnica.

Contudo, o solo é uma mistura heterogênea composta por grãos, materiais orgânicos, água e ar, com comportamento complexo e variável. Quando o solo não apresenta propriedades compatíveis às necessidades de projeto, são utilizadas alternativas que permitem adequar suas propriedades, como a possível inclusão de algum agente estabilizante ou com a inclusão de elementos resistentes (geotêxteis, fibras, grelhas, tiras), ou até a remoção completa e substituição do material (CASTRO, 2020).

A utilização de fibras como reforço de solos tem se tornado vantajosa, principalmente em casos onde se tem solos com baixa capacidade de suporte, podendo ser destacado alguns exemplos de aplicação em fundações superficiais, em coberturas de aterros sanitários, em pavimentação, em estruturas de contenção e na estabilização de solos.

A técnica de reforçar solos com fibras tem demonstrado eficiência, quando estas são distribuídas aleatoriamente no solo, devido à melhoria nas propriedades mecânicas que consegue conferir a estes materiais um aumento na resistência (FEUERHARMEL, 2000; CASAGRANDE, 2001).

Heineck (2002), cita que a área ambiental tem grande potencial de utilização de fibras, podendo ser utilizadas em camadas impermeabilizantes de cobertura para melhorar as propriedades mecânicas das argilas. O recalque não uniforme dos resíduos dentro do aterro pode provocar deformações excessivas e fissuração nessas camadas, afetando seu desempenho. Assim, a melhoria das propriedades mecânicas de uma argila, como consequência da inclusão de fibras, poderá ser útil na manutenção da integridade estrutural da camada. De acordo com TANG *et al.*, (2012), a adição de fibras pode aumentar a resistência a trincas e aumentar a permeabilidade de camadas de solos argilosos. Desse modo, é necessário analisar o teor ótimo de fibras a ser utilizado em camada de impermeabilização que é aquele capaz de proporcionar maior estabilidade volumétrica, sem exceder os valores aceitáveis de permeabilidade.

A metodologia utilizada na pesquisa consistiu na realização da caracterização geotécnica de um solo argiloso, e na análise dos parâmetros de compactação e de

permeabilidade de um solo natural e reforçado com diferentes teores de fibra de polipropileno, por meio de ensaios de laboratório utilizados na geotecnia convencional, visando contribuir no entendimento do comportamento hidráulico de misturas solo-fibras de polipropileno, como vista em aplicações como camada de cobertura impermeabilizante de aterros de resíduos.

O presente trabalho gira em torno da verificação da permeabilidade de um material compósito e do seu potencial de aplicação em camadas de cobertura de aterro sanitário. Assim, é imprescindível que ao final do trabalho que se possa responder perguntas como: “*haveria aumento da permeabilidade com o aumento do teor de fibras?*”; “*em relação ao solo natural, este aumento é relevante?*”. Dessa forma, espera-se que em posse das respostas, possa-se sugerir a aplicação para esse material, respondendo às questões que giram em torno da temática central.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar a permeabilidade de misturas de solo argiloso com diferentes teores de fibras de polipropileno, com vistas em utilização em camadas impermeabilizantes em camadas de cobertura de aterros de resíduos.

1.1.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar caracterização geotécnica de um solo argiloso passível de utilização como material impermeabilizante de cobertura de aterros sanitários;
- Obter parâmetros de compactação do solo natural e das misturas de solo e fibra em diferentes teores, de modo a verificar possíveis modificações na estrutura do compósito em relação ao solo natural;
- Realizar ensaios de permeabilidade de um solo argiloso e das misturas de solo-fibra, de modo a analisar possíveis mudanças nos coeficientes de permeabilidade com inclusão de diferentes teores de fibras no solo estudado.

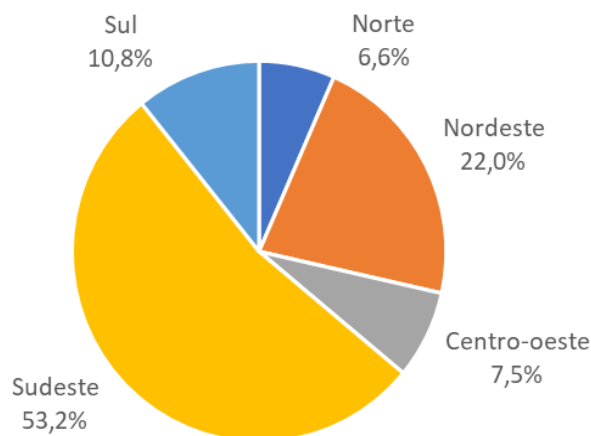
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Geração de resíduos sólidos

A gestão de resíduos sólidos é uma problemática preocupante no Brasil e no mundo, já que há uma grande tendência de crescimento na geração de resíduos, aliada a ineficiente infraestrutura de reciclagem, reutilização e destinação final ambientalmente adequada para dispor corretamente os rejeitos. Essa problemática tende a se agravar devido ao crescimento elevado da população e aos modelos de consumo que são praticados atualmente (ABRELPE, 2020).

Dentre os vários tipos de resíduos sólidos gerados, como os resíduos de serviços de saúde, construção e demolição, mineração, industriais, agrícolas, entre outros, o que tem maior impacto com relação ao volume gerado são os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em seu Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil do ano 2020, mostra que a geração de RSU no ano de 2019 foi de 79,1 milhões de toneladas de resíduos. No Gráfico 1 é possível visualizar a quantidade de RSU coletados por cada região do país no ano de 2019.

Gráfico 1 – Contribuição percentual das regiões do Brasil no total de RSU coletados.



Fonte: ABRELPE (2020).

Como mostrado acima, a região do país com maior percentual de geração de RSU é a região Sudeste com 53,2%, ao passo que a região Norte contribui com apenas 6,6%. Tal contraposição pode ser explicada pelas diferenças entre as densidades demográficas e os níveis industriais das regiões.

A instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) com a Lei nº12.305 de 2010 foi um importante marco para o desenvolvimento da gestão de resíduos sólidos. O dispositivo propôs, além de diversas outras medidas para mitigar a geração de resíduos e promover uma destinação adequada ao material, extinguir os lixões e depósitos inadequados de resíduos em todo o país até o ano de 2014 (BRASIL, 2010). Apesar de não ter atingido essa meta, a PNRS foi um grande incentivo para a implementação de mais aterros sanitários no Brasil.

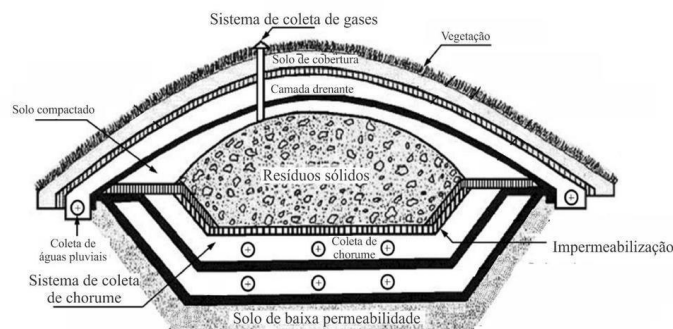
Ainda segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil do ano de 2020, 59,5% dos RSU coletados no país são dispostos em aterros sanitários, que correspondem a 43,3 milhões de toneladas por ano. Por outro lado, a quantidade de resíduos que segue para unidades inadequadas (lixões e aterros controlados) é de 29,4 milhões de toneladas por ano, representado 40,5% do total disposto (ABRELPE, 2020).

2.2. Aterros sanitários

Segundo a NBR 8419/1992, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), aterros sanitários de resíduos urbanos constituem em uma técnica de disposição de resíduos no solo, sem que haja danos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, sendo fundamentada em princípios de engenharia e normas operacionais específicas para o confinamento seguro dos resíduos sólidos.

De forma geral, os principais elementos que compõem os aterros sanitários são: sistema de impermeabilização de fundo, sistema de coleta de chorume, sistema de coleta e tratamento de gases, sistema de coleta de águas pluviais, sistema de cobertura e sistema de monitoramento de águas subterrâneas (AZIZ *et al.*, 2014), como podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Principais elementos presentes em um aterro sanitário.



Fonte: Adaptado de AZIZ *et al.* (2014).

O sistema de impermeabilização de fundo tem como objetivo impedir a percolação de lixiviado (chorume). É constituído por solos e/ou materiais sintéticos ao redor das paredes e na base do aterro (BOSCOV, 2008), que conferem estanqueidade à estrutura para assim prevenir contaminações, principalmente quando o sistema de drenagem falha durante a operação (HAUSER, 2009). Juntamente com o sistema de impermeabilização em aterros sanitários, deve ser projetado um sistema de drenagem para direcionar o chorume para um tratamento adequado. A verificação da eficácia do conjunto drenagem/impermeabilização é feita por meio do monitoramento de águas subterrâneas para verificar a existência de alguma contaminação no lençol freático.

Os resíduos dispostos no aterro sanitário são compactados e confinados em células, com camadas drenantes entre elas (camadas intermediárias). Essas camadas drenantes têm duas funções: (a) direcionar os líquidos para o sistema de drenagem de fundo e encaminhar para o tratamento; (b) conduzir os gases gerados na decomposição da matéria orgânica para o sistema de coleta de gases e direcionar para a queima ou aproveitamento na geração de energia.

O sistema de drenagem superficial pode ser composto por canaletas de concreto, calhas, escadas hidráulicas ou colchões de Reno. Esse sistema tem a função de diminuir a ocorrência de erosão nos taludes através do disciplinamento das águas das chuvas, de forma a mitigar a infiltração dessas águas no interior do aterro e, conseqüentemente, o aumento da quantidade de líquido percolado (BOSCOV, 2008).

A drenagem dos gases de um aterro é feita por meio de drenos verticais instalados por toda a profundidade do aterro e por camadas horizontais interligados. Os drenos são construídos com tubos de concreto verticais perfurados e envoltos em materiais granulares. Os gases gerados, principalmente, o gás carbônico e o metano, podem ser queimados ou aproveitados na geração de energia.

O confinamento dos RSU no aterro é feito através de um sistema de cobertura final, composto por uma camada ou um conjunto de camadas, com o objetivo de isolar os resíduos do meio externo, o controlar o fluxo de gases e a reduzir a taxa de infiltração de água para o interior do aterro (BOSCOV, 2008; LODI *et al.*, 2009).

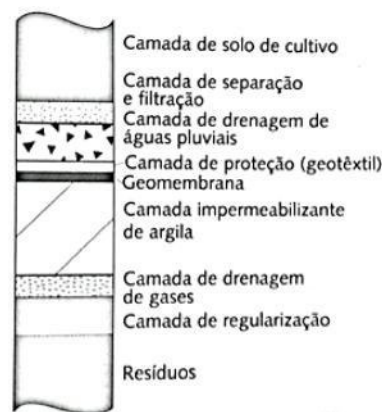
2.3. Sistemas de coberturas de aterros de resíduos

A utilização de um sistema de cobertura é essencial para que haja o funcionamento correto de um aterro de resíduos, que é executado logo acima da última

camada de resíduos disposta. A composição dos revestimentos impermeáveis de cobertura de aterros pode variar dependendo da localidade, uma vez que depende da disponibilidade dos materiais na região, além das condições climáticas locais (BOSCOV, 2008; USEPA, 2004).

De acordo com Boscov (2008), o sistema de cobertura de aterro de resíduos, mostrado na Figura 2, pode conter as seguintes camadas: camada de solo para cultivo, de separação e filtração, de drenagem de águas pluviais, de proteção (geotêxtil), geomembrana, camada de impermeabilização constituída de argila, de drenagem de gases e de regularização.

Figura 2 - Esquema ilustrativo da cobertura ou revestimento impermeável superior.



Fonte: BOSCOV (2008).

A camada de solo de cultivo é a mais externa e tem função de proteger as camadas inferiores contra o efeito da erosão, de reter umidade, e atuar como meio suporte para o desenvolvimento da vegetação (MAGALHAES, 2019; USEPA, 2004). A camada de separação e filtração é constituída de solo de granulometria intermediária entre o solo de cultivo e a camada de drenagem (BOSCOV, 2008). A camada de drenagem tem a função de direcionar as águas das chuvas que incidem no local. Já as camadas de proteção (geotêxtil), de geomembrana e argila compactada, atuam em conjunto para reduzir a percolação de água e o fluxo de gases (MAGALHAES, 2019), formando um sistema composto de impermeabilização. A camada de drenagem de gás é projetada para remover os gases gerados no aterro, que se acumulam abaixo da camada impermeável, e assim direcioná-los para o sistema de tratamento, através dos drenos verticais. Já a camada de regularização, tem como função separar as demais camadas de cobertura dos resíduos, ou seja, prepara a superfície dos resíduos para receber a camada de drenagem dos gases (HAUSER *et al.* 2001; MAGALHAES, 2019).

2.3.1. Camada impermeabilizante

A camada de impermeabilização pode ser construída com uma camada de solo compactado (*compacted clay liner – CCL*) ou uma associação de solo compactado e geossintéticos (BOSCOV, 2008; CETESB, 1993; USEPA, 2004). O estudo da permeabilidade dos materiais utilizados na impermeabilização de coberturas é de fundamental importância para a minimização da entrada de águas pluviais, e assim diminuir a produção do lixiviado (MAGALHAES, 2019).

Desse modo, a NBR 15849 (ABNT, 2010), que apresenta os critérios de projeto, implantação e operação de aterros sanitários de pequeno porte, recomenda o valor de 10^{-8} m/s de coeficiente de permeabilidade saturada máximo para camada de impermeabilização, contudo não define os critérios para determinação do tipo de solo a ser utilizado e a espessura da camada a ser executada.

Já a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1993) e a Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA, 2004) indicam o uso de 10^{-9} m/s como valor máximo para o coeficiente de permeabilidade da camada impermeabilizante.

Na Tabela 1 estão listados os requisitos mínimos para uma camada de impermeabilização adotados pela CETESB e pela USEPA.

Tabela 1 - Requisitos para camada de impermeabilização.

Requisito	CETESB	USEPA
Classificação segundo o SUCS	CL, CH, SC e OH ¹	-
Material passante na peneira n° 200 (0,075mm)	≥ 30%	≥ 30%
Material retido na peneira n° 4 (4,76mm)	-	≤ 20%
Limite de Liquidez	≥ 30%	-
Índice de Plasticidade	≥ 15%	≥ 7%
Coeficiente de Permeabilidade	≤ 10^{-9} m/s	≤ 10^{-9} m/s
pH	≥ 7	-

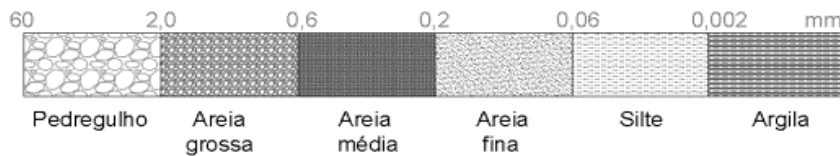
Fonte: CETESB (1993); USEPA (2004).

¹ De acordo com a classificação do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), CL são argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras; CH são argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas; SC são areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila e OH são argilas orgânicas de média e alta plasticidade.

Alguns fatores influenciam a permeabilidade dos solos argilosos compactados, os principais fatores são: a granulometria, o índice de vazios, a composição mineralógica, a estrutura, o fluido, o grau de saturação e a temperatura (LAMBE *et al.*, 1969; MITCHELL *et al.*, 1965).

De acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), que define os materiais da crosta terrestre, rochas e solos para fins de engenharia, solos granulares dividem-se em pedregulhos e areias grossas, médias e finas, solos siltosos e argilosos. Essa classificação é feita de acordo com o diâmetro equivalente dos grãos de solo, como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Classificação do solo de acordo com o diâmetro dos grãos.



Fonte: Adaptado de ABNT (1995).

Quanto menor o diâmetro equivalente dos grãos de solo menor será seu coeficiente de permeabilidade (Tabela 2). Isso ocorre devido à tendência de melhor acomodação entre as partículas de grãos finos e consequente redução da espessura dos vazios interconectados do solo (PINTO, 2006).

Tabela 2 - Valores típicos de condutividade hidráulica pelo tipo de material.

Tipo de material	Condutividade hidráulica (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

Outro fator que influencia na permeabilidade de camadas impermeabilizantes da cobertura de aterros sanitários é a formação de trincas nestas camadas. Segundo Boscov (2008), o revestimento de impermeabilização superior pode apresentar perda de estanqueidade

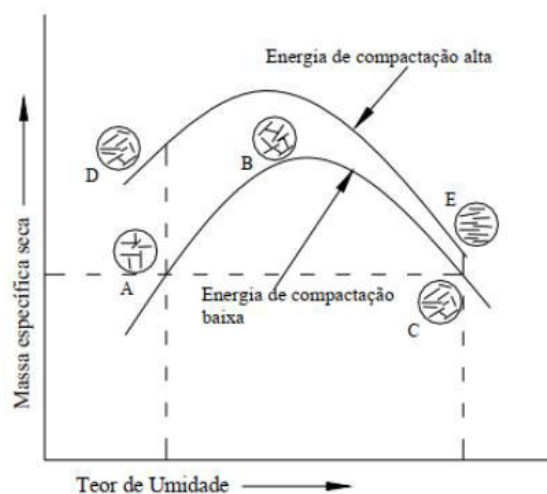
por estar sujeito a uma gama de solicitações que podem causar trincamentos, devido às variações de temperatura e umidade, à penetração de raízes, aos recalques diferenciais nos resíduos, às deformações pela movimentação de veículos e a erosão pela ação da água e do vento.

A formação de trincas nas camadas de impermeabilização de cobertura acaba por criar caminhos preferenciais de fluxo, aumentando a permeabilidade do revestimento, podendo comprometer o desempenho de toda a camada. A fim de diminuir os problemas de trincamentos são usadas geomembranas e geocompostos argilosos que são mais flexíveis, diminuindo os danos ocasionados pela molhagem e secagem da argila compactada e pelas aplicações de recalques diferenciais. Também são utilizadas misturas de solo com bentonita, se expandem com o aumento da umidade, fechando as trincas e recuperando parte da eficiência da cobertura (BOSCOV, 2008).

Os métodos de compactação e energia aplicada também produzem efeitos na permeabilidade dos solos. A compactação permite que a camada de solo se torne mais homogênea e aumente o contato entre os grãos, reduzindo assim o índice de vazios, aumentando a massa específica, e com isso, modificando algumas propriedades do solo, entre elas a permeabilidade (SILVA, 2017 *apud* TORRALBA, 2007; FRANCESCHET, 2006).

A permeabilidade de solos compactados, em uma determinada energia de compactação, varia em função do teor de umidade (BOSCOV, 2008). Observa-se na Figura 4 que solos compactados no ramo seco apresentam uma estrutura floculada e aqueles compactados no ramo úmido têm uma tendência de um arranjo paralelo entre as partículas (LAMBE e WHITMAN, 1969).

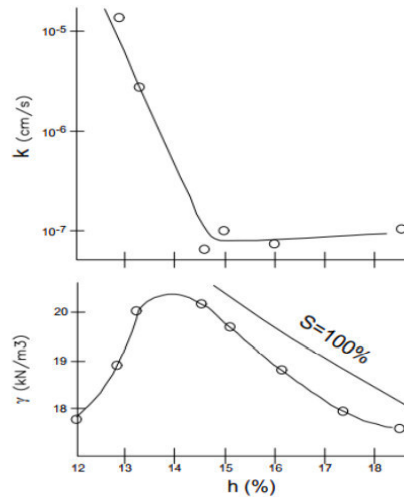
Figura 4 - Efeitos da compactação na estrutura do solo.



Fonte: Modificado de Lambe e Whitman (1969).

De acordo com Lambe e Whitman (1969), e como mostrado na Figura 5, solos finos compactados no ramo seco apresentam maiores valores de permeabilidade que aqueles compactados próximo ou acima da umidade ótima da curva de compactação.

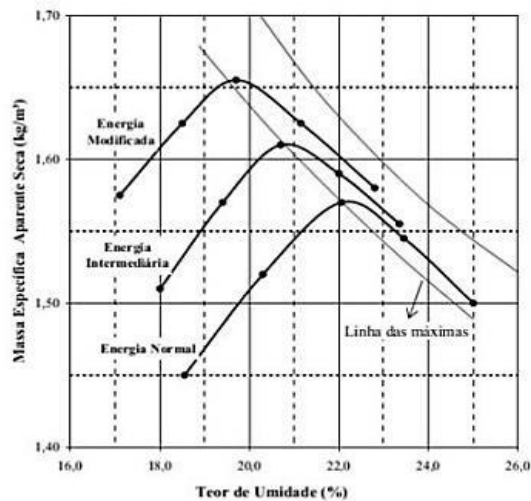
Figura 5 - Permeabilidade ao longo da curva de compactação.



Fonte: Modificado de Lambe e Whitman (1969).

Outro fator que afeta a permeabilidade do solo compactado é a energia de compactação. Como pode ser visto na Figura 6, com o aumento da energia de compactação ocorre a diminuição no valor da umidade ótima e um acréscimo na massa específica seca. Assim, há a diminuição da permeabilidade pois ocorre a diminuição no índice de vazios, pois as partículas passam a se orientar paralelamente (DAS, 1998).

Figura 6 - Influência da energia de compactação no comportamento do solo.



Fonte: Camapum *et al.* (2015).

2.4. Parâmetros hidráulicos

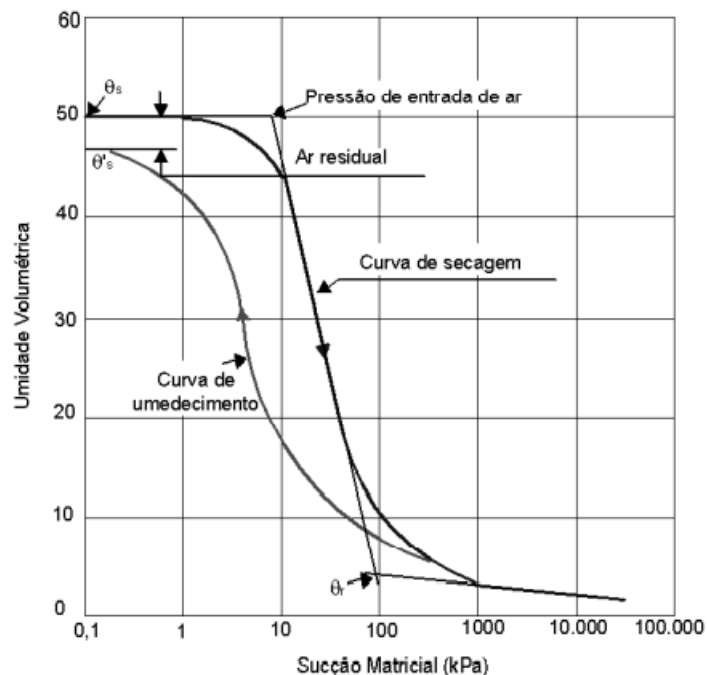
Neste tópico serão abordados os parâmetros hidráulicos utilizados no dimensionamento de coberturas de aterros de resíduos. Sendo eles: curva de retenção de água no solo; permeabilidade saturada e permeabilidade não saturada.

2.4.1. Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo, ou curva característica de sucção, é a relação entre o teor de umidade presente no solo e o valor da energia de sucção. Ela representa a capacidade de armazenamento de água do solo. Sua forma está relacionada com a textura, índice de vazios, composição mineralógica, estrutura do solo e método de compactação (STERCK, 2011; KLUTE e DIRKSE, 1986; LISBOA, 2006).

A Figura 7 representa curvas de retenção típicas. Na figura, θ_s é o teor de umidade volumétrica de saturação da curva de secagem; θ'_s é o teor de umidade volumétrica da curva de umedecimento; θ_r é o teor de umidade volumétrica residual e $(\theta_s - \theta'_s)$ é o conteúdo de ar residual entre os processos de secagem e umedecimento. Segundo Sterck (2011), a pressão de entrada de ar representa o diferencial de pressões entre a água e o ar necessário para causar a drenagem do maior poro do solo.

Figura 7 – Curva de retenção típica do solo.



Fonte: Fredlund e Xing (1994).

A curva de retenção do solo é uma ferramenta essencial na análise do comportamento dos solos não saturados, sendo utilizada para obtenção de vários parâmetros e, juntamente com a condutividade hidráulica, determina o comportamento do fluxo d'água no solo.

2.4.2. Permeabilidade saturada

De acordo com Klute e Dirksen (1986), a permeabilidade é a capacidade que o solo tem de transmitir água. Ou seja, ela representa a maior ou menor facilidade com que a água pode fluir através dos poros do solo.

Esse fluxo de água nos solos é normalmente regido pela lei de Darcy:

$$v = k \cdot i$$

Sendo i o gradiente hidráulico, que é calculado por:

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

Onde:

v = velocidade média, aparente ou de Darcy;

k = coeficiente de condutividade hidráulica saturada;

Δh = diferença de carga total entre dois pontos;

L = distância percorrida pelo fluxo de água.

Segundo Richards (1974), quando um solo saturado perde água, passando para um estado não saturado, ocorre a substituição gradual da água pelo ar nos poros deste solo. Com a perda de umidade, ocorre a diminuição dos canais por onde a água possa percolar, como também pode ocorrer a retração dos poros, diminuindo assim a permeabilidade.

Para solos saturados, a determinação da permeabilidade se dá através de ensaios de campos e de laboratório. Os principais ensaios laboratoriais são: permeâmetro de carga constante; permeâmetro de carga variável e ensaio de adensamento.

No ensaio com permeâmetro de carga constante, a carga total é mantida constante e a vazão correspondente é medida. Esse ensaio é mais indicado para solos arenosos com elevada permeabilidade (CARVALHO, 1997).

Já no ensaio com carga variável a carga total muda com o tempo. Ele é indicado para solos finos. Neste caso a medição da permeabilidade é feita a partir de medições da variação do nível de água no tubo de entrada em relação ao tempo (CARVALHO, 1997).

O ensaio de adensamento é uma determinação indireta e também pode ser

utilizado para medir a permeabilidade em solos finos como argilas e siltes.

2.4.3. Permeabilidade não saturada

A condutividade hidráulica não saturada é aquela que acontece no solo em condições de umidade inferiores à de saturação. Desse modo, água e ar se movimentam devido as influências dos potenciais presentes no solo não saturado (ALFARO SOTO, 1999).

De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), em solos não saturados, a condutividade hidráulica é afetada pelas variações no grau de saturação. A relação entre a permeabilidade e o grau de saturação é chamada de função de condutividade hidráulica não saturada (MARINHO, 2005).

A obtenção da permeabilidade em solos não saturados é feita através de métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos podem ser ensaios de laboratório e de campo, e ambos podem ser realizados em regime permanente ou em regime transiente.

2.5. Solos reforçados com fibras

A técnica de reforçar solos com fibras encontra-se inserida na tecnologia dos materiais compósitos, sendo estes definidos como a combinação de dois ou mais materiais que tem propriedades que os materiais componentes isoladamente não possuiriam. O material reforçado é composto por uma matriz e um elemento de reforço (BUDINSKI, 1996). No caso da composição solo-fibra, tem-se o solo como a fase matriz e a fibra como elemento de reforço.

A utilização de fibras como reforço de solos não é uma técnica recente, contudo sua utilização em obras geotécnicas ainda é considerada pequena. Um dos fatores limitantes para essa utilização é a obtenção de uma mistura homogênea em aplicações em campo, que é crucial para garantir um desempenho satisfatório do solo reforçado. Desse modo, a homogeneização dos materiais deve ser feita com maior atenção, podendo ser realizada com a utilização de equipamentos específicos para uniformizar a distribuição das fibras e ainda evitar predominância de uma orientação específica das fibras no solo, que podem prejudicar seriamente o comportamento mecânico da mistura (PALMEIRA, 2018).

2.5.1. Tipos de fibras utilizadas como reforço

Existe uma grande variedade de fibras empregadas em reforços de solos, desde as de fabricação industrial até aquelas produzidas de forma alternativa. As propriedades de cada

uma delas estão diretamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação. Desse modo, é fundamental a compreensão das características de interação solo-fibra e da parcela de contribuição de ambas as fases no comportamento do material compósito resultante, para assim ser possível definir a utilização adequada desse novo material em obras geotécnicas.

As fibras utilizadas como elemento de reforço em materiais podem ser classificadas como: naturais, minerais, metálicas e poliméricas.

As fibras naturais são na sua maioria de origem vegetal. De acordo com Hannant (1994), as fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser feitas de bambu, capim elefante, coco, sisal, malva, piaçava, cana-de-açúcar, juta e linho. As fibras do bambu, por exemplo, podem atingir resistências superiores a 100 MPa e módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa.

As fibras de origem mineral podem ser: (a) fibras de carbono: caracterizam-se pela resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza dos mesmos, apresentando resistência à tração de aproximadamente 2400 GPa e módulo de elasticidade próximo de 420 GPa; (b) fibras de amianto: apresentam resistência à tração de cerca de 1000 MPa e módulo de elasticidade em torno de 160 GPa e apresentam uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento; e (c) fibras de vidro: são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, isto é, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos (TAYLOR, 1994).

As fibras metálicas mais comuns são as de aço. Sua resistência à tração é de aproximadamente 1100 MPa e seu módulo de elasticidade de 200 GPa. Podem apresentar problemas relacionados à corrosão dependendo do meio onde estão inseridas (TAYLOR, 1994).

As fibras poliméricas serão abordadas mais detalhadamente a seguir. As fibras de polipropileno, material utilizado nesse estudo, se encontram nesta classe de fibras.

2.5.1.1. Fibras poliméricas

De acordo com Casagrande (2001), as fibras poliméricas tendem a ser as fibras mais promissoras na utilização como reforço de solo. Pela estrutura química dos polímeros, as fibras poliméricas podem ser de vários tipos: polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida (Kevlar).

As fibras de polipropileno são constituídas de um polímero termoplástico, ou seja, de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura.

Elas são extremamente versáteis como formadoras de fibras, pois são constituídas por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, sendo amplamente utilizadas em vários setores da indústria (HOLLAWAY, 1994). Algumas das principais propriedades das fibras de polipropileno são: alta resistência ao ataque químico e biológico; baixa absorção de umidade; alta resistência à ação dos raios solares (ARAÚJO, 2011).

Segundo Taylor (1994), as fibras de polipropileno possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição; seu módulo de elasticidade é cerca de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é em torno de 400 MPa. Além disso, possuem elevada resistência a ação de várias substâncias químicas e aos álcalis.

As fibras de polietileno têm módulo de elasticidade baixo, com fraca aderência à matriz e possuem alta resistência aos álcalis. Sua durabilidade é elevada, contudo apresentam maiores deformações de fluência quando comparadas com as fibras de polipropileno (HANNANT, 1994). O polietileno de alta densidade foi desenvolvido como uma alternativa para aumentar o módulo de elasticidade e melhorar a aderência com o solo.

As fibras de poliéster apresentam alta densidade, rigidez e resistência. Essas fibras possuem um aspecto similar às de polipropileno e podem ser empregadas para as mesmas aplicações (TAYLOR, 1994). Existe uma variedade de tipos de poliéster, sendo o mais conhecido o Polietileno Tereftalato (PET), utilizado na indústria de produção de recipientes para produtos alimentícios. As fibras produzidas com este material possuem alta tenacidade, alto módulo de elasticidade e baixa capacidade de absorção de água (ARAÚJO, 2011).

Já as fibras de poliamida são fortemente orientadas, formadas por poliamidas aromáticas, resistentes a altas temperaturas e cargas. Pelas suas propriedades são usadas em aplicações que requerem resistência a altas temperaturas. As fibras de poliamida para-aramidas, como o Kevlar, possuem altos valores do módulo de elasticidade e resistência à tração, assim como uma baixa deformação até a ruptura (ARAÚJO, 2011).

2.5.2. Comportamento de misturas solo-fibras

Os mecanismos de interação solo-fibra ditam a eficiência do solo reforçado. Com a inclusão das fibras ocorre alterações na estrutura do solo, conferindo-lhe características de um novo material. Desse modo, analisa-se a influência da adição das fibras no comportamento mecânico do solo reforçado.

Os principais fatores que influenciam o mecanismo de interação solo-fibra são densidade do solo, tipo do solo, forma de partícula, propriedades da superfície do reforço,

força atuante, rigidez da matriz reforçada, geometria e a orientação das fibras (Al-REFEAI, 1991).

Casagrande (2001) analisou o comportamento mecânico de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente no solo. O estudo foi dividido entre uma etapa laboratorial e outra em campo. No experimento, foram realizados ensaios triaxiais adensados e drenados do solo residual e de misturas solo-fibra, com o interesse de avaliar o comportamento de tensão-deformação-resistência. Na etapa de campo foram construídos aterros experimentais com camadas de solo residual compactado com e sem reforço com fibras. Por meio dos resultados obtidos, foi possível identificar que a inclusão de fibras de polipropileno resultou em um aumento significativo da capacidade de suporte do solo, além de uma redução considerável dos recalques, quando comparado os comportamentos do solo sem reforço. O estudo concluiu que as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência do material em aproximadamente 2,5% de deformação axial.

Casagrande (2005) avaliou o comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno, submetidos a grandes deformações. Para este estudo foram realizados ensaios triaxiais consolidados drenados com aplicação de altas tensões, em amostras de areia e areia-fibra, como também em ensaios de cisalhamento do tipo *ring shear* e provas de carga em placa sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras. A adição de fibras proporcionou um crescimento nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico das matrizes estudadas após grandes deslocamentos horizontais, sem quedas significativas de resistência pós-pico no caso da matriz arenosa. O efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para menores diâmetros, maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para misturas mais densas. O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte e alterando mecanismos de ruptura do solo.

2.5.2.1. Compactação

Al Wahab e Al-Qurna (1995) estudaram a influência da adição de vários teores de fibras (0; 0,5; 1 e 2% em peso seco de solo) na curva de compactação de uma argila. Os resultados encontrados mostraram uma diminuição da densidade (4%) e um pequeno aumento na umidade ótima para a adição de 2% de fibra, considerados não muito significativos.

O mesmo comportamento com relação à umidade para um solo arenoso foi relatado por Bueno *et al.* (1996), contudo para o solo argiloso testado não se observou

alteração na umidade ótima, nem na densidade máxima para ambos os solos com a inclusão de diferentes teores de fibras.

Segundo Castro (2020), que estudou o comportamento hidráulico e mecânico de camadas de um solo arenoso reforçado com a adição de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente, os parâmetros encontrados nas curvas de compactação apresentaram uma tendência de redução dos pesos específicos aparente seco máximo e aumento da umidade ótima com o acréscimo dos teores de fibras de polipropileno, indicando o aumento da porosidade das amostras, mantendo-se a energia de compactação constante.

Autores como Feuerharmel (2000), que estudou o comportamento de argila, areia siltosa e areia, e Casagrande (2001) e Heineck (2002), que estudaram areias siltosas, também relataram não encontrar nenhuma alteração significativa tanto para a umidade como para a densidade com a adição de fibras nos tipos de solos analisados.

2.5.2.2. *Permeabilidade*

O aumento da permeabilidade devido à adição de fibras em solos argilosos é relatado por diferentes autores.

Maher e Ho (1994) avaliaram as propriedades mecânicas de um composto de solo de caulinita/fibra por meio de uma série de ensaios laboratoriais e testes hidráulicos de condutividade. A inclusão da fibra aumentou a permeabilidade do composto e o aumento foi mais acentuado para maiores teores de fibras. Apesar do aumento, a permeabilidade do composto continuou baixa o suficiente para ser utilizada em algumas aplicações em coberturas de aterros sanitários.

Bueno *et al.* (1996) constataram um aumento em uma ordem de grandeza na permeabilidade de solos argilosos devido a adição de fibras em diferentes teores, contudo, para solos granulares reforçados com fibras, houve uma redução da permeabilidade de uma ordem de grandeza.

Al Wahab e El-Kedrah (1995) observaram um aumento da permeabilidade em mais de uma ordem de grandeza para solo argiloso com 2% de fibra de polipropileno.

Heineck (2002) analisou o efeito da adição de bentonita em diferentes teores e 0,5% de fibras de polipropileno nas propriedades mecânicas e hidráulicas de diferentes matrizes, e concluiu que a adição de 0,5% de fibras de polipropileno de 24mm em uma areia siltosa não causou mudanças significativas na permeabilidade avaliada.

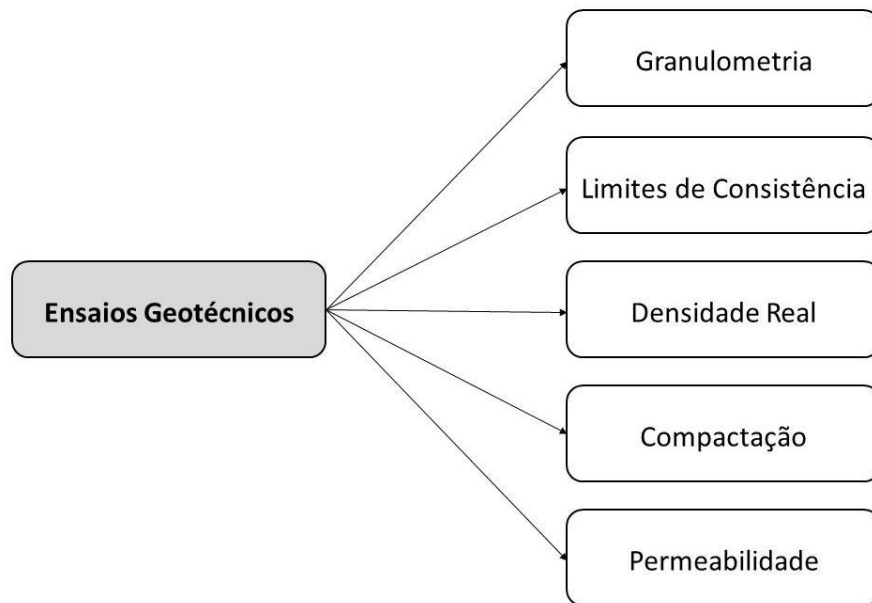
3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa consistiu na realização de um programa experimental por meio de ensaios geotécnicos de caracterização, compactação e permeabilidade do solo argiloso e misturas de solo e fibras de polipropileno, com vistas na aplicação em sistemas de impermeabilização de cobertura de aterros de resíduos sólidos.

Para a realização dos ensaios de laboratório foi utilizada uma amostra de solo disponibilizada pelo Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará.

Os ensaios geotécnicos foram executados no LMSP. Os ensaios realizados na pesquisa estão apresentados no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma dos ensaios utilizados na pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1. Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno utilizadas foram disponibilizadas pelo Laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Federal do Ceará (IFCE) – Campus Fortaleza. O material denominado FibroMac 6 foi cedido pela empresa Maccaferri Brasil, sendo composto por filamentos extremamente finos, produzidos através de processo de extrusão (Figura 9).

Figura 9 - Fibras de polipropileno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As especificações das fibras de polipropileno FibroMac utilizadas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações das fibras utilizadas na pesquisa.

Resistência à tração na ruptura	300MPa
Alongamento na ruptura	80%
Comprimento	6mm
Diâmetro	18 μ m
Seção	Circular
Peso específico	0,91 g/cm ³
Módulo de Young	3000MPa
Temperatura de fusão	160°C
Temperatura de ignição	365°C

Fonte: Maccaferri Brasil (2018)

3.2. Ensaios geotécnicos

Os ensaios geotécnicos foram realizados seguindo as recomendações das normas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Normas utilizadas nos ensaios de caracterização geotécnica.

Ensaio	Norma	Ano
Preparação das amostras	NBR 6457	2016
Granulometria por peneiramento e sedimentação	NBR 7181	2016
Limite de plasticidade	NBR 7180	2016
Limite de liquidez	NBR 6459	2016
Densidade real dos grãos	DNER-ME 93	1994
Compactação	NBR 7182	2016
Permeabilidade	NBR 14545	2000

Fonte: Elaborado pelo autor.

A umidade natural da amostra foi determinada por meio dos procedimentos descritos na NBR 6457 (ABNT, 2016).

Através dos resultados obtidos nos ensaios foi possível realizar a classificação da amostra de solo segundo o sistema *Highway Research Board* (HRB) da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

3.2.1. Preparação das amostras

A amostra de solo estudada foi previamente seca ao ar, homogeneizada, destorroada, peneirada e preparada seguindo as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016). Posteriormente, a amostra foi armazenada em um saco plástico e identificada.

Para a definição dos teores fibras a serem incorporados no solo, foram adotados os valores comumente empregados na literatura. Em geral, os teores adotados em geotecnia são pequenos, chegando a valores em torno de 1,0% em peso, em função da massa seca do solo. Como exemplos de teores de fibras utilizados por diferentes autores pode-se citar Casagrande (2001) que utilizou fibras de polipropileno (comprimento de 24 mm) como reforço de um solo arenoso, com teores de 0,25; 0,5 e 0,75% e Castro (2020) que adotou 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 e 1,25% de fibras de polipropileno (comprimento 6mm) para reforço de um solo arenoso.

Neste trabalho, foram adotados os teores de fibras de polipropileno de 0,5% e 1,0% em relação à massa de solo seco (Figura 10), sendo a água adicionada posteriormente para a realização dos ensaios de compactação e de permeabilidade.

Figura 10 – Amostras: (a) Solo e 0,5% de fibras; (b) Solo e 1,0% de fibras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para facilitar a referência das amostras de solo natural e solo-fibra serão utilizadas nomenclaturas específicas para cada uma delas, conforme Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Nomenclaturas utilizadas para as amostras.

Amostra	Nomenclatura
Solo Natural	SN
Solo com 0,5% de fibras	SF05
Solo com 1,0% de fibras	SF10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a homogeneização da mistura solo e fibras seguiu-se as orientações de Casagrande (2001). Primeiramente, antes de ser acrescentada a água, foi feita a mistura dos componentes secos da mistura, e posteriormente a homogeneização foi realizada manualmente e verificada visualmente. Observou-se a formação de aglomerações de fibras na preparação das amostras, que indica a dificuldade de obter uma homogeneização completa do compósito.

3.2.2. Análise granulométrica

O ensaio de granulometria do solo natural foi feito de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Foi realizado o peneiramento grosso e fino, além da sedimentação, com o objetivo de determinar a curva granulométrica da amostra e assim obter a porcentagem de distribuição das partículas do tamanho de areia, silte e argila.

Foi utilizado o sistema de classificação do tamanho das partículas adotado pela NBR 6502 (ABNT, 1995) e a classificação do solo foi feita pelo Sistema *Highway Research Board* (HRB) adotada pela AASHTO e pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

3.2.3. Limites de consistência

Os limites de consistência foram determinados através dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, seguindo as orientações das normas NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

3.2.4. Densidade real

A determinação da densidade das partículas foi realizada pelo método do picnômetro, de acordo com a norma DNER-ME 93 (DNER, 1994).

3.2.5. Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com as orientações da norma NBR 7182 (ABNT, 2016), com a finalidade de determinar a massa específica seca aparente máxima e o teor de umidade ótimo de compactação para a energia normal das amostras. Através dos resultados dos ensaios de compactação foi possível a elaboração das curvas de compactação.

Os ensaios foram executados no cilindro pequeno utilizando energia de compactação normal (soquete pequeno) com 26 golpes por camada e os ensaios foram realizados sem reuso de material.

3.2.6. Ensaios de permeabilidade

Os coeficientes de permeabilidade foram determinados através do Método B do ensaio de permeabilidade de solos argilosos com carga variável de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2000).

Foi utilizado o permeâmetro de parede rígida e as amostras foram compactadas na umidade ótima com energia normal (soquete grande) e com 12 golpes por camada. As amostras foram submetidas a um fluxo de água por um período de 24 horas, com o objetivo de saturar o corpo de prova. Posteriormente, foi aplicado um fluxo descendente de água, por meio de uma bureta graduada preenchida com água interligada ao permeâmetro, a fim de medir as cargas hidráulicas com a determinação da variação da cota de água na tubulação, em diferentes intervalos de tempo, que permitiu determinar o coeficiente de permeabilidade.

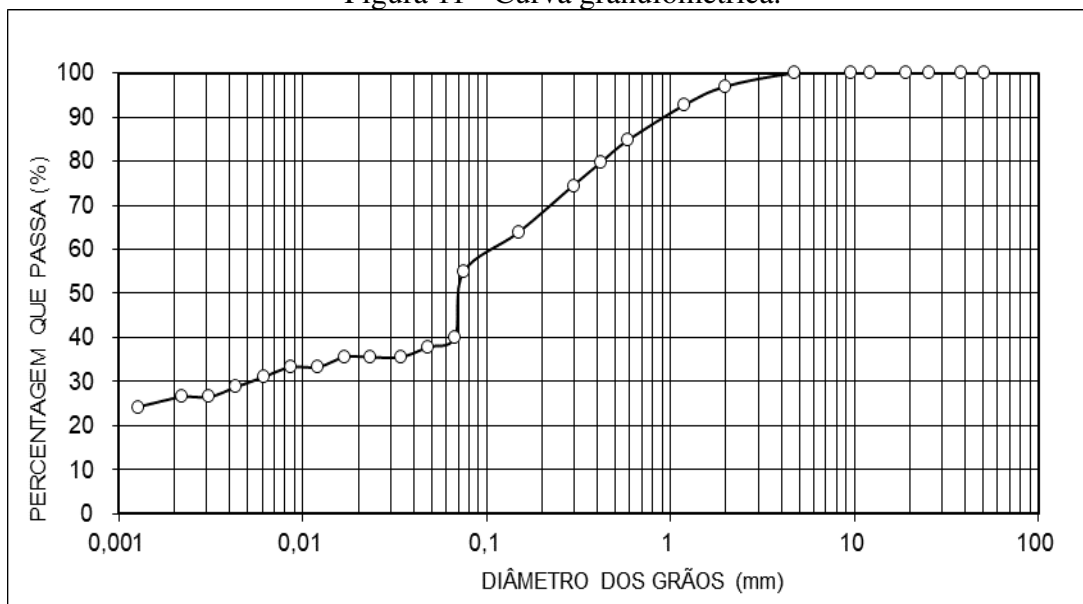
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, compactação e permeabilidade realizados no programa experimental metodológico proposto nesta pesquisa, assim como será feita a análise e discussão destes resultados.

4.1. Análise granulométrica

A curva granulométrica obtida por peneiramento e sedimentação é apresentada na Figura 11. Conforme a curva granulométrica, verifica-se que a composição do solo foi de 15% de areia grossa, 21% de areia média, 24% de areia fina, 13% de silte e 27% de argila, obtida de acordo com a norma NBR 6502 (ABNT, 1995).

Figura 11 - Curva granulométrica.

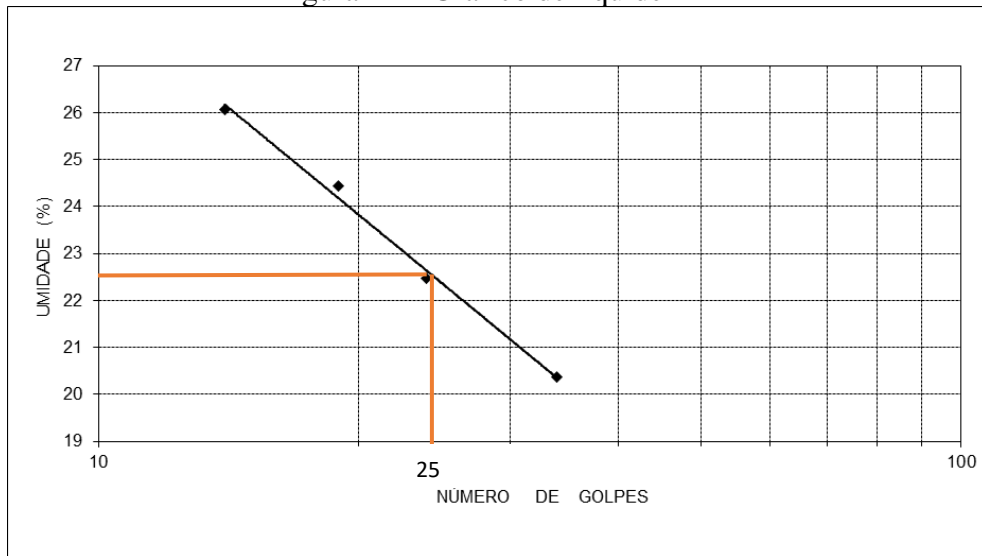


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Limites de consistência

Os resultados dos limites de consistência ou limites de Atterberg, o limite de liquidez e o de plasticidade, mostrados na Figura 12 e na Tabela 6, indicam que o solo apresenta características de um solo medianamente plástico (Tabela 7).

Figura 12 – Gráfico de liquidez



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Índices físicos.

Limite de liquidez	23%
Limite de plasticidade	10%
Índice de plasticidade	13%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Plasticidade do solo pelos limites de Atterberg.

Faixa de IP	Condição do solo
$1 < IP < 7$	fracamente plástico
$7 < IP < 15$	medianamente plástico
$IP > 15$	altamente plástico

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. Classificação do Solo

Já a classificação do solo foi feita pelo Sistema HRB e pelo SUCS, que considera tanto os parâmetros encontrados na análise granulométrica quanto nos limites de consistência, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação do solo.

Sistema	Classificação	
HRB	A6	Solo argiloso
SUCS	SC	Areia argilosa

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4. Densidade real dos grãos

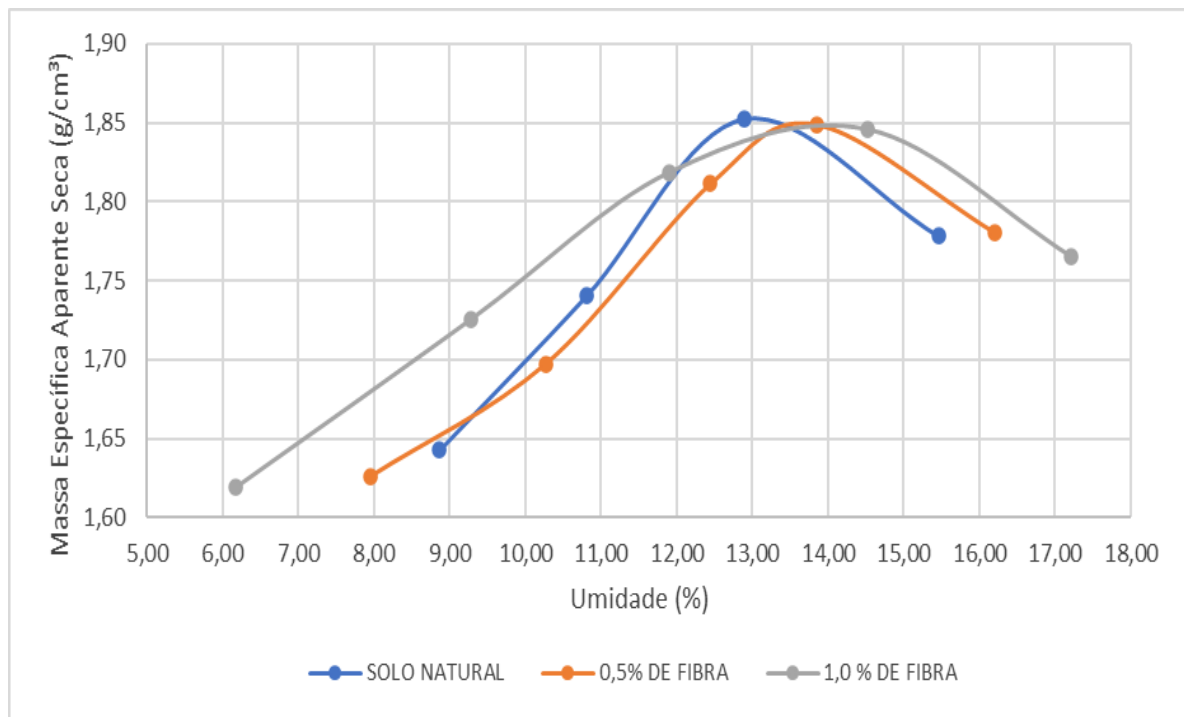
O ensaio para determinação da densidade das partículas, pelo método do picnômetro, indicou que a densidade real dos grãos (G_s) é de 2,69.

A densidade real dos grãos varia pouco de solo para solo, sendo em função dos minerais constituintes e da porcentagem de cada um deles no solo. Assim, comparando com valores típicos constantes na literatura, o valor encontrado de 2,69 fica entre os intervalos médios indicados para areias siltosas e argilas inorgânicas (DAS, 1998).

4.5. Ensaio de compactação

A Figura 13 apresenta as curvas de compactação obtidas para o solo natural e para as misturas solo-fibra, identificadas conforme indicado na Tabela 5. Os valores obtidos para umidades ótimas e massas específicas secas máximas correspondentes, destinados à ensaios de permeabilidade, são apresentadas na Tabela 9.

Figura 13 - Curvas de compactação solo natural e solo-fibras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Parâmetros obtidos pelas curvas de compactação.

Amostra	Umidade (%)	Massa esp. aparente seca máx. (g/cm ³)
SN	13,00	1,852
SF05	13,60	1,849
SF10	14,00	1,846

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Tabela 9, observa-se que os parâmetros encontrados apresentaram uma tendência de aumento da umidade ótima e uma leve redução da massa específica aparente seca máxima com o acréscimo dos teores de fibras de polipropileno, indicando um pequeno aumento da porosidade das amostras, para uma mesma energia de compactação. Analisando as curvas, verifica-se que a adição de fibras nos teores analisados causou alterações pouco significativas na massa específica aparente seca máxima, mas houve um deslocamento das curvas de compactação para à direita, indicando um aumento na umidade ótima com o aumento do teor de fibras, corroborando com resultados obtidos por vários autores (AL WAHAB e AL-QURNA, 1995; FEUERHARMEL, 2000; CASAGRANDE, 2001; HEINECK, 2002).

Assim como os resultados observados por Al Wahab e Al-Qurna (1995), os valores obtidos na curva de compactação indicam que houve aumento da umidade ótima com o aumento do teor de fibras em solos argilosos, sem modificações significativas na densidade aparente seca. Em contraponto, os resultados obtidos por Castro (2020), indicaram uma diminuição da densidade aparente seca e aumento da umidade ótima, mas para um solo arenoso, que parece indicar uma mudança mais significativa da estrutura do solo, uma vez que Castro (2020) verificou um aumento nos macroporos com o aumento do teor de fibras. Desse modo, os resultados parecem indicar que, para os teores de fibras estudadas, a inclusão das fibras em solos arenosos altera mais significativamente a estrutura do compósito que em solos argilosos.

A Figura 14 apresenta o aspecto das misturas de solo com a adição de fibras, onde pode ser observado algumas aglomerações de fibras em alguns pontos do compósito. Na Figura 14 (b), que representa a mistura de solo com a adição de 1,0% de fibra, pode ser observado uma maior presença de aglomerações de fibras em alguns pontos se comparado a Figura 14 (a), que contém 0,5% de fibras na mistura. Tal característica indica uma maior tendência de formação de aglomerados com o aumento dos teores de fibras aplicados.

Figura 14 – Corpos de prova dos ensaios de compactação:
(a) Solo + 0,5% de fibras; (b) solo + 1,0% de fibras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6. Ensaios de permeabilidade

Na Tabela 10 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de permeabilidade realizados para as amostras de o solo natural e misturas de solo-fibra, identificadas conforme indicado. A análise foi feita em duplicata (análise 1 e 2) para os diferentes teores de fibras (0,5 e 1,0%), e assim foram calculadas as médias dos coeficientes de permeabilidades (k) obtidos nas diferentes análises.

Tabela 10 - Coeficientes de permeabilidades (k) pelos ensaios de laboratórios

Amostra	Análise 1 k (m/s)	Análise 2 k (m/s)	Média k (m/s)
SN	$2,99 \times 10^{-7}$	$3,49 \times 10^{-7}$	$3,24 \times 10^{-7}$
SF05	$4,24 \times 10^{-7}$	$3,72 \times 10^{-7}$	$3,98 \times 10^{-7}$
SF10	$4,44 \times 10^{-7}$	$4,35 \times 10^{-7}$	$4,40 \times 10^{-7}$

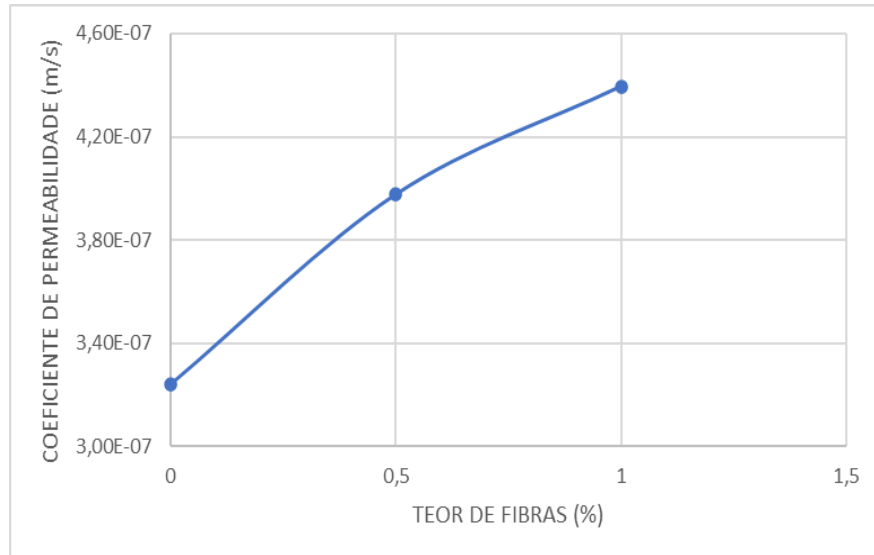
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os resultados obtidos nas análises (1 e 2) de cada amostra (SN, SF05 e SF10) nos ensaios de permeabilidade, foi possível observar pequenas variações dos valores de permeabilidade para uma mesma amostra nas diferentes análises. Entretanto, de forma geral, pode-se observar que a adição crescente de fibras de polipropileno ao solo argiloso conferiu um aumento na permeabilidade (k) do compósito. Esse aumento na permeabilidade das amostras testadas é mostrado na Figura 13.

O valor médio da permeabilidade avaliada foi de $3,24 \times 10^{-7}$ m/s para o solo natural, $3,98 \times 10^{-7}$ m/s para o solo + 0,5% de fibras, representando um aumento de cerca de 23% na

permeabilidade em comparação ao solo natural, e para o solo + 1,0% de fibras foi obtido $4,40 \times 10^{-7}$ m/s de permeabilidade, conferindo um aumento próximo de 35% em relação ao solo sem fibras.

Figura 15 - Efeito da adição de fibras na permeabilidade das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar do aumento observado nos valores de permeabilidade com a adição de fibras de polipropileno no solo estudado, esses valores se mantiveram na mesma ordem de magnitude (10^{-7} m/s), podendo concluir que inclusão aleatória de fibras não produziu um efeito significativo sobre a permeabilidade do solo argiloso analisado. Esta observação está de acordo com os resultados relatados por Maher e Ho (1994) e com as observações de Miller e Rifai (2004), que relataram aumento significativo na permeabilidade apenas para teores de fibras superiores a 1%, além de Heineck (2002) que concluiu que o efeito da adição de 0,5% de fibras de polipropileno nas propriedades hidráulicas de diferentes matrizes, não causou mudanças significativas na permeabilidade avaliada.

4.7. Análises dos resultados

Baseado nos resultados obtidos no ensaio de granulometria, o solo utilizado na pesquisa se caracteriza como argiloso (A6) conforme o sistema HRB, e pelo SUCS, ele é classificado como uma areia argilosa (SC). Segundo os requisitos adotados pela CETESB, o tipo de solo SC é indicado para o uso em camadas impermeabilizantes de cobertura de aterros sanitários, já a USEPA não define o tipo de solo a ser aplicado nessas camadas. Ambas as

agências ambientais definem a porcentagem mínima de 30% de material passante na peneira nº 200 (0,075mm), e em relação à porcentagem de material retido na peneira nº 4 (4,76mm), a CETESB não define valores, contudo a USEPA estabelece como menor ou igual a 20%. Desse modo, os valores encontrados no presente trabalho se adequam a esses requisitos.

Em relação aos índices de físicos (LL e IP) do solo estudado, apresentou 23% de limite de liquidez e 13% de índice de plasticidade, valores abaixo daqueles estabelecidos pela CETESB, que recomenda LL de no mínimo 30% e IP maior que 15%. Já a USEPA não define valor de LL e recomenda porcentagem mínima de 7% de IP, assim o solo analisado cumpre os parâmetros da agência Americana.

Os resultados obtidos a partir das curvas de compactação, mostraram que não houve significativa diminuição da massa específica aparente seca máxima com a inclusão de fibras, havendo um pequeno aumento da umidade ótima com o aumento do teor de fibras no solo.

Verificou-se que o solo argiloso utilizado no estudo apresentou coeficientes de permeabilidade na ordem de 10^{-7} m/s, sendo maiores que os preconizados pela CETESB e pela USEPA para uso em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. O presente estudo mostrou que não houve aumento significativo da permeabilidade com a inclusão de fibras de polipropileno, para teores de fibras de até 1,0% em peso. Os resultados são promissores para a realização de futuros estudos, considerando a adição de novos teores de fibras de polipropileno em solos argilosos e que se enquadrem nos requisitos exigidos pelos órgãos ambientais, para atuar como barreira impermeabilizante. Adicionalmente, a utilização de fibras de polipropileno como reforço de solos argilosos se mostrou pertinente, uma vez que a adição das fibras ao solo argiloso pode conferir uma maior resistência à camada, sem diminuir de forma significativa a sua permeabilidade.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho consistiu em estudar o comportamento da permeabilidade de misturas de solo argiloso com diferentes teores de fibras de polipropileno, com vistas em utilização em camadas impermeabilizantes em camadas de cobertura de aterros de resíduos.

Foi realizada a caracterização geotécnica de um solo argiloso, a compactação e a permeabilidade do solo natural e das misturas solo-fibra. Neste trabalho foram utilizadas fibras de polipropileno, com comprimento de 6mm e diâmetro de 18 μ m, com teores de fibras de 0,5 e 1,0% (em relação ao peso de solo seco) nas misturas de solo-fibras. As amostras compactadas na energia Proctor Normal, com posterior determinação da permeabilidade utilizando permeâmetro de carga variável. As fibras foram distribuídas aleatoriamente na massa de solo, de modo a garantir a homogeneidade da mistura.

O solo utilizado na pesquisa é argiloso, classificado como A6 conforme o sistema HRB e pelo SUCS, ele é classificado como uma areia argilosa (SC). O solo apresentou características de um material medianamente plástico e densidade real dos grãos de igual a 2,69.

A partir dos ensaios de compactação, verificou-se que os parâmetros encontrados nas curvas de compactação apresentaram uma leve redução da massa específica aparente seca máxima e aumento da umidade ótima com o acréscimo dos teores de fibras de polipropileno, que indica um aumento da porosidade das amostras, mantendo-se a energia de compactação constante.

Já em relação à permeabilidade do solo argiloso e a inclusão aleatória de fibras de polipropileno, constatou-se que houve um aumento da permeabilidade com o aumento dos teores de fibras. No entanto, o aumento geral não foi tão significativo para alterar a ordem de magnitude da permeabilidade do solo argiloso, que se manteve em 10^{-7} m/s.

Portanto, o acréscimo na permeabilidade do solo causado pela adição dos diferentes teores de fibras analisados não impossibilita sua potencial aplicação em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, pois ainda atenderia os parâmetros estabelecidos pelos órgãos competentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 8p, 2016.

_____ **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 5p, 2016.

_____ **NBR 8419. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 7p, 1992.

_____ **NBR 6502: Rochas e solos.** Rio de Janeiro, 18p, 1995.

_____ **NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.** Rio de Janeiro, 24p, 2010.

_____ **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 3p, 2016.

_____ **NBR 7181: Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 12p, 2016.

_____ **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 9p, 2016.

_____ **NBR 14545: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro, 12p, 2000.

_____ **NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.** Rio de Janeiro, 24p, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020.** São Paulo: [S.n.] 2020.

ARAÚJO, M. **Natural and man-made fibres: Physical and mechanical properties.** In: FANGUEIRO, Rev. Fibrous and composite materials for civil engineering applications. Woodhead Publishing, 3ed. 2011.

ARAUJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2017.

ALFARO SOTO, M.A., **Estudo da condutividade hidráulica em solos não saturados.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 1999.

AL-REFEAI, T. O. **Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions.** Geotextiles and Geomembranes, vol. 10, n. 4, p.319-333, 1991.

AL WAHAB, R.M.; AL-QURNA, H.H. **Fiber Reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures.** Geosynthetics '95 Conference, Nashville. Proceedings. vol.2, p.433-466, 1995.

AL WAHAB, R.; EL-KEDRAH, M. **Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay.** In: ASCE. Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics. [S.l.], p.791–805, 1995.

AZIZ, H.A., A.A.M. HAQUE, M.S. YUSOFF AND Y.T. HUNG. **Landfill for Solid Waste Disposal.** In: Handbook of Environmental and Waste Management, World Scientific Publishing Co, Singapore, vol. 2, p.177-364, 2014.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia Ambiental.** [S.l: s.n.], 2008.

BRASIL, Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**, 2010.

BUDINSKI, K.G. **Engineering Materials; properties and selection.** New Jersey: Prentice Hall International, 5ed, 653p, 1996.

BUENO, B. S.; LIMA, D. C.; TEIXEIRA, S. H. C.; RIBEIRO, N. J. **Fiber Soil Reinforcement: Basic Understanding.** In: 3rd International Symposium on Environmental Geotechnology, San Diego, vol. I. p.878-884, 1996.

CAMAPUM, J.C.; [et al] orgs. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. São Paulo, 2015.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos.** Ed. Marconi, Campina Grande – PB, 310p, 1997.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2005.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2001.

CASTRO, Cíntia Lopes de. **Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2020.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos Sólidos Industriais.** São Paulo, 2ed. 233p, 1993.

DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering,** PWS Publishing Company, USA, 4ed, 712p, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 093/94 – Solos - Determinação da densidade real.** 1994.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio

Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2000.

FRANCESCHET, M. **Estudo dos solos utilizados em camadas de base e cobertura em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos de Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2006.

FREDLUND, D.G.; XING, A. e HUANG, S., **Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristic Curve.** Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, p.533-546, 1994.

FREDLUND, D.G. e RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils.**, New York: John Wiley e Sons, Inc. 517p, 1993.

HANNANT, L. **Fiber-reinforced cements and concretes.** In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature and behavior. 2ed. London: J. M. Illston/E e FN Spon, p.359-403, 1994.

HAUSER, V.L. **Evapotranspiration cover for landfills and waste sites.** Boca Ranton: CRC Press, 2009.

HAUSER, V.L. Hauser, B.L. Weand, M.D. Gill, **Natural covers for landfills and buried waste.** *Journal of Environmental Engineering*, vol. 127, n. 9, 2001.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras impermeáveis horizontais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2002.

HOLLAWAY, L. **Polymers and polymer composites.** In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature end behavior. London: J. M. Illston/E e FN Spon, 2ed. p.321-358, 1994.

KLUTE, A. e DIRKSEN, C. **Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods.** In: Klute, A. Ed., *Methods of Soil Analysis - Part 1 - Physical and Mineralogical Methods*, American Society of Agronomy, Madison, p.687-734, 1986.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics, SI version.** John Wiley e Sins, Inc., Singapura, 553p, 1969.

LISBOA, Rafael Luis Lobato. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 2006.

LODI, P. C.; ZORNBERG, J. G.; BUENO, B. S. **Uma breve visão sobre geossintéticos aplicados a aterros sanitários.** *Revista Tecnologia Fortaleza*, vol.30, n.2, 2009.

MAGALHAES, Paulo Rossy Forte. **Caracterização de argilas para a utilização em camadas de impermeabilização em sistemas de cobertura de aterros sanitários no semiárido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Ceará - UFC, Fortaleza, 2019.

- MAHER, M.; HO, Y. **Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite**. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 120, n. 8, p.1381–1393, 1994.
- MILLER, C. J. AND RIFAI, S. **Fiber reinforcement of waste containment soil liners**. J. of Environmental Eng., ASCE, August, p.891-895, 2004.
- MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPANELLA, R. G. **Permeability of compacted clay**. Journal Soil mechanics and foundation division. ASCE, 91 (4), p.41-65, 1965.
- PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 294p, 2018.
- PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de Textos, São Paulo, 3ed. vol.1, 356p, 2006.
- RICHARDS, B. G. **Behavior of unsaturated soils**, In: LEE, I. K., ed. Soil Mechanics. New York, American Elsevier Publishing Company, Inc., 1974.
- STERCK, Wagner Nogueira. **Estudo da função de condutividade hidráulica de solos não saturados através de amostras centrifugadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, 2011.
- SILVA, Thiago Fernandes da. **Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2017.
- SOARES, Andressa Franco. **Cobertura de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos avaliada sob o enfoque da oxidação microbiológica de metano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, 2011.
- TANG, C.-S.; SHI B.; CUI Y.-J.; LIU C.; GI K. **Desiccation cracking behaviour of polypropylene fibre-reinforced clayey soil**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 49, p.1088-1101, 2012.
- TORRALBA, V. **Influência do método de compactação na permeabilidade de uma mistura colúvio-composto orgânico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2007.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza: Biblioteca Universitária, 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers**. Office of solid waste and emergency response. EPA-540-R-04-007. Washington DC.: USEPA, 421p, 2004.