



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**VITÓRIA LIMA TAVARES**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE SOLO E**  
***BIOCHAR* DE CASCA DE COCO PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE**  
**COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO**

**FORTALEZA**

**2024**

VITÓRIA LIMA TAVARES

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE SOLO E  
*BIOCHAR* DE CASCA DE COCO PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE  
COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

FORTALEZA

2024

VITÓRIA LIMA TAVARES

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE SOLO E  
*BIOCHAR* DE CASCA DE COCO PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE  
COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 26/02/2024.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Examinador interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar (Examinador externo)  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

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)

---

T233a Tavares, Vitória Lima.  
Análise das propriedades geotécnicas de misturas de solo e biochar de casca de coco para aplicação em camadas de cobertura de aterro sanitário / Vitória Lima Tavares. – 2024.  
87 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Biochar. 2. Aterro sanitário. 3. Propriedades geotécnicas . I. Título.

CDD 624.15

---

*Dedico este trabalho ao meu pai, por  
ser minha inspiração e incentivo  
diário.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, que me concedeu a graça de concluir mais essa etapa na vida acadêmica, me mantendo firme durante esses dois anos de mestrado.

A minha família, meus pais (Shirley Lima e João Tavares) e meu irmão (João Francisco), que são minha base e motivação, além de, se esforçarem todos os dias para que eu chegasse até aqui.

Ao Prof. Dr. Anderson Borghetti, pela excelente orientação, disponibilidade, e por todo o incentivo e ajuda no decorrer da pesquisa, mas principalmente nesse momento final de correções.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Francisco Chagas e Prof. Dr. Marcos Porto, pelo tempo e paciência dedicado a avaliação deste trabalho, pelas colaborações e sugestões.

Aos colegas do laboratório de mecânica dos solos e pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará (UFC), por todo apoio na realização dos ensaios. Em especial, Anselmo, Roberto, Aninha e Ciroca.

Ao meu amigo Thiago Sena, que tive o presente de conhecer durante o mestrado, que sempre compartilhou seu conhecimento acadêmico e profissional, mesmo quando esteve longe, acompanhou tudo de perto. Agradeço por toda a paciência, amizade e principalmente pelo incentivo. Que venham inúmeras realizações e conquistas profissionais!

Agradeço a minha amiga Juliana Pires, pelo apoio do início ao fim, pela parceria em todos os momentos, sendo mais do que uma amiga de infância, uma grande irmã.

À minha amiga Ana Vitória, pela amizade e companheirismo, por me incentivar e ajudar em todos os momentos. Por me ouvir e acolher em todas as horas.

A todos, que de alguma forma, contribuíram e ajudaram, para que eu me tornasse uma mestra, o meu muito obrigada!!!

*“É justo que muito custe o que muito vale”*

## RESUMO

A camada de cobertura final de um aterro sanitário desempenha um papel fundamental na proteção ambiental, buscando minimizar a entrada de água nos resíduos sólidos depositados e mitigar as emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera. A adição de *biochar* em misturas de solo destaca-se como uma alternativa eficaz para aprimorar as propriedades do solo de cobertura, em virtude de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas e intensificar a capacidade de retenção de água. Assim, este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade de uso de misturas de solo e de *biochar* para a utilização como material de cobertura final do aterro sanitário, a partir da avaliação das suas propriedades geotécnicas. Dessa forma, o programa experimental desta pesquisa, foi desenvolvido em laboratório, que consistiu na produção de *biochar* de fibra de coco e realização de ensaios de caracterização geotécnica de solo e de misturas de solo-*biochar*, com teores de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% em massa. Além disso, os materiais foram moldados na umidade ótima, na energia Proctor Normal, para a realização dos ensaios de permeabilidade, de cisalhamento direto, de adensamento e de curva de retenção. Os resultados dos ensaios permitiram selecionar a mistura que mais adequada para camada de cobertura e indicaram que a adição de *biochar* ao solo causou alterações benéficas, aumentando a capacidade de retenção de água, reduzindo a compressibilidade e mantendo a condutividade hidráulica e resistência próximas do solo natural. A opção mais viável para aplicação em camada de cobertura de aterros sanitários foi a mistura solo-*biochar* 5%, por ser a que mais se adequou aos parâmetros normativos nacionais e internacionais. Este estudo contribui para uma melhor análise dos requisitos e propriedades a serem considerados em ensaios de colunas em laboratório, proporcionando dados para avaliar critérios de dimensionamento e execução em campo. Essas considerações são particularmente aplicáveis em aterros sanitários com características climáticas e de solo semelhantes às investigadas no estudo.

**Palavras-chave:** Aterros sanitários, camada de cobertura final, *biochar*, fibra de coco, propriedades geotécnicas.

## ABSTRACT

The final cover layer of a landfill is crucial for environmental protection, serving to minimize water infiltration into deposited solid waste and mitigate greenhouse gas emissions to the atmosphere. Incorporating biochar into the soil emerges as an effective alternative to enhance cover soil properties, improving physical, chemical, and biological characteristics and intensifies the water retention capacity. This study aims to evaluate the suitability of biochar-amended soil for landfill cover systems based on their geotechnical properties. Laboratory experiments were conducted, involving the production of coconut husk biochar (CHB) and the geotechnical characterization of soil and biochar-amended soil with varying biochar contents (2.5%, 5.0%, 7.5%, and 10.0%, w/w). Hydraulic conductivity, direct shear, and consolidation tests were performed, and water retention curves (WRC) were measured using the filter paper method to assess unsaturated hydraulic properties. The results identify the biochar-amended soil that best aligns with current standards for the cover layer system. The most viable option for application in the cover layer of landfills was the 5% biochar-amended soil, as it best complies with national and international regulatory parameters. Additionally, the addition of biochar to the soil induced changes such as water retention capacity, reduced compressibility, and minimal alterations in hydraulic conductivity. This study contributes for a better analysis of the requirements and properties to be considered in column tests in the laboratory and even to analyze criteria for design, execution, and maintenance of methane oxidative layer for use in landfills with similar climate and soil characteristics.

**Keywords:** Landfills; final cover layer; biochar; coconut husk; geotechnical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de cobertura convencional.....	21
Figura 2 - Esquema de barreira capilar.....	23
Figura 3 - Esquema de camada metanotrófica.....	25
Figura 4 - <i>Biochar</i> de fibra de coco.....	33
Figura 5 - Microestrutura do <i>biochar</i> .....	33
Figura 6 - Representação da curva de retenção de água no solo.....	40
Figura 7 - Zonas da curva de retenção de água no solo.....	42
Figura 8 - Curvas de retenção por tipos de solo.....	43
Figura 9 - Verificação da sucção osmótica e matricial.....	46
Figura 10 - Fluxograma da metodologia utilizada.....	48
Figura 11 - Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC).....	49
Figura 12 - Processo de produção do <i>biochar</i> .....	50
Figura 13 - Processo de homogeneização do solo ao ar livre.....	51
Figura 14 - Mistura de solo e <i>biochar</i> .....	52
Figura 15 - Ensaio de caracterização geotécnica e compactação.....	54
Figura 16 - Ensaio de adensamento.....	56
Figura 17 - Ensaio de cisalhamento direto.....	57
Figura 18 - Ensaio de sucção pelo método do papel filtro.....	58
Figura 19 - Corpos de prova em processo de acondicionamento.....	58
Figura 20 - Processo de pesagem e secagem do papel filtro.....	59
Figura 21 - Curvas granulométricas dos materiais.....	60
Figura 22 - Curva de compactação dos materiais.....	64
Figura 23 - Curvas de Adensamento.....	67
Figura 24 - Tensão de cisalhamento horizontal vs. deslocamento horizontal.....	69
Figura 25 - Tensão cisalhante x tensão normal.....	70
Figura 26 - Curva de retenção de água - solo natural.....	71
Figura 27 - Curva de retenção de água - mistura solo- <i>biochar</i> 5%.....	72
Figura 28 - Curva de retenção de água de ambos os materiais.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos para solos de impermeabilização utilizados em aterros sanitários .....	38
Tabela 2 - Distribuição granulométrica dos materiais.....	61
Tabela 3 - Limites de consistência dos materiais .....	62
Tabela 4 - Densidade real dos materiais.....	63
Tabela 5 - Parâmetros obtidos no ensaio de compactação .....	64
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de permeabilidade à água .....	65
Tabela 7 - Parâmetros do ensaio de adensamento .....	67
Tabela 8 - Parâmetros do ensaio de cisalhamento.....	69
Tabela 9 - Parâmetros obtidos com os ajustes do modelo de Van Genuchten (1980) .....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

$\alpha$  – Parâmetro de ajuste da curva de retenção

# – Diâmetro de abertura da peneira

% – Percentagem

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASMOC – Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia

ASTM – American Society for Testing and Materials

°C – Grau Celsius

$C_c$  – Coeficiente de curvatura

$C_r$  – Coeficiente de recompressão

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH<sub>4</sub> – Metano

cm<sup>2</sup> – Centímetro quadrado

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

GEE – Gases de Efeito Estufa

IP – Índice de Plasticidade

kw – Coeficiente de permeabilidade à água

kPa – Quilopascal

$m$  – Parâmetro de ajuste da curva de retenção

$n$  – Parâmetro de ajuste da curva de retenção

O<sub>2</sub> – Oxigênio

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

LMSP – Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação

NBR – Norma Brasileira

NP – Não plástico

PET – Politereftalato de Etileno

pH – Potencial Hidrogeniônico

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SC – Areia argilosa

SM – Areia siltosa

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos

UFC – Universidade Federal do Ceará

USEPA – United States Environmental Protection Agency

$\theta$  – Umidade volumétrica

$\theta_{res}$  – Umidade volumétrica residual

$\theta_{sat}$  – Umidade volumétrica de saturação

$\psi$  – Sucção

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos.....	17
1.1.1	Objetivo geral .....	17
1.1.2	Objetivos específicos .....	17
1.2	Estrutura da dissertação .....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Aterro sanitário.....	19
2.2	Sistemas de cobertura final de aterros sanitários.....	20
2.2.1	Camada convencional ou resistiva.....	20
2.2.2	Barreira capilar .....	22
2.2.3	Camada evapotranspirativa ou monolíticas .....	24
2.2.4	Camada metanotrófica ou oxidativa .....	25
2.2.5	Camadas alternativas .....	26
2.3	Materiais alternativos de cobertura.....	28
2.3.1	Mistura de solos com compostos orgânicos .....	28
2.3.2	Mistura de solos com fibras .....	29
a)	Fibras naturais.....	29
b)	Fibras minerais .....	30
c)	Fibras metálicas .....	31
d)	Fibras poliméricas .....	31
2.4	<i>Biochar</i> .....	32
2.4.1	Misturas de solos com biochar.....	34
2.4.2	Aplicações do biochar de fibra de coco .....	35
2.4.3	Parâmetros geotécnicos de misturas solo-biochar .....	37
2.5	Curva de retenção .....	40
2.5.1	Modelo para ajuste de curvas de retenção do solo.....	44

2.5.2 Método do papel filtro .....	46
3 METODOLOGIA.....	48
3.1 Materiais .....	49
3.1.1 Solo - Local de estudo .....	49
3.1.2 Produção de biochar.....	50
3.1.3 Misturas solo-biochar .....	51
3.2 Ensaio de laboratório .....	52
3.2.1 Amostragem e programas de ensaios.....	52
3.2.2 Ensaio de compactação .....	54
3.2.3 Ensaio de permeabilidade à água .....	55
3.2.4 Ensaio de adensamento .....	55
3.2.5 Ensaio de cisalhamento direto .....	56
3.2.6 Ensaio de papel filtro .....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	60
4.1 Caracterização geotécnica dos materiais .....	60
4.2 Limites de consistência.....	61
4.3 Densidade real dos grãos .....	63
4.4 Compactação .....	64
4.5 Condutividade Hidráulica.....	65
4.6 Adensamento .....	66
4.7 Resistência ao cisalhamento .....	68
4.8 Curva de retenção .....	71
5 CONCLUSÕES.....	75
5.1 Perspectivas futuras .....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

## 1. INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são estruturas amplamente adotadas como disposição final de resíduos sólidos em vários países devido à sua eficácia na redução do impacto ambiental e à viabilidade técnica e econômica que oferecem. Conforme especificado na NBR 8419 (ABNT, 1992), esse método de disposição de resíduos sólidos utiliza princípios da engenharia para confinar os resíduos em uma determinada área e reduzi-los ao menor volume possível. Geralmente, é utilizado solo como material de cobertura no encapsulamento do aterro.

Toda atividade humana, seja de natureza industrial, domiciliar, comercial ou recreativa, gera resíduos, que caso não sejam devidamente gerenciados, podem causar a contaminação do solo, das águas e do ar, gerando danos à saúde pública e ao meio ambiente. No Brasil, a maior contribuição (66.6% do total emitido) vem da disposição final de resíduos sólidos, além da produção de gases do efeito estufa (GEE), compostos principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que foram estimadas em 20,8% das emissões globais em 2020 (SEEG, 2022).

De acordo com Soares (2011), o funcionamento adequado e sustentável de um aterro sanitário só é possível de ser alcançado por meio do dimensionamento correto de um sistema de cobertura eficaz. Esta camada desempenha um papel fundamental, visto que impede a saída dos gases poluentes produzidos pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos, bem como a infiltração da água da chuva para o interior do maciço sanitário.

Considerando a realidade de muitos aterros sanitários, em que há risco de poluição por meio da emissão de gases e a contaminação do solo devido à entrada de água no maciço, a busca por soluções de mitigação desse potencial impacto trouxe a necessidade de explorar alternativas sustentáveis e eficazes.

Nesse contexto, o uso de *biochar* em misturas de solo surge como uma alternativa viável de melhoria das propriedades do solo para ser utilizado como material de cobertura em aterros sanitários, em decorrência das suas propriedades e benefícios para o meio ambiente. Segundo Tan *et al.* (2015) a superfície porosa do *biochar* é um adsorvente, semelhante ao carvão ativado, porém mais econômico e com menor demanda energética, além de proporcionar maior potencial de aumento de retenção de umidade (Santos *et al.*, 2017).

O termo *biochar* ou biocarvão, refere-se a um material sólido, rico em carbono, obtido a partir da transformação termoquímica da biomassa sob baixa atmosfera de oxigênio, processo denominado de pirólise (GUO *et al.*, 2016). É fundamental destacar que o *biochar*

pode ser produzido a partir de diversas biomassas, como lodo de esgoto (LIMA *et al.*, 2020), bagaço de laranja (FEITOSA, 2019), fibra de coco (BISPO *et al.*, 2019), dentre outros.

Segundo Tan *et al.* (2015), nos últimos dez anos, diversos estudos têm enfatizado os benefícios do uso do *biochar* em várias aplicações, incluindo a redução do aquecimento global, correção das propriedades do solo, armazenamento de carbono e remoção de poluentes de soluções aquosas. Além disso, a matéria-prima para a produção de *biochar* é abundantemente disponível, principalmente a partir de biomassas agrícolas e resíduos sólidos.

As biomassas residuais são excelentes fontes para a produção de *biochar* de baixo custo e de alta qualidade, como a fibra de coco, que além do aproveitamento do resíduo, proporciona diversas alterações nas características geotécnicas do solo. Dentre elas destacam-se, segundo Glaser e Lehman (2002), a redução da compressibilidade do solo, o aumento da permeabilidade, e, de acordo com Suliman *et al.*, (2017), uma maior disponibilidade de água e a capacidade de absorção de nutrientes.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Verificar a viabilidade técnica de uso de misturas de solo e de *biochar* com vistas a utilização como material de cobertura final do aterro sanitário a partir da avaliação das suas propriedades geotécnicas do compósito.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização geotécnica do solo natural e das misturas de solo com *biochar*;
- Analisar a influência da adição de diferentes teores de *biochar* ao solo sobre as propriedades geotécnicas da mistura, como permeabilidade, resistência, compressibilidade, e retenção de água em relação ao solo natural.

## 1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto por cinco seções: Introdução, Revisão bibliográfica, Metodologia, Resultados e Discussão e Conclusões.

Após esta seção, na Revisão Bibliográfica, a pesquisa é fundamentada teoricamente com os conceitos e abordagens de diferentes pesquisadores sobre o tema são expostos.

Na seção Metodologia, é apresentado o programa experimental utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, e as etapas dos métodos de ensaio baseados nas normas vigentes.

Na seção de Resultados e Discussão trata-se da apresentação, análise e interpretação dos resultados obtidos, visando compreender o comportamento das misturas solo-*biochar* em diferentes teores comparado ao solo natural.

Por fim, na seção de conclusões, são apresentadas as conclusões do estudo, resumindo as principais informações obtidas e propondo sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aterro sanitário

Um aterro sanitário é uma estrutura construída seguindo critérios técnicos de engenharia, com a finalidade de assegurar a adequada disposição dos resíduos, sem causar prejuízos à saúde pública e ao meio ambiente (MEEGODA *et al.*, 2016).

A produção de resíduos sólidos está intrinsecamente relacionada aos padrões de consumo e estilo de vida da população. A forma como esses resíduos são tratados reflete diretamente na qualidade de vida da sociedade. Dentro desse contexto, a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um grande desafio ambiental enfrentado pelas áreas urbanas ao redor do mundo. Este desafio tende a se agravar à medida que o consumo de produtos descartáveis aumenta, contribuindo substancialmente para a crescente quantidade de resíduos gerados pela população (PECORA *et al.*, 2009).

Segundo a ABRELPE (2022), em seu “Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2022”, a geração total de RSU no Brasil atingiu a marca de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas em 2022, o que corresponde a 224 mil toneladas/dia, os quais 24,69% são gerados no Nordeste. Além disso, 39,0% dos resíduos coletados no país tiveram a disposição final inadequada.

De acordo com Boscov (2008), os aterros de resíduos sólidos apresentam uma característica única quando comparados a outras construções de engenharia. Enquanto em muitas obras é preciso aguardar a finalização para que cumpram sua função, nos aterros sanitários, essa função cessa ao término da construção. Contudo, é fundamental continuar monitorando os aterros sanitários mesmo após sua conclusão, devido à contínua produção de chorume e gases que persiste após o encerramento das atividades no aterro.

O monitoramento das atividades nos aterros sanitários é imprescindível para evitar possíveis danos ao meio ambiente. É importante levar em consideração os aspectos geotécnicos e ambientais para traçar medidas preventivas e corretivas por meio dos resultados das observações de campo e da análise da instrumentação instalada (CATAPRETA *et al.*, 2016).

O encerramento de um aterro sanitário é executado mediante a implementação de um sistema de revestimento final, que pode assumir diversas formas e é composto por uma única camada ou um conjunto de camadas. Esse sistema tem como finalidade isolar os resíduos

sólidos do entorno ambiental, regular o movimento dos gases e restringir a entrada de água no maciço de resíduos (BOSCOV, 2008).

## **2.2 Sistemas de cobertura final de aterros sanitários**

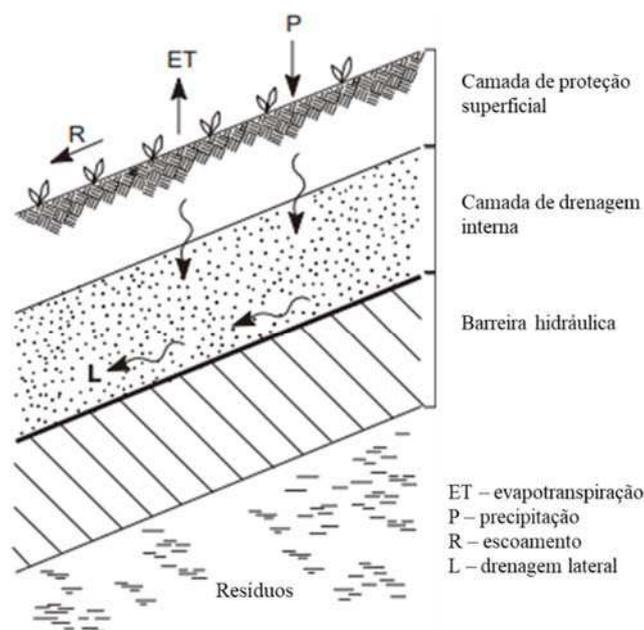
A camada de cobertura final de aterros sanitários tem a função de isolar os resíduos do ambiente externo, controlar o fluxo de gases e limitar a infiltração de água precipitada, reduzindo desse modo a geração de líquidos lixiviados (BOSCOV, 2008).

Os sistemas de cobertura de aterro sanitário desempenham um papel fundamental no funcionamento apropriado dessas instalações. O processo de biodegradação dos RSU depositados nos aterros resulta, entre outros subprodutos, na geração de biogás, que gera gases responsáveis pelo Efeito Estufa (GEE), como o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Se a camada de cobertura não cumprir sua função de encapsulamento de forma adequada, esses gases podem escapar através do sistema de cobertura final e serem liberados na atmosfera. Adicionalmente, a penetração excessiva da água da chuva pode aumentar a produção de líquidos lixiviados, o que pode levar a potenciais problemas de contaminação (SANTOS, 2019; SILVA e TAGLIAFERRO, 2021). Portanto, há diversas denominações empregadas para as camadas de cobertura, variando de acordo com os princípios físicos, químicos e biológicos envolvidos.

### *2.2.1 Camada convencional ou resistiva*

A camada de cobertura convencional ou resistiva, também conhecida por barreira hidráulica, utiliza materiais de baixa condutividade hidráulica saturada para controlar ou reduzir a entrada de água e oxigênio nos resíduos. Essas barreiras são comumente feitas de argila compactada (*compacted clay liner - CCL*), argila geossintética (*geosynthetic clay liner - GCL*), geomembranas (GM), ou uma combinação desses elementos (Figura 1) compactados em umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Essa camada é aplicada diretamente sobre os resíduos sólidos urbanos, usando um solo de baixa permeabilidade à água, podendo ser reforçada com geossintéticos (HUSE, 2007; COSTA, 2015).

Figura 1 - Exemplo de cobertura convencional



Fonte: Adaptado de USEPA (2004).

A camada de argila compactada (CCL) é desenvolvida a partir de solos que contém argilominerais, embora também possa conter elementos beneficiados como a bentonita. Esses solos devem ter um Índice de Plasticidade (IP) entre 7 e 15%, garantindo a capacidade de moldagem e a resistência ao craqueamento causado por variações de umidade. Além disso, a permeabilidade à água recomendada é inferior a  $10^{-9}$  m/s (USEPA, 2004).

A capacidade de retenção de água de argilas está relacionada à sua composição mineralógica, o que influencia diretamente na permeabilidade da camada de cobertura. Isso é evidente em solos onde o mineral argiloso predominante é a montmorilonita, conhecida por sua natureza hidrofílica. Essa afinidade com as moléculas de água leva à expansão desses materiais, reduzindo os espaços vazios disponíveis para a livre circulação da água (ARAÚJO, 2017).

Existem vários métodos e projetos para a construção da camada de cobertura, sendo a utilização de solos argilosos compactados, com baixa condutividade hidráulica, o método mais empregado (HUSE, 2007). Contudo, o uso de camadas resistivas para cobertura dos resíduos apresenta certas limitações, como a perda de água do solo devido ao ressecamento da camada causado pela evaporação. Dessa forma, a aplicação exclusiva de uma camada de argila compactada não é recomendada em regiões de climas áridos ou semiáridos, pois esse sistema tende a passar por alterações físicas significativas, impactando sua eficácia devido às

variações consideráveis de temperatura (ZORNBERG *et al.*, 2003; USEPA, 2004; SOARES, 2011).

Melchior (1997) realizou um estudo de monitoramento de campo em Hamburgo - Alemanha, durante um período de oito anos, e constatou que a percolação pela camada de cobertura começou a aumentar 20 meses após a implementação do experimento, principalmente após um verão seco. Nesse período, a taxa de infiltração subiu de menos de 1% da precipitação para 17% nas áreas de cobertura mais espessas e para 26% nas áreas de cobertura menos espessas. Durante a análise das camadas de cobertura do solo, foram identificadas várias fissuras no solo de cobertura, com largura de alguns milímetros, atribuídas ao ressecamento dos solos. Além disso, o estudo observou a penetração das raízes das plantas em toda a profundidade da camada de cobertura.

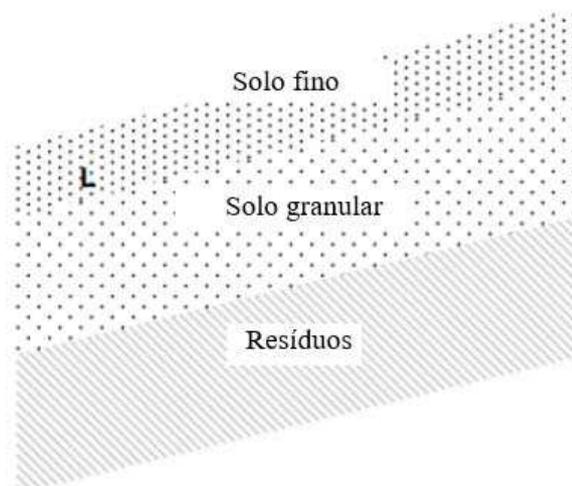
Deve-se, portanto, garantir a proteção dessa camada, seja por meio de uma cobertura vegetal rasteira ou de compostos com capacidade de retenção hídrica. Essa medida visa minimizar a perda de água para o ambiente e assegurar a máxima eficiência dessa cobertura (ARAÚJO, 2017).

### *2.2.2 Barreira capilar*

As barreiras capilares consistem em uma camada de solo fino sobrejacente a uma camada de solo grosso, sendo seu funcionamento baseado na interação de forças capilares e no fluxo de água em solos não saturados em materiais com diferentes permeabilidades (USEPA, 2004; MOREIRA, 2018).

Geralmente a camada de solo fino é composta por argila ou silte-argiloso, e possui maior capacidade de armazenar água. Enquanto a camada de solo granular consiste em areia ou cascalho, e possui a condutividade hidráulica maior do que a do solo fino, na condição de fluxo não saturado, como pode ser observado na Figura 2 (ARAÚJO, 2017).

Figura 2 - Esquema de barreira capilar



Fonte: Adaptado de USEPA (2004).

A camada de solo fino atua como uma área de armazenamento e retenção, impulsionada pelas forças capilares, e possui alto grau de saturação e baixa permeabilidade à água. Por outro lado, a camada de solo granular funciona como uma descontinuidade hidráulica ou um sistema de ruptura capilar (*capillary break*) na interface entre as camadas. Esse sistema possibilita que a camada de solo fino retenha mais água do que um sistema de cobertura monolítica de igual espessura, proporcionando assim uma capacidade maior de armazenamento e retenção de água (MORRIS e STORMONT, 1999; USEPA, 2004; ALMEIDA, 2011; COSTA, 2015; ARAÚJO, 2016).

Segundo Araújo (2016) esse tipo de barreira deve ser projetada para controlar o fluxo de água e ar para o interior do aterro. Esses sistemas de cobertura são inclinados de maneira a permitir que a água, ao infiltrar pela camada capilar, seja direcionada lateralmente em direção aos coletores de águas pluviais. Isso evita que a água alcance os resíduos confinados, garantindo a drenagem adequada e protegendo os materiais depositados no aterro.

Entretanto, em períodos prolongados ou de chuvas intensas, a eficiência da barreira capilar pode ser comprometida, levando a um potencial aumento na quantidade de água que percola em direção à massa de resíduos, prejudicando o desempenho do sistema (MOREIRA, 2018).

Em condições de solo saturado, como em regiões de clima úmido, a quebra do efeito capilar pode desencadear a percolação através da cobertura. Semelhante às barreiras de evapotranspiração, as barreiras capilares costumam possuir uma camada superficial destinada a sustentar o crescimento vegetal e oferecer proteção contra processos erosivos.

Contudo, a utilização de barreiras capilares nos sistemas de cobertura está se popularizando, especialmente em áreas áridas e semiáridas dos Estados Unidos (USEPA, 2004). Embora essas abordagens alternativas possam ser eficazes no gerenciamento hidráulico, é importante destacar que não devem ser aplicadas em aterros de RSU sem considerar a contenção dos componentes gasosos. Em locais onde o controle da coleta de gás é crucial para evitar a migração do gás para fora da área, sua utilização pode não ser recomendada.

### 2.2.3 Camada evapotranspirativa ou monolíticas

As camadas evapotranspirativas (ET) ou monolíticas geralmente são compostas por uma camada espessa de solo de textura fina, como areias finas, siltes e siltes argilosos. Esses solos possuem capacidade de reter água e servem como suporte para o crescimento da vegetação (USEPA, 2004).

Algumas coberturas finais alternativas foram desenvolvidas para locais áridos onde o solo e os materiais funcionam como camadas de armazenamento de água, efetivamente como camadas de baixa permeabilidade em solos não saturados. As barreiras evapotranspirativas atuam como uma camada única para reter a água oriunda das precipitações em períodos chuvosos.

Para Zornberg *et al.* (2003), as coberturas evapotranspirativas funcionam como uma esponja ou um reservatório que armazena água durante eventos de precipitação, e liberam de volta para a atmosfera por meio da evapotranspiração, em períodos secos. Os solos predominantemente utilizados nessa camada são os siltes e argilas de baixa plasticidade, pois possuem a capacidade de reter água, reduzindo ao mesmo tempo a probabilidade de ocorrência de rachaduras e de fissuras decorrentes do ressecamento.

De acordo com a USEPA (2004), a recomendação de uso dessas barreiras é direcionada para regiões áridas e semiáridas, onde a precipitação é baixa e a taxa de evaporação é alta, caracterizadas por uma vegetação escassa. A espessura dessas barreiras geralmente varia de cerca de 0,90 m a mais de 2 m. Elas são frequentemente revestidas por uma camada superficial, não apenas para dar suporte à vegetação, mas também para proteger contra a erosão e controlar a infiltração.

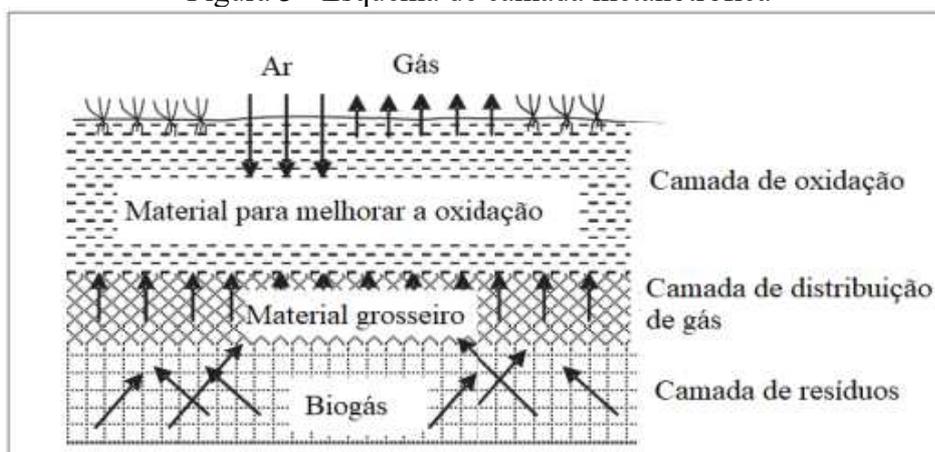
Catapreta (2008) avaliou o comportamento de duas camadas de cobertura em um aterro sanitário experimental de Belo Horizonte-MG, sendo a primeira evapotranspirativa e a segunda uma barreira capilar, ambas compostas por um solo fino. Os resultados dos estudos

indicam que a camada evapotranspirativa teve um desempenho superior em condições de precipitação intensa, atribuído à variação das espessuras das camadas de solo fino empregadas.

#### 2.2.4 Camada metanotrófica ou oxidativa

A camada de cobertura metanotrófica utiliza na sua composição produtos orgânicos. Esses materiais são selecionados para estabelecer condições ideais que promovem o crescimento de microrganismos capazes de oxidar o gás metano, como representado pela Figura 3 (HUBER-HUMER *et al.* 2009).

Figura 3 - Esquema de camada metanotrófica



Fonte: Moreira, 2018.

Na camada de cobertura do aterro sanitário, o processo de oxidação do metano encontra condições favoráveis, principalmente devido à sua permeabilidade aos gases gerados no interior do aterro. Especificamente, a oxidação biológica do metano é um fenômeno natural que ocorre pela atividade microbiana na presença de metano e oxigênio. Esse processo envolve o consumo de metano por bactérias metanotróficas, que convertem o metano em água, dióxido de carbono, biomassa e calor (TEIXEIRA *et al.*, 2007). É uma transformação importante que ajuda a mitigar a liberação direta de metano para atmosfera pelo aterro sanitário, que é um gás responsável pelo efeito estufa.

A utilização de filtros de oxidação de metano é uma alternativa de custo mais baixo para tratar as emissões difusas de metano nos aterros sanitários (BAHR *et al.*, 2006). Santos (2015), estudou a utilização de diversos materiais de filtros, tanto em laboratório quanto em campo, para reduzir as emissões de CH<sub>4</sub>. Esses materiais incluem compostos orgânicos

resultantes da compostagem, produtos similares derivados de tratamento mecânico biológico de resíduos (MBT), resíduos de madeira, de casca de frutas, além de materiais inorgânicos como cinzas, areias e solos. Há também experimentos com misturas de materiais orgânicos e inertes, todos com o propósito de mitigar a liberação de metano nos aterros sanitários.

Esse tipo de camada muitas vezes se torna mais adequado para aterros de pequeno e médio porte, tendo em vista que a exploração energética do biogás se torna mais viável técnica e economicamente (LOPES, 2011). Nestes casos, a camada oxidativa desempenha um papel fundamental na redução das emissões fugitivas. Ela ajuda a controlar e mitigar a liberação de gases para a atmosfera, sendo uma estratégia crucial quando a captura e utilização do biogás não são viáveis. Assim, a implementação dessas camadas se torna ainda mais relevante para minimizar os impactos ambientais resultantes das emissões em aterros menores.

Além disso, pode-se utilizar uma camada de vegetação para proteger o sistema de impermeabilização do topo das células em todos os casos. É preferível empregar vegetação nativa, pois possui maior resistência às condições locais em comparação com vegetações exógenas (MARIANO, 2008).

### 2.2.5 *Camadas alternativas*

Os sistemas de cobertura alternativos podem envolver misturas de solos com outros materiais não tradicionais, como compostos orgânicos, resíduos de construção civil, lodo de ETA e *biochar*. O objetivo das camadas alternativas é aprimorar o desempenho da cobertura do aterro, reduzindo as emissões de gases, aumentando a retenção de líquidos e minimizando os custos, tudo isso sem comprometer a segurança dos trabalhadores e da população em geral (COSTA *et al.*, 2018).

De acordo com a USEPA (2011), a camada de cobertura final exerce diferentes funções, dentre elas o controle da umidade e da percolação dos resíduos, o disciplinamento das águas do escoamento superficial, minimização da erosão, evitar a exposição direta dos resíduos, o controle das emissões de gases e odores na atmosfera, a prevenção da proliferação de vetores de doenças e outras ameaças à saúde pública, bem como a criação de um aspecto estético para possibilitar outros usos finais do local.

Um exemplo de uso de camadas alternativas de cobertura é o estudo feito por Castilhos Jr. *et al.* (2011), que utilizou o uso de lodo proveniente da ETA e da ETE de Jurerê Internacional, localizada em Florianópolis-SC, como um material alternativo na composição

da camada de cobertura de aterros sanitários. Inicialmente, foi feita a caracterização dos lodos para conhecer suas propriedades físico-químicas e bacteriológicas. Em seguida, o lodo foi misturado com solo natural na proporção de 1:1 e estabilizado com 15% de cal virgem (CaO). A quantidade de cal utilizada foi em relação ao peso seco da mistura 1:1 de lodo de ETE mais lodo de ETA. Os autores afirmam que esta proporção pode variar em função da qualidade do solo, do lodo e dos requisitos agrônômicos e geotécnicos que se exige. Após a avaliação e adequação ambiental, o lodo estabilizado quimicamente foi então misturado com solo natural para comparação dessa nova composição. Os resultados apontaram que essa nova composição para a camada de cobertura possui potencial para ser utilizada como um sistema de proteção superficial eficiente em aterros sanitários.

O estudo de Pascoal e Mesquita (2014) investigou a viabilidade do uso de RCC (Resíduo de Construção Civil) misturado com solo em camada de cobertura de aterros de resíduos sólidos. Foram realizados testes físicos e estruturais em amostras de solo e em misturas de solo e RCC em proporções de 10%, 20% e 30% de RCC em massa. O objetivo foi determinar os parâmetros geotécnicos da mistura entre o solo do aterro sanitário e o RCC para a construção de *liners* de cobertura na região de Samambaia-DF. O estudo recomendou o uso de uma proporção ideal de 30% de RCC em massa de solo, resultando em características que reduzem a retração do solo, indicando um potencial interessante para aplicação na cobertura do aterro.

No Brasil, não há uma obrigatoriedade legal específica quanto ao material a ser empregado na camada de cobertura de aterros sanitários. De acordo com a NBR 13896 (ABNT, 1997), é estipulada a necessidade de elaboração e instalação de uma cobertura final para o aterro, compreendendo um sistema de impermeabilização superior. Esta norma estabelece como referência mínima uma condutividade hidráulica do solo saturado da ordem de  $10^{-8}$ m/s.

Diversas pesquisas têm explorado a busca por materiais alternativos que apresentem características apropriadas e sejam capazes de combinar baixa condutividade hidráulica com maior estabilidade diante das variações climáticas e da formação de fissuras devido ao ressecamento. Exemplos incluem a incorporação de fibras e resíduos industriais, como cinzas de carvão, *biochar*, areia de fundição e resíduos da construção civil, com o objetivo de aprimorar o desempenho das camadas impermeabilizantes (HEINECK, 2002; LUKIANTCHUKI, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2011; YAGHOUBI, 2011; AMADI e EBEREMU, 2013; GUSMÃO, 2020). A seguir serão apresentados alguns dos materiais utilizados.

## 2.3 Materiais alternativos de cobertura

A utilização de materiais alternativos no campo da engenharia vem ganhando destaque nos últimos anos, o que se deve, especialmente, aos aspectos econômicos e ambientais. Encontrar uma aplicabilidade para os resíduos, é uma solução eficaz, no sentido de buscar minimizar os problemas relacionados à sua geração, ao seu grande volume e aos espaços para sua disposição (MARIANO, 2008).

### 2.3.1 Mistura de solos com compostos orgânicos

O uso de biocoberturas representa uma solução que busca valorizar o aproveitamento de materiais alternativos, incluindo fertilizantes orgânicos compostos de diversas fontes, como alimentos, resíduos de podas e jardinagem, além de lodos estabilizados originados de estações de tratamento de esgoto ou água (GOMES, 2020).

A utilização de composto orgânico nas coberturas de aterros sanitários aprimora as características estruturais, físicas e químicas do solo abrangendo modificações na porosidade, na capacidade de retenção de água, no teor de matéria orgânica e na quantidade de nutrientes, que desempenham um papel importante na oxidação do metano (CH<sub>4</sub>). A inclusão de composto orgânico na camada de cobertura contribui para aumentar a resistência ao fluxo de gás, devido ao teor elevado de água retido por esse material. Compostos orgânicos possuem uma alta capacidade de retenção de umidade e uma permeabilidade reduzida a gases na camada de cobertura, levando a coeficientes de difusão menores (STERN *et al.*, 2007; CHIEMCHAISRI *et al.*, 2012; SANTOS, 2019).

A aplicação de materiais residuais com solos traz vantagens significativas, uma vez que pode acarretar no melhoramento do desempenho das camadas de cobertura, além de contribuir para a preservação das reservas de solo e dos recursos naturais. Isso, por sua vez, favorece a preservação do meio ambiente e a sustentabilidade da obra (SANTOS, 2019; SENA, 2022).

Além disso, a aplicação de misturas de solo e composto orgânico como cobertura oxidativa de aterro sanitário contribui para a redução da quantidade extraída de matéria-prima das jazidas de solo (SANTOS, 2019).

Vários estudos em laboratório e em campo, como Mor *et al.* (2006), Scheutz *et al.* (2009), Huber-Humer *et al.* (2011), Roncato e Cabral (2012) e Safari *et al.* (2017), Sena (2022), mostram que o composto orgânico pode ser uma alternativa eficaz para a oxidação

do gás metano (CH<sub>4</sub>) em aterros sanitários. Além disso, o composto orgânico tem o potencial de reduzir os custos de implantação, uma vez que pode substituir total ou parcialmente outros materiais, especialmente aqueles com custos mais elevados ou indisponíveis localmente, como solos arenosos e argilosos.

### 2.3.2 Mistura de solos com fibras

Segundo Palmeira (2018), o reforço de solos por meio da adição de fibras não é uma técnica recente. Os incas já empregavam essa abordagem na construção de estradas para templos religiosos, utilizando pelos de vicunha misturados ao solo local. Algumas dessas estradas continuam a resistir até os dias atuais. Contudo, a incorporação de fibras em obras geotécnicas ainda pode ser considerada pouco comum.

Um dos fatores que pode restringir a aplicação de misturas de solo e fibras em projetos geotécnicos é a obtenção de uma mistura homogênea em campo. Esse aspecto é fundamental para assegurar um desempenho adequado do solo reforçado. Consequentemente, é crucial dar atenção especial à uniformização dos materiais. Esse processo pode ser executado utilizando equipamentos específicos, que permitem alcançar uma distribuição uniforme das fibras. Além disso, é importante evitar a predominância de uma orientação específica das fibras no solo, uma vez que tal situação pode prejudicar significativamente o comportamento mecânico da mistura (PALMEIRA, 2018).

As fibras podem ser categorizadas em quatro principais classes: naturais, minerais, metálicas e poliméricas. A seguir serão apresentadas algumas características de cada tipo de fibras.

#### a) Fibras naturais

As fibras naturais são predominantemente de origem vegetal. De acordo com Hannant (1994), as fibras vegetais empregadas em materiais compostos incluem bambu, juta, capim elefante, coco, sisal, malva, piaçava, cana-de-açúcar e linho.

Um das fibras vegetais que pode ser misturada ao solo para atuar como reforço é extraída da casca de coco verde (*Cocos nucifera*), que é um material muito abundante no Nordeste brasileiro e de baixo custo. A maior parte da massa do coco está em sua casca, que é descartada nos lixões e aterros sanitários (SILVEIRA e ARAGÃO, 2016). No entanto, as fibras de coco possuem propriedades mecânicas notáveis, como dureza e elasticidade, que conferem características de resistência e durabilidade. Devido a essas propriedades, têm sido

amplamente estudadas como um potencial meio de reforço para solos, oferecendo diversas oportunidades para melhorar suas propriedades.

A facilidade de produção, baixo custo e a disponibilidade em grande quantidade são outras vantagens adicionais apresentadas por este tipo de material, além de contribuir na redução da quantidade desse resíduo sólido nos aterros sanitários. Para produção das fibras e seu uso como substrato, a casca de coco passa por diversas operações como corte, desfibramento, secagem, trituração, lavagem e, quando necessário, compostagem (CARRIJO, *et al.*, 2002).

A fibra da casca de coco tem sido usada e estudada por pesquisadores em todo o mundo e possui diversas finalidades, seja como substrato agrícola (CARRIJO, *et al.*, 2002); adição em concreto não estrutural (BENTO *et al.*, 2008); misturas asfálticas (VALE *et al.*, 2007), cobertura de aterro sanitário (OLIVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2022).

De acordo com Oliveira Júnior *et al.* (2022), a incorporação de fibras de coco ao solo aumenta a porosidade dessa mistura, resultando em uma capacidade superior de retenção de água em comparação com o solo não modificado. Isso pode estar relacionado diretamente com a umidade volumétrica de saturação e o teor de fibras.

#### *b) Fibras minerais*

Algumas das fibras minerais que são amplamente empregadas, como as fibras de carbono e vidro, que apresentam alta resistência mecânica e estabilidade dimensional, além de boas propriedades elétricas, resistência química e à corrosão elevada (CALDEIRA, 2012).

Consoli *et al.* (2004), realizou um amplo estudo avaliando o comportamento de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com fibras de vidro, poliéster e polipropileno. As diferentes fibras tiveram influências distintas nas propriedades mecânicas do compósito. Com as fibras de poliéster e vidro houve uma redução da rigidez e um aumento do ângulo de atrito em ambas as matrizes (cimentada e não cimentada). Essas fibras também causaram uma redução na resistência, sendo mais notável no compósito cimentado. Ao contrário das fibras de poliéster e vidro, as fibras de polipropileno, causaram uma redução significativa na resistência, da areia cimentada, mudando o modo de ruptura de frágil para dúctil, especialmente para o maior comprimento de fibra estudado (36mm), aumentando assim a capacidade de absorção de energia. Isso evidencia que não é possível estabelecer padrões de comportamento sem uma compreensão prévia das propriedades dos materiais envolvidos.

### *c) Fibras metálicas*

As fibras metálicas mais utilizadas são as fibras de aço, que possuem resistência à tração de aproximadamente 1100 MPa e seu módulo de elasticidade de 200 GPa. Essas fibras têm uma diversidade de formatos disponíveis para aprimorar a resistência ao arrancamento. Dependendo do lugar que são inseridas, podem apresentar problemas de corrosão. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (TAYLOR, 1994). O seu formato pode ser bastante variável, de forma a aumentar a sua aderência com a matriz (HANNANT, 1994).

### *d) Fibras poliméricas*

As fibras poliméricas possuem grande variedade na estrutura química dos polímeros, sendo um destaque para o reforço de solos, uma vez que podem ser produzidas em vários tipos. Entre as fibras poliméricas mais comuns, destacam-se as de polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida (BOLAÑOS, 2013).

Costa *et al.* (2015), realizaram uma avaliação do comportamento de misturas de solo que incorporavam fibras de Politereftalato de Etileno (PET), provenientes de garrafas de refrigerantes usadas, com o objetivo de mitigar os efeitos de retração e formação de fissuras nas camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos em Samambaia-DF. Para entender o impacto da inclusão das fibras, foram realizados ensaios hidráulicos e mecânicos para determinar a quantidade ideal de adição de fibras, considerando o processo de ressecamento. Os resultados obtidos mostraram que o comportamento em relação ao ressecamento e à formação de fissuras foi consideravelmente influenciado pelos ciclos de umedecimento e secagem, bem como pela adição das fibras. A inclusão de fibras alterou o padrão de formação de fissuras, retardando seu surgimento e reduzindo o fator de intensidade de fissuração quando comparado ao solo sem adição de fibras. Em virtude disso, a utilização de misturas de solo com fibras de PET pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a resistência à retração e reduzir a formação de fissuras nas camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos.

## 2.4 Biochar

O *biochar* é o produto rico em carbono e é feito a partir de biomassa, como madeira, folhas, esterco, lodo, bagaço de cana, sendo aquecido a temperaturas relativamente baixas (<700 °C) com fornecimento limitado de oxigênio (LEHMANN e JOSEPH 2009). Estudos com foco na aplicação de *biochar* foram conduzidos nos últimos anos nos aspectos de reutilização de bio-resíduos, produção agrícola, tratamento e controle de contaminantes (GURWICK *et al.* 2013).

O *biochar* desempenha um papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas, pois consiste em estruturas carbonáceas de notável estabilidade química, degradando-se em taxas mais lentas no ambiente. Isso resulta na criação de um depósito de carbono de longo prazo no solo, diminuindo as taxas de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Além disso, o *biochar* atua como um condicionador de solo, melhorando as características físicas, químicas e biológicas, aumentando a fertilidade, a capacidade de retenção de água, a disponibilidade de água para as plantas e a eficiência no uso de fertilizantes químicos (TEIXEIRA *et al.*, 2015; PETTER *et al.*, 2016; VIOTTO *et al.*, 2018).

Em virtude disso, a aplicação do *biochar* tem sido amplamente considerada como uma medida eficaz para a diminuição da emissão de carbono, melhoria do rendimento das culturas e remediação da contaminação do solo. Nos últimos anos, houve um considerável volume de pesquisas concentradas nessas áreas, a maioria com resultados positivos, considerando a aplicação de *biochar* como uma medida eficaz e promissora (CHEN *et al.*, 2015).

As propriedades físico-químicas do *biochar*, como sua alta área superficial, porosidade, e capacidade de adsorver uma variedade de compostos, incluindo metano (CH<sub>4</sub>), são favoráveis para aplicação no solo de cobertura de aterros sanitários afetando o crescimento bacteriano no solo e, portanto, a eficiência da oxidação do metano no solo (WONG *et al.*, 2019). Vale ressaltar que, as propriedades dos biocarvões variam de acordo com o tipo de biomassa e as condições de sua produção, e, portanto, é necessário o conhecimento destas características para verificar seu uso adequado. A Figura 4 representa o *biochar* produzido a partir da fibra de coco.

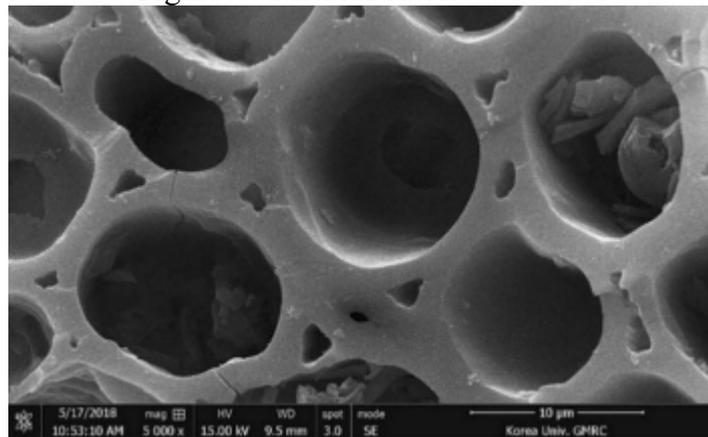
Figura 4 - *Biochar* de fibra de coco



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O tamanho dos poros do *biochar* (Figura 5) e a distribuição de nutrientes como N, P, K, Mg e Na, sustentam e governam o crescimento microbiano. A alta área superficial específica do *biochar* também contribui para a retenção de nutrientes por adsorção no solo (CHATHURIKA *et al.*, 2016; RODRÍGUEZ-VILA *et al.*, 2016). Em aterros sanitários, os nutrientes liberados do *biochar* beneficiam o aumento de micro-organismos no solo, especialmente em áreas de cobertura que contém baixo teor de nutrientes (WONG *et al.*, 2019).

Figura 5 - Microestrutura do *biochar*



Fonte: Wani *et al* (2022).

Além disso, o *biochar* aumenta a capacidade de retenção de água no solo, especialmente em coberturas de aterros que foram submetidas a inúmeros ciclos de molhagem e secagem (WONG, 2017; WONG *et al.*, 2019).

Um aspecto importante ressaltado por Reddy *et al.*, (2021) é a avaliação da viabilidade e eficácia da cobertura final de aterro sanitário alterado com adição de *biochar*, através de testes em colunas realizados em laboratório, bem como a heterogeneidade de resíduos.

#### 2.4.1 Misturas de solos com *biochar*

O uso de *biochar* como condicionador de solo tem sido explorado devido ao seu potencial para aprimorar a estrutura do solo, suas características químicas (DOWNIE *et al.*, 2009) e o crescimento das plantas (GONZAGA *et al.*, 2019).

A biomassa vegetal refere-se a todo material proveniente de fontes renováveis, sendo uma potencial fonte de energia, podendo ser obtida a partir de plantações, resíduos de colheitas agrícolas, podas e serrarias (CAI, 2017). No entanto, nem sempre as plantas são totalmente consumidas, resultando em resíduos, que no período de decomposição dessa biomassa *in natura*, há a liberação de GEE (THANGARAJAN, 2013).

Uma das alternativas para mitigar o impacto ambiental é a transformação desta biomassa em *biochar*, visto que sua degradação é mais lenta que a da biomassa *in natura*, e traz benefícios para o solo (PURAKAYASTHA *et al.*, 2015).

Na intenção de aproveitar os resíduos gerados pela agricultura local, Farzan *et al.* (2017) utilizaram o *biochar* produzido a partir da casca de coco para aprimorar as qualidades do composto derivado de RSU, alterando as proporções nos testes, que resultaram em melhorias comparados aos compostos comerciais.

No Brasil, há resíduos abundantes na agroindústria, como o bagaço da laranja, que o País detém mais da metade da produção mundial de seu suco (NEVES, 2010), e de casca de banana. A aplicação desses materiais na produção de biocarvão surge como um método para diminuir o volume de resíduos e proporcionar uma disposição final mais sustentável, prolongando a vida útil dos aterros sanitários.

Feitosa *et al.* (2020) investigou o comportamento de *biochar*, obtido a partir de resíduos agrícolas, como o *biochar* do bagaço de laranja, que possui pH alcalino e potencial para redução da acidez do solo. O *biochar* de casca de banana apresenta elevados teores de cinzas e de condutividade elétrica, indicando um elevado teor de sais solúveis.

O *biochar* oriundo da palha da cana-de-açúcar se mostrou uma alternativa atrativa, pois, segundo Pires *et al.* (2018), essa biomassa apresentou um elevado potencial para a fixação de

carbono junto ao solo. Ao mesmo tempo, a palha de cana-de-açúcar também possui um elevado rendimento de produção de *biochar*, que torna viável sua aplicação no campo.

Lima *et al.* (2020) utilizou o lodo de esgoto de ETE transformado, por meio do processo de pirólise (queima) lenta, em *biochar*, como alternativa para potencializar o uso da água, na evapotranspiração e na produção da cultura de alface. O uso de *biochar* pode aumentar a eficiência no uso da água pelas culturas de duas maneiras: primeiro, ao aumentar a produção das plantações por meio de modificações no pH, nos níveis de nutrientes e na estrutura de carbono do solo (SOUSA e FIGUEIREDO, 2016); e segundo, ao reduzir a perda de água do solo, ou seja, minimizando a perda por evapotranspiração (LIMA *et al.*, 2018; LIMA *et al.*, 2019). Nesse contexto, o *biochar* mostrou-se ser uma boa alternativa agrícola e ambiental, além de promover a destinação adequada do lodo de esgoto gerado nas Estações de Tratamentos de Esgoto (ETE).

Além disso, o *biochar* representa uma inovação para essas agroindústrias, transformando os resíduos em coprodutos com potencial para geração de renda. A venda do biocarvão como condicionador de solo, componente de substrato e agente filtrante apresenta-se como uma oportunidade econômica adicional.

Sadasivam e Reddy (2015) realizaram um estudo das propriedades de compressibilidade e resistência ao cisalhamento do *biochar* derivado de madeira. O *biochar* foi misturado com solo de cobertura do aterro sanitário, localizado na cidade de Illinois - EUA, e testado sob condições secas e úmidas. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos, como o intercepto coesivo ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ), das misturas solo-*biochar* foram correlacionados com as propriedades físico-químicas do *biochar* ou de solos alterados com *biochar* para desenvolver relações que podem auxiliar na seleção do tipo de cada material para aplicações de engenharia. No geral, este estudo forneceu propriedades necessárias para a análise e projeto de sistemas de engenharia usando *biochars* ou solos alterados com *biochar*.

#### 2.4.2 Aplicações do *biochar* de fibra de coco

O reaproveitamento da casca de coco é considerado uma das práticas mais significativas no contexto da gestão de resíduos em regiões litorâneas do Brasil, principalmente devido ao volume considerável gerado por essa fonte específica de resíduos.

Schena (2019) utilizou resíduos de coco para produzir *biochar* como catalisador na produção de um bio-óleo com melhor composição química. Nesse estudo, a melhor condição de pirólise catalítica foi utilizando 5% do *biochar*, pois o valor agregado do bio-óleo

produzido aumentou 75% quando comparado com o processo não catalítico. Esse estudo forneceu dados que corroboram com o desenvolvimento de uma biorrefinaria baseada nos resíduos provenientes da agroindústria, especialmente as cascas de coco verde, gerando produtos úteis tanto para empresas que produzem o bio-óleo quanto para indústrias de refino.

As atividades agroindustriais são responsáveis por gerar toneladas de resíduos orgânicos compostos, acarretando sérios problemas ambientais como a poluição do solo, das águas superficiais e subterrâneas. Reis *et al.* (2022) utilizou o *biochar* resultante da pirólise da casca de coco, na proporção de 25% aplicado em mudas de *Corymbia Citriodora Hill & Johnson*, e obteve resultados satisfatórios em relação ao desenvolvimento das plantas, pois melhorou o crescimento e as características morfológicas das mudas, sendo recomendado como aditivo e condicionador do solo.

O solo de cobertura corrigido com *biochar* tem o potencial de controlar ou reduzir as emissões de gases de aterro e, especificamente, a oxidação do metano, de uma forma rentável, otimizando as condições ambientais nas quais as bactérias metanotróficas atuam. O *biochar* com sua estrutura porosa e alta área superficial, poderia fornecer um habitat adequado para as bactérias metanotróficas crescerem e se multiplicarem, devido seu potencial de facilitar o processo de oxidação, ampliando-a na camada de cobertura de aterros sanitários (YAGHOUBI, 2011).

Yaghoubi (2011) realizou experimentos em coluna de solo de cobertura de aterro sanitário, adicionado de *biochar* produzido a partir resíduos de madeira, para quantificar os efeitos da alteração dessa mistura na degradação do CH<sub>4</sub> por bactérias metanotróficas. Essa alteração proporcionou condições favoráveis para oxidação para melhorar a degradação do metano na cobertura e melhorou as características físicas e químicas do solo.

Muitos estudos descritos na literatura concentraram-se principalmente na aplicação agrícola, em vez de atender aos objetivos de engenharia. Por exemplo, Kinney *et al.* (2012) investigou as propriedades hidrológicas do solo modificadas com *biochar*, como a capacidade de retenção de água e a hidrofobicidade, porém sem considerar o nível de compactação do solo, que é uma etapa durante a construção de taludes.

A maioria dos estudos sobre *biochar* foram realizados experimentos durante um período de tempo relativamente curto, que pode variar de meses a alguns anos. Esses estudos visaram investigar os efeitos do *biochar* no crescimento das plantas, na atividade microbiana e na remoção de contaminantes (CHEN *et al.* 2015).

No entanto, ainda é um desafio investigar o comportamento físico e químico do *biochar* ao longo de um período mais extenso. Uma potencial estratégia para lidar com essa

questão é utilizar um tipo padronizado de solo e *biochar*, o que poderia permitir uma avaliação mais consistente e prolongada dos efeitos do *biochar* ao longo do tempo.

#### 2.4.3 Parâmetros geotécnicos de misturas solo-*biochar*

As grandes variações nas propriedades das matérias-primas e nas condições de produção tem efeitos significativos nas propriedades do *biochar* (REDDY *et al.*, 2015). A adição de *biochar* no solo aumenta a capacidade do solo de reter nutrientes (LEHMANN e JOSEPH, 2009), o que gera mudanças na natureza física e química do solo alterado, podendo influenciar na textura, estrutura, consistência, distribuição de partículas e tamanho dos poros.

Devido à sua elevada área superficial e porosidade, o *biochar* tem sido associado à melhoria da estrutura e aeração do solo, especialmente em solos de textura fina (KOLB, 2007). O *biochar* também possui uma série de características favoráveis, como alta porosidade interna e alta capacidade de retenção de água, e que também contribuem para melhorar as condições de cobertura do solo para a oxidação microbiana de CH<sub>4</sub>, sendo adequado para uso em coberturas finais com vegetação em aterros sanitários (REDDY *et al.*, 2014; YARGICOGLU *et al.*, 2015).

Quando o *biochar* é utilizado para cobertura de aterros sanitários, seu efeito nas propriedades da mistura do solo é significativo, pois há a capacidade de alterar o aspecto físico, como a área superficial, distribuição do tamanho dos poros, densidade, permeabilidade, compactação, capacidade de retenção de água e resistência ao cisalhamento. Há também a mudança nas características químicas, como pH, conteúdo orgânico (quantidades de hidrogênio e carbono), devido a difusão do metano e disponibilidade de oxigênio e água, que tornam o ambiente mais adequado para atividades microbianas na cobertura do aterro, determinada em grande parte pelas mudanças nas propriedades físicas e químicas do solo causadas pela alteração do *biochar* (REDDY *et al.*, 2015).

A condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência ao cisalhamento representam propriedades geotécnicas fundamentais no projeto de sistemas de cobertura de aterros sanitários, visando a estabilidade e eficácia. A modificação dessas propriedades do solo pelo acréscimo do *biochar* deve ser avaliada para determinar a viabilidade do uso do solo modificado com *biochar*.

O controle geotécnico do solo se baseia na realização de ensaios de caracterização em laboratório, os quais englobam análises de umidade (ABNT, 2016a), limites de liquidez (ABNT, 2016b), limite de plasticidade (ABNT, 2016c), granulometria (ABNT, 2016d),

compactação (ABNT, 2016e), permeabilidade à água (ABNT, 2021), assim como outros. Esses ensaios seguem as normas estabelecidas pela ABNT para solos e a realização desses testes é essencial para definir a utilização do solo para uma determinada função, como por exemplo para ser empregado em aterros sanitários, seguindo as regulamentações nacionais e internacionais, conforme detalhado na Tabela 1. As normas brasileiras em vigor estabelecem somente o valor mínimo do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) a ser atingido ( $10^{-8}$  m/s), sem incluir requisitos relativos ao tipo de solo, suas características geotécnicas, espessura e manutenção ao longo do tempo (MARIANO, 2008).

Tabela 1 - Requisitos para solos de impermeabilização utilizados em aterros sanitários

Fonte	LL (%)	IP (%)	Finos $\phi \leq 0,075$ mm (%)	Fração Argila $\phi \leq 0,002$ mm (%)	Fração de Areia $0,075 < \phi \leq 4,8$ mm	Fração Pedregulho $\phi > 4,8$ mm (%)	$k$ (m/s)
Omafra (2003)	$30 \leq LL \leq 60$	$11 \leq IP \leq 30$	$\geq 50$	$\geq 20$	$\leq 45$	$\leq 50$	$\leq 10^{-9}$
EPA (1989)	-	$\geq 10$	$\geq 20$	-	-	$\leq 10$	$\leq 10^{-9}$
Cetesb (1993)	$\geq 30$	$\geq 15$	$\geq 30$	-	-	-	$\leq 10^{-9}$
USEPA (2004)	-	$07 \leq IP \leq 15$	30-50	-	-	-	$\leq 10^{-7}$
NBR (1997)	-	-	-	-	-	-	$\leq 10^{-8}$

Fonte: Adaptado de Boscov, 2008.

Estudos de Reddy *et al.* (2015) e Sadasivam (2019), demonstram que a condutividade hidráulica do solo aumenta com o aumento do teor de *biochar* acrescentado ao solo, enquanto a massa específica, o que resulta em um efeito benéfico, pois melhora a difusão do oxigênio e oxidação do metano dos aterros sanitários, permitindo a formação de uma maior população de microrganismos aeróbios no solo de cobertura do aterro.

O estudo realizado por Yargicoglu e Reddy (2017) investigou o efeito da adição de *biochar* ao solo de cobertura de aterro sanitário na oxidação microbiana de metano. Nesse estudo, as colunas foram instaladas em um aterro sanitário ativo no Nordeste de Illinois – EUA e comparadas com os testes feitos em laboratório. Os autores observaram que os principais fatores que interferem na remoção de metano dessas coberturas são a umidade do solo e atividade inicial das bactérias oxidantes de metano. Foi levantada a hipótese de que a adição de *biochar* melhoraria o ambiente físico do solo, aumentando a capacidade de retenção de água e a porosidade interna, o que, por sua vez, melhora a atividade das bactérias metanotróficas. A adição de *biochar* impacta fortemente a distribuição da umidade do solo

com a profundidade, e sua alteração para cobrir os solos pode levar a taxas de oxidação mais altas, retendo a umidade na zona oxidativa.

Em a relação à resistência ao cisalhamento e à compressão, há menos estudos sobre o efeito da alteração dessas propriedades em solos misturados com *biochar*. Wani *et. al.* (2022), constataram que a adição de *biochar* ao solo arenoso aumenta o teor de carbono orgânico, alterando a interação entre as partículas do solo. Isso promove a formação de microfissuras no solo e reduz sua resistência. Assim como as modificações na porosidade do solo também podem ser consideradas como um fator que aumenta a resistência na mistura.

A maior parte da aplicação geotécnica do *biochar* concentra-se em solos argilosos expansivos, o que indica que a mistura de *biochar* com solo argiloso aumentou a resistência ao cisalhamento e a deformação volumétrica desse solos. A partir disso, pode-se entender que do ponto de vista de resistência, a aplicação do *biochar* em solos argilosos é mais viável do que em solos arenosos, onde o índice de resistência encontrado foi mais baixo (WANI *et. al.*, 2022).

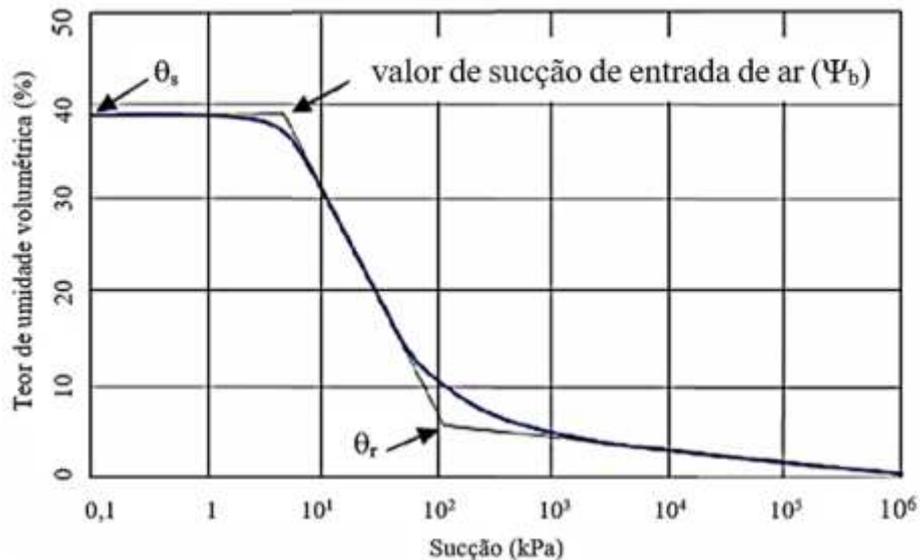
Reddy *et al.* (2015) verificaram o efeito do tamanho das partículas de *biochar* na resistência ao cisalhamento de uma argila siltosa. O estudo realizou testes com a adição de *biochar* de 5%, 10% e 20% ao solo e mostrou que há um aumento na resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de *biochar*. Dentre esses, o teor de 5% apresentou um tamanho de partícula ideal ( $<0,42\text{mm}$ ) que forneceu um intercepto coesivo máximo (41,4 kPa). Os resultados mostraram que a permeabilidade e a resistência ao cisalhamento do aumentaram, e a compressibilidade diminuiu com a adição do *biochar* ao solo e com a diminuição do tamanho das partículas de *biochar* empregado. O estudo mostrou que o solo modificado com *biochar* apresentou propriedades geotécnicas adequadas para servir como materiais de cobertura de aterros sanitários.

Xu *et al.* (2020) realizaram ensaios de resistência ao cisalhamento de argila pura misturada com *biochar* de palha de trigo, submetida a diferentes tensões normais (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa). O *biochar* foi adicionado ao solo com teores de 2,5%, 5%, 10% e 20% de *biochar* em peso. Os resultados indicaram, que quando o teor de *biochar* é inferior a 5%, a argila desempenha um papel dominante na deformação geral. Esse comportamento é invertido de argila para *biochar* quando o conteúdo de *biochar* excede 5%.

## 2.5 Curva de retenção

Segundo Presa (1982), uma maneira de avaliar as mudanças na sucção matricial de um solo é por meio da curva de retenção, que demonstra graficamente a relação entre a sucção matricial ou total e a umidade (gravimétrica ou volumétrica) ou o grau de saturação do solo. Essa curva demonstra a capacidade de retenção de água pelo solo, conforme é mostrado na Figura 6, onde alguns valores são destacados: o teor de umidade volumétrica saturada ( $\theta_s$ ), o valor de sucção de entrada de ar ( $\Psi_b$ ) e o teor de umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ). Essa representação pode ser empregada para estimar parâmetros cruciais na descrição do comportamento do solo não saturado, como condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e variação de volume (FREDLUND *et al.*, 1997).

Figura 6 - Representação da curva de retenção de água no solo



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing (1994).

A curva de retenção de água no solo, conhecida também como curva característica de umidade do solo, possui várias aplicações práticas, técnicas e científicas. Ela é fundamental para determinar a capacidade de campo do solo, o ponto de murcha permanente e a disponibilidade total de água no solo. Essas variáveis são essenciais para um manejo adequado da irrigação e para o balanço hídrico do solo (EMBRAPA, 2007).

A capacidade de campo do solo corresponde à quantidade de umidade retida quando a sucção atinge um valor de 33 kPa, o que representa a água que permanece no solo após 2 a 3 dias de excesso desse líquido ser drenado (SSSA, 1984). O ponto de murcha permanente é definido como o teor de umidade do solo, no qual as plantas não conseguem extrair água,

representando o limite inferior de água disponível para as plantas, retida pelas partículas do solo sob uma sucção de 1500 kPa (SLATYER, 1967).

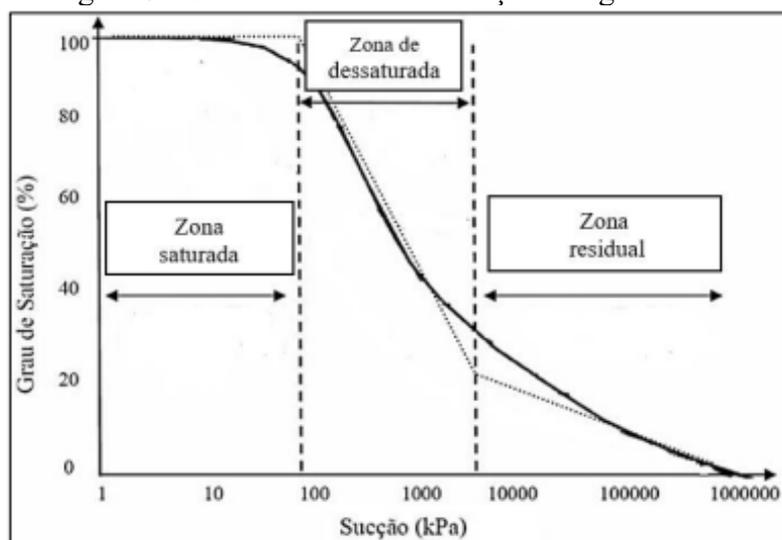
Estudos como os de Van Genuchten (1980), Mualem (1976) e Fredlund e Xing (1994) destacam a relação entre o formato da curva de retenção de água e as características dos solos. A determinação da curva de retenção de água permite obter correlações com as propriedades hidráulicas e mecânicas de um solo não saturado. A obtenção da equação da curva de retenção de água geralmente envolve ajustes matemáticos a dados experimentais observados (SANTOS, 2015).

Segundo Paiva (2009), a curva de retenção de água no solo permite a obtenção de diversas características fundamentais do solo, como a sucção de entrada de ar, a capacidade de sucção e a umidade residual. A sucção de entrada de ar do solo é identificada pela extensão da parte linear da curva de retenção até interceptar a linha que representa a saturação do solo. Esse parâmetro indica o valor de sucção aplicada no solo em que começa ocorrer a drenagem de água, e este ponto representa o diferencial de pressões entre a água e o ar necessário para causar a drenagem do maior poro do solo. Já o teor de umidade residual se associa ao início do estágio residual de dessaturação do solo, no qual o efeito da sucção, para causar uma perda adicional de água, diminui e a remoção da água requer o fluxo do vapor.

Para sucções maiores que a sucção de entrada de ar, a permeabilidade à água sofre uma considerável redução, possibilitando a entrada do ar atmosférico por meio das fissuras formadas, permitindo sua circulação pelo interior da camada de solo (ARAÚJO, 2017).

De acordo com Fredlund *et al.* (2006), a curva de retenção está dividida em três partes, como apresenta a Figura 7.

Figura 7 - Zonas da curva de retenção de água no solo



Fonte: Adaptado de Fredlund *et al.* (2006).

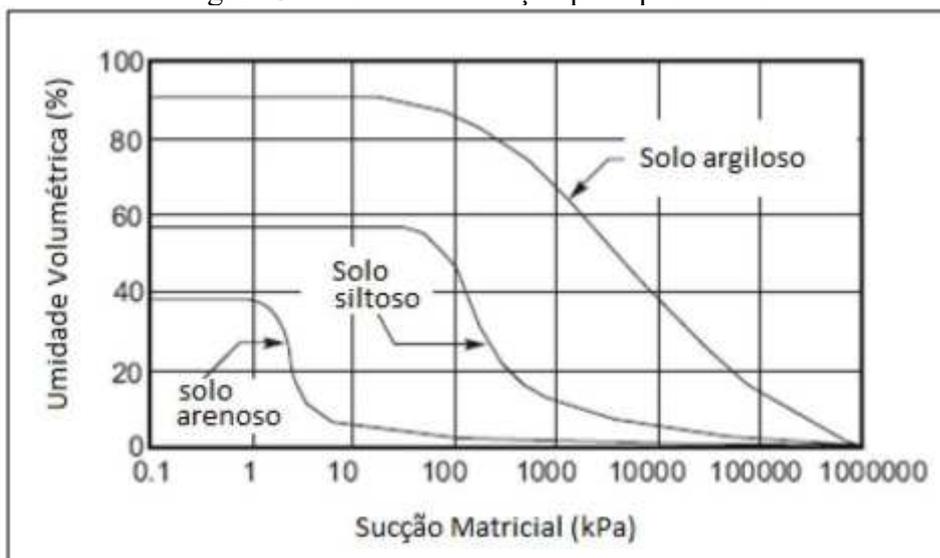
Na zona saturada ou de efeito de fronteira, o solo atinge o estado de saturação total ( $S=100\%$ ), em que a água preenche todos os vazios do solo sem a presença da fase gasosa (ar) de forma contínua. Esta região se estende até o ponto de entrada generalizada de ar ou ponto de dessaturação ( $\Psi_{Ar}$ ), que representa o valor de sucção no qual o ar começa a entrar pelas maiores aberturas superficiais (poros) do solo.

A segunda região, denominada zona de transição primária, após a dessaturação, a fase líquida começa a perder sua continuidade, permitindo a entrada de ar e a formação de regiões contínuas de ar. A dessaturação ocorre de forma mais rápida, com predominância dos efeitos capilares no aumento da sucção. A zona de transição secundária apresenta o comportamento similar da região anterior, porém com o predomínio de forças de adsorção sobre forças capilares. Nessa região a entrada de ar se intensifica, resultando na adsorção das moléculas de água pelas partículas sólidas do solo. Ambas as regiões podem ser designadas como zona de dessaturação, em que seu limite inferior corresponde à sucção residual ( $\Psi_{Res}$ ), caracterizada pelo aumento da sucção e a drenagem da água livre presente no solo.

Na zona residual, o grau de saturação se torna muito pequeno e o solo apresenta apenas uma umidade residual. A fase líquida torna-se descontínua e a fase gasosa ocupa a maior parte dos poros. Nessa fase, para se retirar uma quantidade mínima de água se faz necessário uma sucção elevada.

Essas características podem ser verificadas a partir das curvas de retenção de cada tipo de solo, Figura 8, uma vez que, solos granulares possuem macroporos que não permitem a retenção de água e por consequência perdem umidade rapidamente.

Figura 8 - Curvas de retenção por tipos de solo



Fonte: Fredlund e Xing (1994).

Em solos arenosos, a curva de retenção de água tende a apresentar uma declividade mais acentuada devido à baixa capacidade desses solos de reter água, partir de uma determinada faixa de sucção. Nos solos argilosos, não é observada essa característica, pois além da heterogeneidade nos tamanhos dos poros, esses solos retêm água também por fenômenos eletroquímicos, resultando em uma distribuição mais complexa na curva de retenção de água. (FREDLUND *et al.*, 1996).

Nos solos argilosos, para baixos valores de sucção, a retenção é mais influenciada pelo efeito capilar e, conseqüentemente, pela estrutura do solo. Entretanto, em sucções mais elevadas, quando a quantidade de água no solo diminui, os processos de adsorção assumem maior relevância sobre os efeitos capilares. Nessa condição, a composição mineralógica do solo passa a ter um papel mais significativo como determinante do comportamento do solo (FREDLUND *et al.*, 1996).

A matéria orgânica, quando em forma coloidal, demonstra boas propriedades de retenção de água. Essa presença influencia diretamente uma das principais características físicas do solo, sua agregação, e, conseqüentemente, impacta outras propriedades como massa específica, porosidade, aeração e infiltração de água. A capilaridade e a adsorção são os fenômenos responsáveis por essa capacidade de retenção de água pela matéria orgânica no solo (MENEZES, 2010).

De acordo com Barroso (2008), existem duas maneiras de obter a curva característica do solo, o método de secagem (ou desidratação) e do método de umedecimento (ou hidratação). No processo de secagem, a amostra previamente saturada é exposta a potenciais

matriciais crescentes, resultando na diminuição gradual da umidade do solo. A perda de água do solo pode ser medida aplicando pressão à amostra ou pela sua evaporação ao ar livre. O método de umedecimento, a amostra seca tem seu potencial matricial gradativamente reduzido, aumentando assim seu teor de umidade.

### *2.5.1 Modelo para ajuste de curvas de retenção do solo*

O ajuste de pontos experimentais para obtenção de curvas de retenção de água no solo é realizada a partir de equações matemáticas baseadas em parâmetros empíricos. Essas equações utilizam-se de parâmetros de entrada para ajuste da curva de retenção como a umidade volumétrica residual ( $\theta_{Res}$ ), a umidade volumétrica de saturação ( $\theta_{Sat}$ ), e parâmetros de ajuste estimados variando conforme o tipo de solo estudado.

A representação da curva de retenção, utilizando uma função contínua, é fundamental para análises numéricas envolvendo o fluxo líquido e gasoso e na previsão de diversas propriedades de solos não saturados (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015). Dessa forma, o Quadro 1 apresenta alguns modelos de ajustes matemáticos de curvas de retenção de água que podem ser aplicados para o solo, o que já são bem difundidos na literatura dentro da mecânica dos solos não saturados.

Quadro 1 - Modelos de ajuste da curva de retenção de água

Modelo	Equação	Parâmetro
Gardner (1956)	$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{1 + (\alpha\Psi)^n}$	$\alpha, n$
Van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{[1 + (\alpha\Psi^n)]^m}$	$\alpha, m, n$
Mualem (1976)	$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{\alpha}\right)^n\right]^m}$	$\alpha, m, n$
Brutsaert (1966)	$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{1 + \left(\frac{\Psi}{\alpha}\right)^n}$	$\alpha, n$
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{\left\{\ln \left[ e + \left(\frac{\Psi}{\alpha}\right)^n \right] \right\}^m}$	$\alpha, m, n$
McKee & Bumb (1987)	$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{\left(1 + \text{Exp} \left(\frac{\alpha - \Psi}{n}\right)\right)}$	$\alpha, n$
Gitirana Jr. & Fredlund (2004)	$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{\left(\frac{\Psi}{\sqrt{\Psi_b \Psi_{res}}}\right)^d}$	$d$

Onde: o parâmetro  $\alpha$  é de ajuste do modelo relacionado a sucção de entrada de ar,  $n$ ,  $m$  e  $d$  são de ajuste do modelo relacionados à inclinação da curva.

Fonte: Adaptado de Sena (2022).

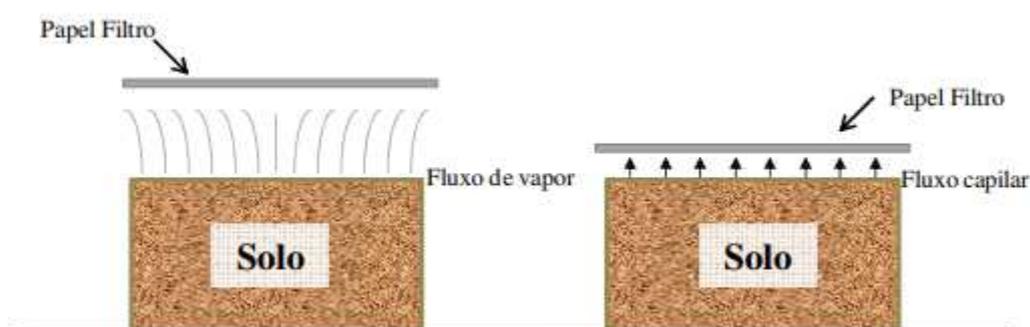
A partir das equações disponibilizados na literatura, com base em alguns parâmetros do solo e em parâmetros de ajuste, torna-se possível fazer uma estimativa da curva de retenção de água que melhor se relacione com o solo analisado. Para isso, são empregadas ferramentas que permitem a comparação, avaliação e seleção do melhor modelo de curva de retenção de água para o solo em questão. Cada equação de ajuste possui suas especificações, por exemplo, a equação de Van Genuchten (1980), de acordo com Araújo (2017), destaca-se por incluir um parâmetro adicional ( $m$ ), pois fornece boas correlações de ajustes matemáticos.

### 2.5.2 Método do papel filtro

O método do papel filtro, consiste em colocar o solo em contato com o papel, que possui a capacidade de absorver a água presente no solo até alcançar a condição de equilíbrio de sucção entre o solo e papel. Neste estágio, os potenciais matriciais da água no solo e no material poroso se igualam, e assim é avaliado a capacidade de retenção de água do solo e sua interação com materiais porosos, como o papel filtro.

A sucção matricial é medida quando o fluxo ocorre por capilaridade, com contato direto entre as partículas do solo e o papel filtro, superando apenas tensões capilares. Por outro lado, a sucção total é medida quando o fluxo ocorre na forma de vapor, sem contato entre o solo e o material poroso, superando as forças osmóticas e capilares que retêm a molécula de água, representado pela Figura 9 (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Figura 9 - Verificação da sucção osmótica e matricial



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Para que seja atingido o equilíbrio entre o papel filtro e o solo, é importante que o tempo de equalização do conjunto seja suficiente para obter uma resposta correta. De acordo com Marinho e Oliveira (2006), para a determinação da sucção matricial, o tempo de equilíbrio mínimo de 7 (sete) dias é suficiente, para qualquer faixa de sucção.

Segundo Stuermer (1998), é essencial tomar precauções ao lidar com o papel filtro, especialmente no seu manuseio, que deve ser rápido, para evitar prolongar o contato com o ar e alterar sua umidade. A precisão do método depende da precisão com a qual a umidade do papel filtro é determinada. O papel filtro Whatman nº 42 é recomendado por ser mais espesso e possuir poros menores (CHANDLER e GUTIERREZ, 1986).

Foram utilizadas as Equações 1 e 2 propostas por Chandler *et al.* (1992), que correlacionam o teor de umidade com a sucção do papel filtro, para determinar a sucção do papel.

$$\log \psi = 4,84 - 0,0622 \times w, \text{ se } w \leq 47\% \quad (1)$$

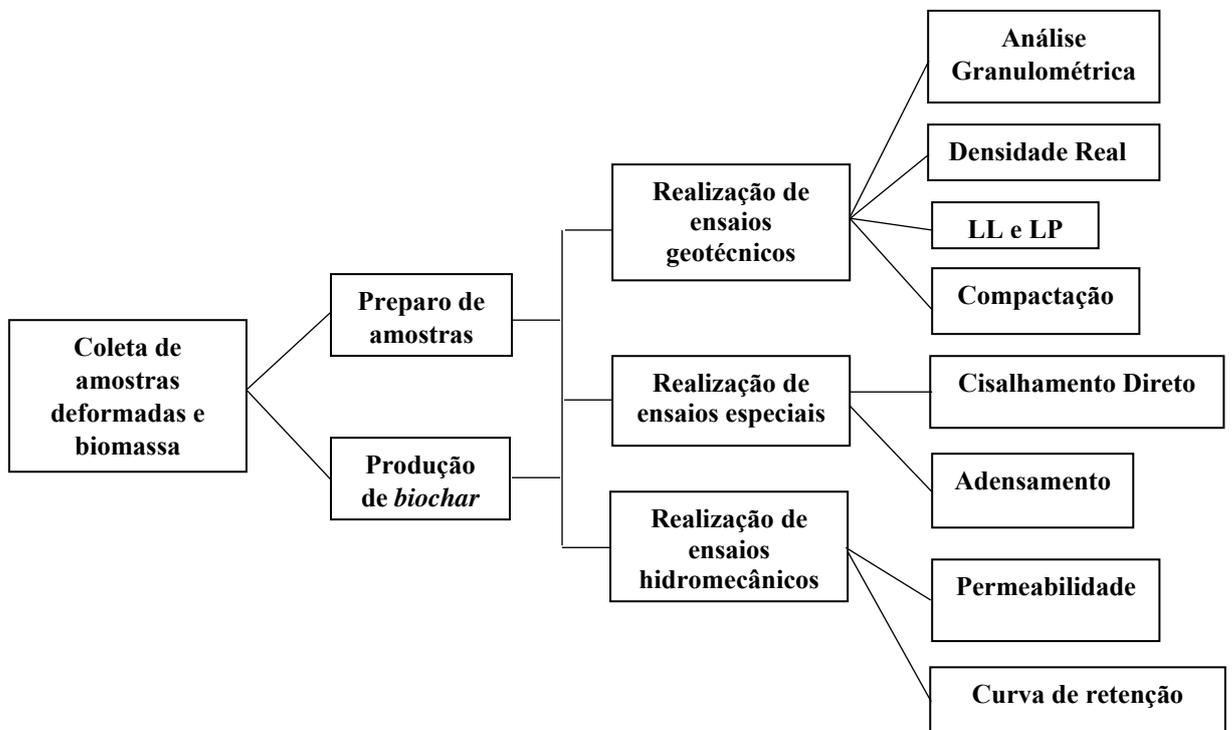
$$\log \psi = 6,05 - 2,48 \times \log w, \text{ se } w > 47\% \quad (2)$$

Apesar de consistir em um método simples, é necessário que haja habilidade e rapidez de manuseio do operador, em especial no momento de medição de umidade do papel filtro, pois este procedimento deve ser realizado em poucos segundos com a utilização de balanças de alta resolução (0,0001 g). Além disso, o período de realização do ensaio é longo, podendo se estender por semanas, dependendo da curva de calibração (LEME, 2015).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia proposta para este trabalho foi desenvolvida conforme as seguintes etapas: a) coleta e separação das amostras de solo; b) produção de *biochar* em laboratório; c) preparo das misturas de solo e *biochar*; d) realização de ensaios geotécnicos do solo e das misturas; e) realização de ensaios hidromecânicos: permeabilidade à água e de curva de retenção; cisalhamento direto e de adensamento com o solo natural e com as misturas, moldados na umidade ótima e densidade aparente seca máxima obtidos no ensaio de compactação na energia Proctor Normal. Com foco na aplicação de misturas de solo-*biochar* em coberturas finais de aterros sanitários, os ensaios foram realizados com variação do percentual de misturas, sendo adotados teores gravimétricos de *biochar* de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% nas misturas. O objetivo foi selecionar a mistura que tivesse o melhor desempenho para atuar como camada de cobertura, que mantivesse uma permeabilidade adequada, boa resistência e baixa deformabilidade. Toda metodologia descrita foi sintetizada no fluxograma da Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia utilizada



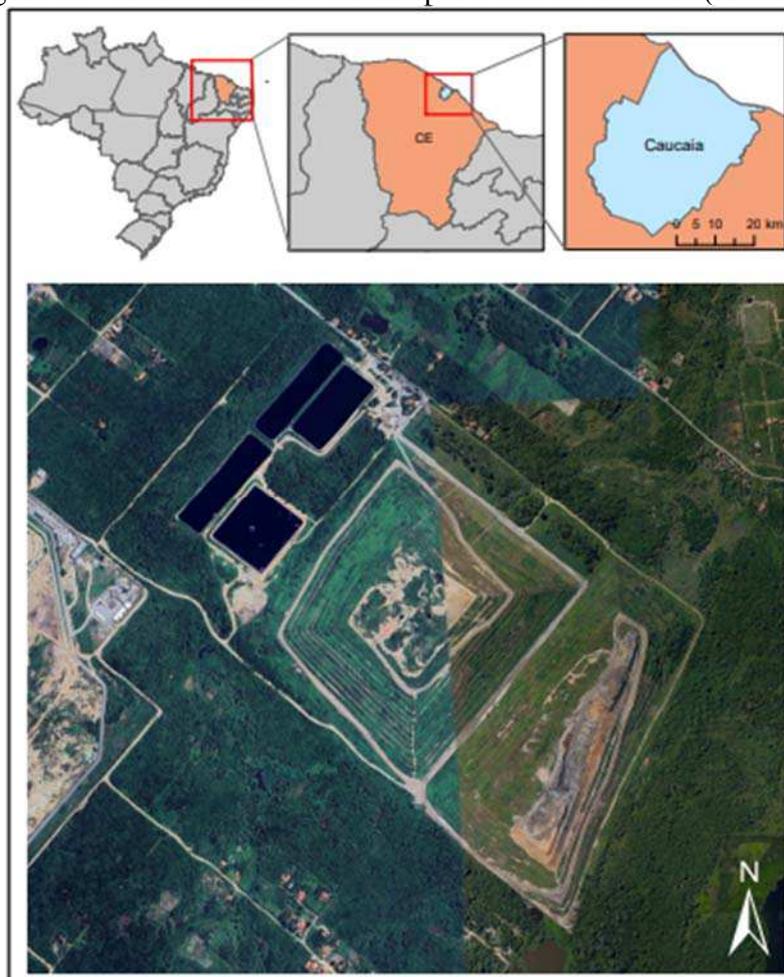
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Solo - Local de estudo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado da jazida de solo utilizada para cobertura final do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC), localizado próximo à BR 020, no município de Caucaia, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), com coordenadas geográficas de  $3^{\circ} 47' 27''$  S de latitude e  $38^{\circ} 41' 04''$  W de longitude. A Figura 11 apresenta uma vista aérea do ASMOC.

Figura 11 - Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O ASMOC recebe os resíduos de Fortaleza desde 1997, quando começou a operar, e também recebe os resíduos oriundos no município de Caucaia. Sua vida útil foi estimada em 15 anos e após o encerramento, o empreendimento foi ampliado em uma nova área que se encontra em operação desde 2020.

A ampliação do ASMOC que corresponde a uma área de 23 hectares, foi possível com a utilização de recursos destinados pelo governo de estado do Ceará, incluindo a instalação da usina de biogás GNR Fortaleza, a qual possui como objetivo captar os gases gerados e produzir biogás ou biometano a partir dos resíduos locais (SEMACE, 2011).

Além disso, atualmente o aterro recebe em torno de 4.500 toneladas de resíduo por dia e sua vida útil está estimada em 17 anos, com a possibilidade de ser aumentada em virtude do gerenciamento destes resíduos nos próximos anos (PLANO RMF, 2018).

Segundo a classificação do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2010), a região do município de Caucaia apresenta clima tropical quente com precipitações pluviométricas médias de 1.243 mm/ano contendo períodos chuvosos de janeiro a maio e temperatura média anual de 27 °C.

### 3.1.2 Produção de biochar

O *biochar* foi produzido baseado na metodologia de Wong *et al.* (2019). Inicialmente, a fibra de coco (*in natura*) foi inserida em cadinhos de porcelana, que foram preenchidos até o volume completo e tampados a fim de reduzir a quantidade de oxigênio durante o processo de pirólise. Os cadinhos e as tampas de porcelana foram inseridos no forno mufla modelo LF0031202, ocupando seu volume total, onde permaneceram em seu interior durante 3 horas, como representado pela Figura 12.

Figura 12 - Processo de produção do *biochar*



a) Fibra de coco *in natura*

b) Mufla

c) *Biochar*

No processo de pirólise lenta da biomassa, as taxas de aquecimento foram entre 0-300 °C por 90 min e de até 500 °C por 90 min. Durante o processo de resfriamento, o *biochar* foi colocado no dessecador para atingir uma temperatura ambiente.

A temperatura é considerada um fator crucial que afeta a estrutura do *biochar* durante o processo de pirólise, pois à medida que a temperatura aumenta, o rendimento do *biochar* diminui. Além disso, ao aumentar a taxa de aquecimento, conseqüentemente auxilia na rápida volatilização, aumentando assim a porosidade (PANDEY *et al.*, 2020).

O rendimento do *biochar* e suas propriedades dependem do processo de pirólise adotado e da composição da matéria-prima utilizada (WANI *et al.*, 2022). A fibra de coco *in natura* apresentou baixo rendimento, tendo em vista que ao ser colocada na mufla o peso em massa era de aproximadamente 30 g, e ao final do processo 10 g em uma única fornada.

Após o processo de resfriamento o *biochar* foi peneirado, passando através de uma peneira de abertura #2,00 mm para remover qualquer resíduo que tenha tido uma queima incompleta durante a pirólise e proporcionar uma área superficial maior do *biochar* e conseqüentemente uma maior área de contato com gases na camada de cobertura.

### 3.1.3 Misturas solo-biochar

As amostras de solo foram coletadas e levadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará, para iniciar o processo de secagem ao ar livre e homogeneização do solo, representado na Figura 13, seguido as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016). Em seguida, foi feito o destorroamento manual para dar início aos ensaios de caracterização de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Figura 13 - Processo de homogeneização do solo ao ar livre



Com o solo homogeneizado, foi feito o peneiramento em peneira de 3/8" (abertura de malha 9,50 mm) para retirar impurezas como raízes ou detritos que estivessem presentes. Em seguida, foram feitas as misturas de solo e *biochar* nas quantidades de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de *biochar* (em massa) como exemplificado na Figura 14.

Figura 14 - Mistura de solo e *biochar*



a) Solo Natural

b) *Biochar*

c) Mistura solo-*biochar*

### 3.2 Ensaios de laboratório

#### 3.2.1 Amostragem e programas de ensaios

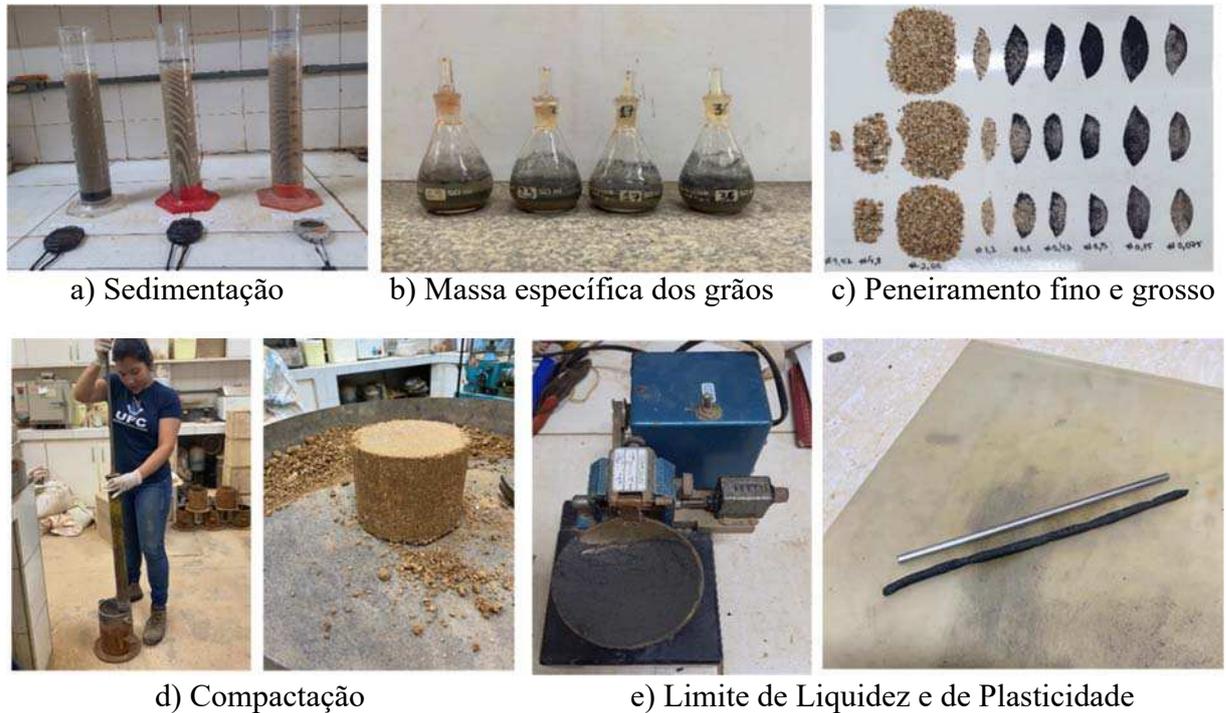
Para a identificação dos parâmetros geotécnicos do solo estudado, foi utilizada como metodologia as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para solos, cujos ensaios são apresentados no Quadro 2. Os ensaios foram realizados LMSP na UFC.

Quadro 2: Ensaio realizados e suas respectivas normas

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Teor de Umidade	NBR 6.457 (ABNT, 2016a) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
Limite de Liquidez	NBR 6.459 (ABNT, 2016b) Solo – Determinação do Limite de Liquidez.
Limite de Plasticidade	NBR 7.180 (ABNT, 2016c) - Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.
Massa Específica dos grãos	NBR 6.458 (ABNT, 2016d) – Solo – Determinação da massa específica dos grãos de pedregulho que passam na peneira 4,8 mm.
Compactação	NBR 7.182 (ABNT, 2016e) Solo – Ensaio de Compactação.
Análise Granulométrica	NBR 7.181 (ABNT, 2016) – Solo – Análise Granulométrica.
Permeabilidade	NBR 14.545 (ABNT, 2021) Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.
Adensamento	NBR 16.853 (ABNT, 2020) Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional.
Cisalhamento Direto	D3080 (ASTM, 2011): Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
Ensaio de Papel Filtro (Retenção de água)	D5298 (ASTM 2016): Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.

Os ensaios de caracterização geotécnica estão representados pela Figura 15, englobando a granulometria por sedimentação e peneiramento, compactação, massa específica dos grãos e os ensaios de limite de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade) que foram realizados com a finalidade de calcular o Índice de Plasticidade (IP) e assim classificar o solo e as misturas de solo-*biochar* conforme o Sistema Universal de Classificação dos Solos (SUCS).

Figura 15 - Ensaios de caracterização geotécnica e compactação



### 3.2.2 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação seguiram as orientações da norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Foi utilizada a energia de compactação Proctor Normal e por meio dos resultados foi possível obter a massa específica aparente seca máxima e umidade ótima a ser utilizada na elaboração das curvas de compactação para as amostras de solo natural e solo-*biochar*. A partir disso, foi feita a moldagem dos corpos de prova compactados para ensaios de permeabilidade, adensamento e cisalhamento direto.

A amostra de solo natural foi compactada no cilindro grande (volume de 2071 cm<sup>3</sup>) em 5 camadas, com aplicação da energia de compactação normal com a utilização do soquete grande de 4,5 kg com uma altura de queda de 45 cm e 12 golpes por camada. Devido a produção do *biochar* ser um processo lento, as amostras das misturas de solo-*biochar* foram feitas no cilindro pequeno (volume 973,89 cm<sup>3</sup>), utilizando o soquete pequeno de 2,5 kg em 3 camadas e 26 golpes em cada uma, com a mesma energia, visando a reduzida quantidade de *biochar* demandada para realização do ensaio.

### 3.2.3 Ensaio de permeabilidade à água

Os coeficientes de permeabilidade para o solo e as misturas de solo-*biochar* foram determinados em amostras saturadas, na temperatura ambiente de 28°C, através do Método B do ensaio de permeabilidade de solos argilosos com carga variável, de acordo com os procedimentos recomendados pela NBR 14.545 (ABNT, 2021).

O equipamento utilizado para o ensaio foi o permeâmetro de parede rígida, sem aplicação de pressão. Os corpos de prova foram compactados na umidade ótima com energia Proctor Normal, com 17,8 cm de altura e 15,1 cm de diâmetro. A carga hidráulica inicial foi de 145 cm.

As amostras foram submetidas a um fluxo de água ascendente por um período de 24 horas, com o objetivo de saturar o corpo de prova. Após esse período, foram feitas leituras e processados os dados obtidos.

### 3.2.4 Ensaio de adensamento

Para analisar os parâmetros de compressibilidade das amostras, foram realizados ensaios de adensamento (Figura 16) de acordo com as recomendações da norma NBR 16.853 (ABNT, 2020).

Os ensaios foram realizados na prensa de adensamento e consistem na moldagem de corpos de prova compactados com variação máxima de 2% na umidade ótima. O controle rigoroso da umidade na moldagem dos corpos de prova é crucial para garantir a representatividade nos resultados.

Os ensaios de adensamento realizados nas amostras de solo natural e mistura de solo-*biochar* 5%, tiveram como finalidade entender melhor o desempenho mecânico destes materiais frente à atuação de forças externas. Os corpos de provas foram submetidos a uma carga de 2 kPa por 15 minutos com a célula de adensamento seca. Em seguida os corpos de provas foram inundados e a expansão foi monitorada por 24 horas. Após esse período, foram adicionadas as cargas de 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa e 1600 kPa respectivamente.

O ensaio de adensamento foi executado com a finalidade de determinar os parâmetros de deformabilidade e compressão do solo, tais como coeficiente de adensamento ( $C_v$ ), tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{pa}$ ), índice de compressão ( $C_c$ ) e índice de recompressão ( $C_r$ ) de cada

material. Esses parâmetros são fundamentais para a previsão de recalque da camada de proteção e o tempo de ocorrência do recalque.

O monitoramento durou entre 60 a 180 min em cada uma das aplicações de carga, pois nesse período ocorreu a estabilização que permitiu passar para o próximo estágio. Logo em seguida foi feito o descarregamento e pesagem do material para determinar o teor de umidade final.

Figura 16 - Ensaio de adensamento



A partir dos resultados dos ensaios, foram elaborados gráficos que relacionam as deformações com o tempo, permitindo verificar, para cada estágio de carregamento, a variação das tensões efetivas com as deformações.

### 3.2.5 Ensaio de cisalhamento direto

Para determinar os parâmetros de resistência do solo e das misturas solo-*biochar*, o ângulo de atrito e o intercepto coesivo, utilizou-se o ensaio de cisalhamento direto de acordo com as orientações técnicas da norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D3080 (ASTM, 2011 - Método de Ensaio Padrão para Ensaio de Cisalhamento Direto de Solos em Condições Consolidadas Drenadas).

No ensaio, a amostra é adensada e a drenagem é permitida. O material usado na moldagem do corpo de prova foi o passante na peneira com abertura de malha 2,00mm, em seguida saturado e compactado no teor de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima sob a energia Proctor Normal. Para obtenção dos parâmetros de resistência foram utilizadas três tensões normais (50 kPa, 100 kPa e 200 kPa), e os ensaios para cada tensão

normal foram realizados com uma velocidade de cisalhamento de 0,3063 mm/min. A Figura 17 demonstra a realização dos ensaios, que foram conduzidos no LMSF na UFC.

Figura 17 - Ensaio de cisalhamento direto



### 3.2.6 Ensaio de papel filtro

O ensaio foi executado de acordo com o procedimento da norma D5298 (ASTM, 2016), e seguindo as metodologias de Marinho (2000) e Rios (2006) que sugeriram algumas alterações. A seguir, será descrito os procedimentos empregados do ensaio do papel filtro para esta pesquisa.

Para realização deste ensaio utilizaram-se amostras de solo e solo-*biochar* compactadas de forma estática em anéis de 5 cm de diâmetro e com 2 cm de altura. O intuito foi obter as curvas de retenção da água no solo através do processo de secagem das amostras, que foram moldadas, saturadas e posteriormente posicionadas para secar, conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Ensaio de sucção pelo método do papel filtro



Os corpos de prova foram colocados em local arejado com temperatura ambiente e ar fresco para que gradualmente perdessem umidade. Em seguida foram retirados em tempos diferentes de exposição para que assim atingissem diferentes teores de umidade, e consequentemente diferentes valores de sucção. Nessa etapa, os corpos de prova foram posicionados de modo a garantir uma secagem uniforme.

Quando um corpo de prova alcançava um determinado teor de umidade (controlado através da pesagem), era removido e coberto com dois papéis filtro Whatman N° 42. O papel que entrava em contato direto com o solo era descartado para evitar a possibilidade de adesão de partículas do solo, o que poderia resultar em erros na medição da umidade gravimétrica do papel filtro.

Na sequência, as amostras foram envolvidas por camadas de plástico filme e papel alumínio. Após essa etapa, as amostras foram acondicionadas em uma caixa de isopor com tampa, de modo a garantir o isolamento dos corpos de prova para prevenir variações na umidade, como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Corpos de prova em processo de acondicionamento



Como prescreve a norma D 5298 (ASTM, 2016), o período de equalização entre o papel filtro e o solo foi de 7 dias e somente após esse tempo de equalização, os papéis filtro foram colocados rapidamente em cápsulas com tampa, previamente pesadas, e em seguida, o conjunto (cápsula tampada + papel filtro) foi pesado em uma balança de precisão de 0,0001 g, como pode ser observado na Figura 20. A retirada da embalagem e a pesagem do papel filtro foi feita rapidamente para evitar variação de umidade.

Figura 20 - Processo de pesagem e secagem do papel filtro



A sucção do solo foi obtida a partir da sucção do papel filtro, considerando que, após a equalização, as sucções do papel filtro e do solo se igualam. O teor de umidade do solo era obtido por secagem da amostra em estufa, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016). Seguindo esses procedimentos, duas curvas foram obtidas, uma para o solo natural e outra para a misturas solo-*biochar* com teor de 5% em relação ao peso do solo seco.

Os ensaios foram realizados em triplicada de cada ponto experimental, totalizando 21 corpos de prova para cada material analisado. Após obter os dados de umidade e sucção do solo, com o uso do papel filtro, as curvas de retenção foram obtidas pelo modelo de ajuste de Van Genuchten (1980), utilizando o *software* RETC, para o solo natural e para a mistura de solo-*biochar* 5%.

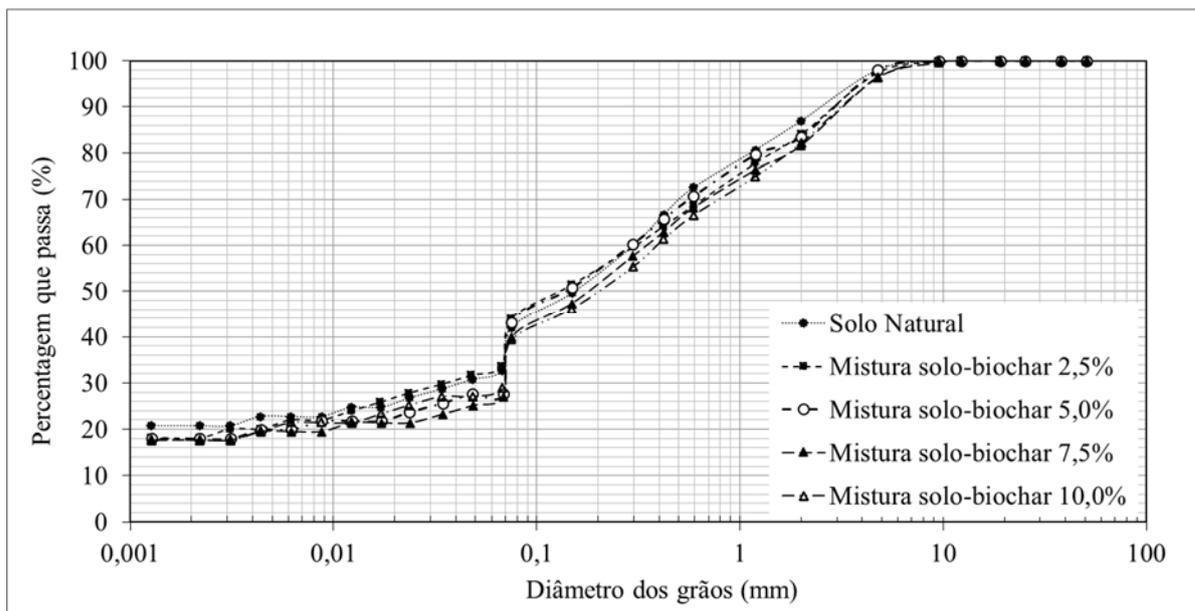
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são analisados todos os resultados obtidos na pesquisa, abrangendo as propriedades geotécnicas dos materiais, como granulometria e limites de consistência, os resultados dos ensaios de compactação, permeabilidade à água, curva de retenção, adensamento e cisalhamento direto conduzidos com base nos procedimentos descritos na metodologia. Essa abordagem permitirá avaliar a influência da adição do *biochar* ao solo da cobertura do ASMOC, além de estabelecer correlações entre os aspectos estudados e as propriedades dos materiais.

### 4.1 Caracterização geotécnica dos materiais

Neste item, são apresentados os resultados referentes à caracterização geotécnica do solo natural e das misturas de solo com *biochar*. A Figura 21 exibe os gráficos de distribuição granulométrica para o solo, e para as quatro misturas analisadas.

Figura 21 - Curvas granulométricas dos materiais



Através da Figura 21 é possível observar que as curvas granulométricas mostram uma similaridade entre si. Esse comportamento pode ser atribuído pelo fato do *biochar* puro ser um material com uma fração de finos bem próxima ao solo natural, o que ocasiona uma proporcionalidade na quantidade de cada mistura. A Tabela 2 apresenta o resumo da

distribuição granulométrica dos materiais e a classificação de cada material de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Tabela 2 - Distribuição granulométrica dos materiais

Resumo da Granulometria	Solo Natural	Misturas solo-biochar			
		2,5%	5%	7,5%	10%
Argila (%)	18,12	18,02	17,60	17,72	20,75
Silte (%)	15,42	9,58	9,36	11,31	11,97
Areia Fina (%)	26,06	32,72	30,67	26,32	27,17
Areia Média (%)	9,04	10,38	10,54	11,21	12,67
Areia Grossa (%)	15,36	12,82	13,42	15,57	14,37
Pedregulho (%)	2,54	2,02	3,70	3,55	1,95
# < 0,075 mm	44	43	40	39	42
Classificação SUCS	SC	SC	SC	SM	SM

É verificado que a porcentagem de partículas finas, com diâmetros menores que 0,075 mm, não apresentam grandes variações. A CETESB (1993) e a USEPA (2004) exigem que o percentual de passante na peneira de 0,0075 mm seja maior que 30%, e a USEPA (2004) ainda limita esse percentual até 50%. Assim, as misturas de solo com *biochar* se enquadram dentro das exigências para aplicação em camada de cobertura final de aterro sanitário quanto a esse parâmetro.

Com base nisso, a adição de *biochar* na mistura de 7,5% apresentou uma redução de 5% no percentual de finos em relação ao solo natural, sendo essa a maior variação constatada em relação as demais misturas de solo-*biochar*, as quais, quando comparadas ao solo natural o valor do percentual de finos obteve variações inferiores. Nota-se também que, o percentual de argila em relação ao solo, apresentou um aumento de acordo com o acréscimo de *biochar*.

Segundo o SUCS, o solo natural foi classificado como areia argilosa (SC), assim como as demais misturas com *biochar*, com exceção da mistura com percentual de 7,5% e 10%, que foram classificadas como areia siltosa (SM).

## 4.2 Limites de consistência

Os parâmetros de consistência para a camada de cobertura convencional de aterro sanitário são descritos e normatizados na literatura. Na Tabela 3, encontram-se os resultados

dos ensaios que determinaram os limites de consistência dos materiais em estudo, incluindo o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP).

Tabela 3 - Limites de consistência dos materiais

Parâmetro	Solo Natural	Misturas solo- <i>biochar</i>			
		2,5%	5%	7,5%	10%
LL (%)	33,7	35	42,7	48,5	NL
LP (%)	16,47	17,1	22,3	31	NP
IP (%)	17,23	17,9	20,4	17,5	-

De acordo com os resultados apresentados, é possível observar um acréscimo nos valores do LL e do LP à medida que o percentual de *biochar* aumenta até 7,5%, visto que há maior capacidade de retenção de água. Conforme Yang *et al.* (2014) a matéria orgânica do solo afeta a retenção devido à sua afinidade com água e também sua influência na estrutura e densidade do solo.

No entanto, a mistura de 10% de *biochar*, se apresentou como não plástica (NP) e não líquida (NL). Estes resultados indicaram um aumento no índice de plasticidade com o aumento do teor de *biochar* até 5%, e posteriormente um decréscimo, que o solo se tornou menos plástico à medida que a o conteúdo de *biochar* aumentou. Essa semelhança de comportamento foi constatada nos valores dos limites de consistência de Atterberg em estudos similares realizados por Yaghoubi (2011) ao verificar essas propriedades em misturas de solo com *biochar*, que estão relacionadas à retenção de água no solo.

A mistura de 10% não apresentou plasticidade, caracterizando-se como materiais não plásticos (NP). Esses resultados estão de acordo com os obtidos em estudos anteriores realizados por Reddy *et al.* (2015), que também identificaram a perda de plasticidade em misturas de solo e *biochar* com o aumento da proporção de material, devido à natureza do *biochar* e suas propriedades químicas. Em virtude disso, a mistura de solo-*biochar* 10% não se mostrou apta para ser analisada nos demais ensaios, como adensamento, permeabilidade à água, resistência ao cisalhamento e curva de retenção de água.

Com relação ao índice de plasticidade (IP), foi observado uma elevação com o aumento do teor de *biochar*, até alcançar um máximo, que ocorreu para a mistura de solo-*biochar* 5% (20,4%). O IP do solo está na faixa preconizada pela Omafra (2003), entre 11 e 30, considerada adequada para camada de cobertura de aterro sanitário.

Comparando os limites de liquidez, percebe-se que a mistura de solo-*biochar* 5% apresentou o valor (42,7%) que se enquadra dentro das exigências para aplicação em camada

de cobertura final de aterro sanitário quanto a esse parâmetro. Além disso, nos valores dos limites de plasticidade, a mesma mistura apresentou o valor (22,3%) que a torna a mais apropriada entre as demais para ser utilizada no sistema de camada de cobertura, visto que a partir da mistura de 7,5% o limite de plasticidade atinge valor acima do recomendado para ser utilizado para material de cobertura. Este fato também foi observado por Reddy *et al.* (2015), Ni *et al.* (2018), Williams *et al.* (2018), ao estudar o efeito do *biochar* em misturas de solo. Estes autores observaram que o aumento nos limites de consistência está relacionado a quantidade de *biochar*, que torna o solo mais plástico à medida que a percentagem de conteúdo aumenta.

### 4.3 Densidade real dos grãos

O ensaio para determinação da densidade das partículas, foi feito pelo método do picnômetro de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016) e indicou que a média da densidade real dos grãos (Gs) é de 2,48.

Tabela 4 - Densidade real dos materiais

Densidade Real (g/cm <sup>3</sup> )	Solo	Misturas solo- <i>biochar</i>			
	Natural	2,5%	5%	7,5%	10%
	2,64	2,52	2,49	2,48	2,27

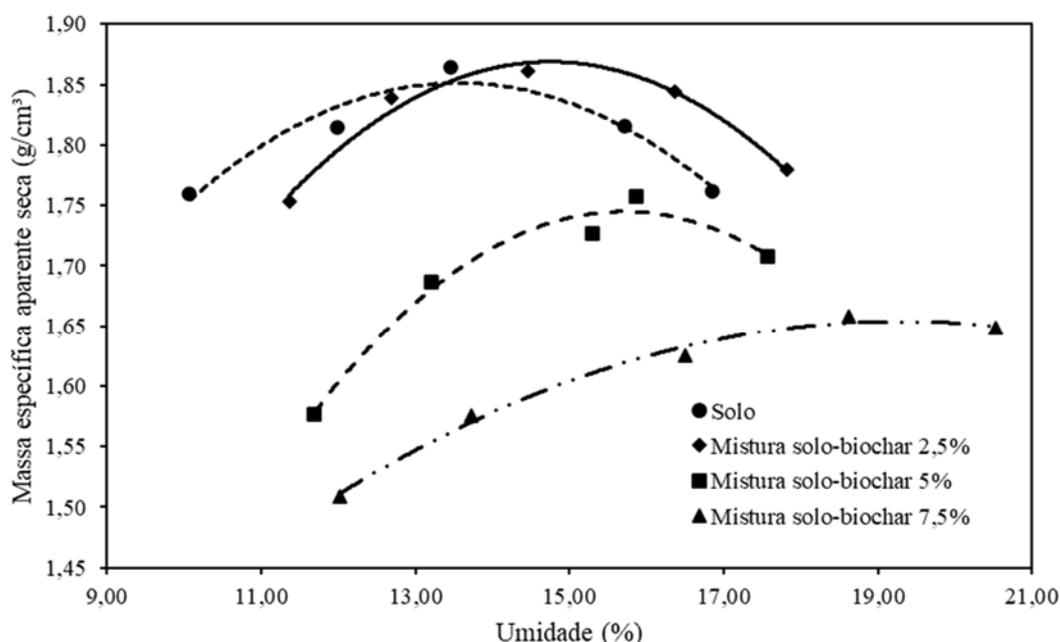
Segundo Yaghoubi (2011) a diminuição da densidade aumenta a aeração do solo e, conseqüentemente, sua capacidade de aumentar a difusão de oxigênio, que é necessária para a oxidação e remoção de CH<sub>4</sub>. Além disso, o tamanho da partícula de *biochar* e macroporosidade está relacionado a diminuição de volume e a massa específica dos grãos que facilita a porosidade total do solo, a aeração e o fornecimento de oxigênio.

A composição de grãos contidos no solo e em misturas com *biochar* possui semelhanças, como no estudo de Reddy (2015), que apresentaram uma porcentagem semelhante de finos, desempenhando um papel significativo nas propriedades físicas.

#### 4.4 Compactação

A partir dos ensaios de compactação com a energia Proctor Normal, foram obtidas as curvas de compactação para o solo natural e suas respectivas misturas com *biochar*, representadas na Figura 22.

Figura 22 - Curva de compactação dos materiais



Com base nesse ensaio, foram extraídos os valores das massas específicas aparente seca máxima e a umidade ótima de cada material, que estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros obtidos no ensaio de compactação

Material	Massa específica aparente seca máximo (g/cm³)	Umidade ótima (%)
Solo natural	1,843	13,48
Mistura solo- <i>biochar</i> 2,5%	1,870	14,74
Mistura solo- <i>biochar</i> 5%	1,760	15,77
Mistura solo- <i>biochar</i> 7,5%	1,650	19,19

Ao analisar esses resultados, observa-se que conforme o percentual de *biochar* aumenta na mistura, a massa específica aparente seca máxima diminui, bem como nota-se que há um aumento na umidade ótima para cada material. Williams *et al.*, (2018) e Reddy *et al.*

(2015) observaram esse mesmo padrão de comportamento em misturas de solo com *biochar* ao estudar os parâmetros de compactação. Isso acontece devido o teor de finos do solo natural ser maior do que nas respectivas misturas, pois o espaço entre os vazios dos grãos, aumenta a retenção de água e interfere no desempenho dos níveis de adição do *biochar*. Essa é uma característica do *biochar* uma vez ele tem uma capacidade de reter água pela natureza do material, que está relacionada à alta porosidade.

#### 4.5 Condutividade Hidráulica

Os resultados dos ensaios de permeabilidade à água em permeâmetro de parede rígida referentes a cada material moldado na umidade ótima são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de permeabilidade à água

Material	Wi (%)	Kw (m.s <sup>-1</sup> )
Solo Natural	13,45	7,7 x 10 <sup>-8</sup>
Mistura solo- <i>biochar</i> 2,5%	14,74	1,8 x 10 <sup>-8</sup>
Mistura solo- <i>biochar</i> 5%	15,77	2,0 x 10 <sup>-8</sup>
Mistura solo- <i>biochar</i> 7,5%	19,19	8,0 x 10 <sup>-8</sup>

Verifica-se que o acréscimo de *biochar* ao solo não conduz o aumento significativo da permeabilidade em relação ao solo natural, havendo diminuição em alguns teores, sendo essa uma característica benéfica para a aplicação como material de cobertura em aterros sanitários.

O coeficiente de permeabilidade à água se encontra conforme os critérios estabelecidos pelas regulamentações ambientais, o que torna a mistura de solo-*biochar* analisado adequado ao uso como camada de cobertura de aterros sanitários.

De acordo com Reddy *et al.* (2015) a alta condutividade hidráulica do solo misturado com *biochar* resulta em um efeito benéfico à cobertura, aumentando a difusão de O<sub>2</sub> e o transporte de CH<sub>4</sub> pela cobertura. Haverá uma ampliação da camada de oxidação da cobertura do aterro e da atividade microbiana aeróbica.

Segundo Sadasivam (2019), a alteração da permeabilidade em misturas com solo está relacionada com a alta porosidade do *biochar*. Além disso, a maior permeabilidade de misturas de solo e *biochar*, observada para maiores teores de *biochar* acrescidos ao solo, pode ser explicada pelo aumento da plasticidade e diminuição dos vazios do solo ocupados por ar.

Os resultados experimentais sugerem que quando o *biochar* possui maior quantidade de finos do que o solo, a permeabilidade tende a diminuir. Embora a diminuição seja baixa, esse comportamento pode estar relacionado ao teor de finos contido no *biochar*. Por outro lado, se a quantidade de *biochar* adicionada ao solo for em maior quantidade, há o aumento da permeabilidade, verificado a partir do teor de 7,5%. Dessa forma, a diminuição ou aumento não afetam significativamente a permeabilidade do solo natural, que pode ser utilizado como cobertura de aterro sanitário.

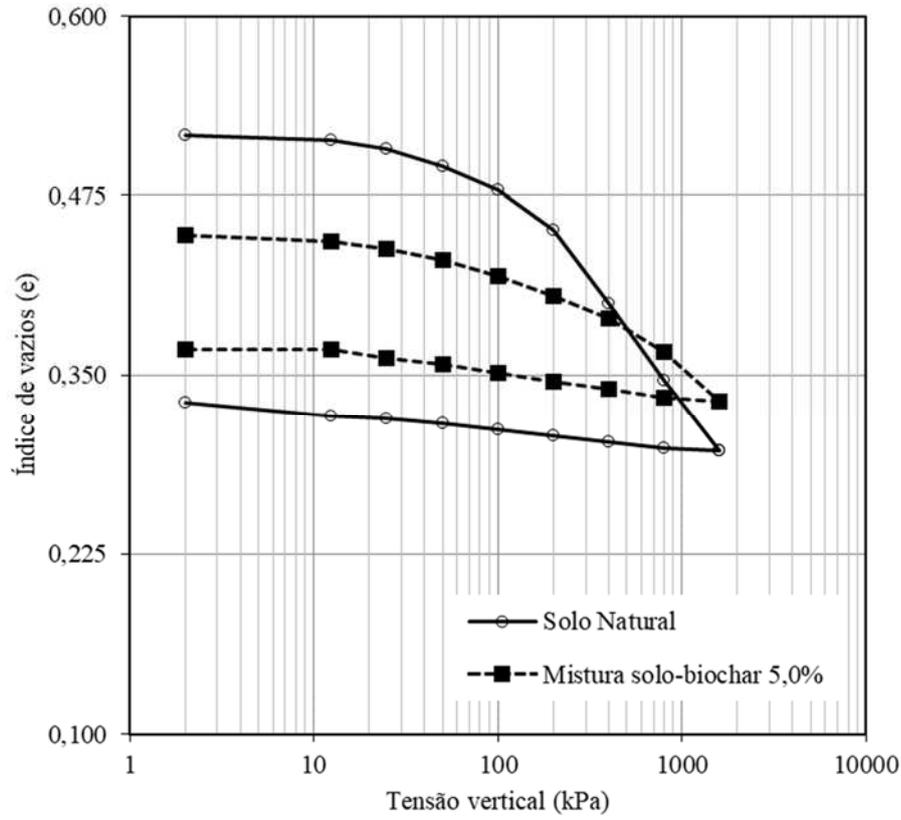
Resultados semelhantes apresentados por Zhang *et al.* (2016) que pesquisaram misturas de *biochar* em solos granulares demonstraram que a permeabilidade diminuiu à medida que partículas finas de *biochar* foram adicionadas ao solo em comparação com partículas grossas de *biochar*.

Muitos pesquisadores observaram uma diminuição na permeabilidade à medida que o solo foi tratado com *biochar* (BROCKHOFF *et al.*, 2010; UZOMA *et al.*, 2011; BARNES *et al.*, 2014), enquanto alguns não observaram nenhum efeito (LAIRD *et al.*, 2010; OUYANG *et al.*, 2013; ROGOVSKA *et al.*, 2014). Várias pesquisas estão sendo conduzidas em condições de laboratório e de campo em amostras com tipos distintos de *biochar* e solo, para comparação das condições experimentais e materiais.

#### **4.6 Adensamento**

Por meio dos dados obtidos nos ensaios de adensamento foram construídos gráficos relacionando os índices de vazios com as pressões efetivas. As curvas do solo natural e mistura solo-*biochar* 5%, a qual mostrou-se como melhor opção dentre as demais para utilização em cobertura de aterro sanitário, estão apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Curvas de Adensamento



Foram realizados testes de compressibilidade do solo natural e solo-*biochar* 5%. A partir das curvas de adensamento é possível perceber que com o acréscimo de tensões as amostras sofreram alteração, indicando que à medida que o *biochar* é adicionado no solo, a compressibilidade diminui.

O índice de compressão ( $C_c$ ), índice de recompressão ( $C_r$ ), coeficiente de compressibilidade ( $a_v$ ) e coeficiente de deformação volumétrica ( $m_v$ ), de cada material foram determinados e são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros do ensaio de adensamento

Material	$C_c$	$C_r$	$a_v$	$m_v$
Solo Natural	0,2302	0,0114	$1,6 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$
Mistura solo- <i>biochar</i> 5%	0,0951	0,0124	$2,8 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-5}$

Freire (2022) obteve valores de  $C_c$  e  $C_r$  semelhantes em seu estudo geotécnico da camada de cobertura final do ASMOC, em que as curvas de adensamento encontradas foram típicas de solos com baixa compressibilidade.

Sob a mesma aplicação de carga, as características de compressão do solo natural e da mistura solo-*biochar* 5% mostram um comportamento diferente. Nota-se que a inclinação na curva de compressão diminui com a adição de *biochar* durante a fase de carregamento indicando assim que no teor de *biochar* 5% a compressão é menor comparada ao solo natural. No caso da inclinação da curva de recompressão os resultados do ensaio de adensamento indicam que a mistura não modifica muito esse valor que se mantém semelhante ao solo natural.

A razão para esse comportamento pode ser explicada pelo fato do *biochar* sofrer alterações de tamanho, que são capazes de causar a mudança de inclinação e diminuição nos valores de  $C_c$ . De acordo com Reddy *et al.* (2015), o *biochar* passa por mudanças físicas, como a quebra das partículas, que resulta em um repentino efeito da compressão em diferentes estágios de carga, em virtude do *biochar* possuir propriedades quebradiças.

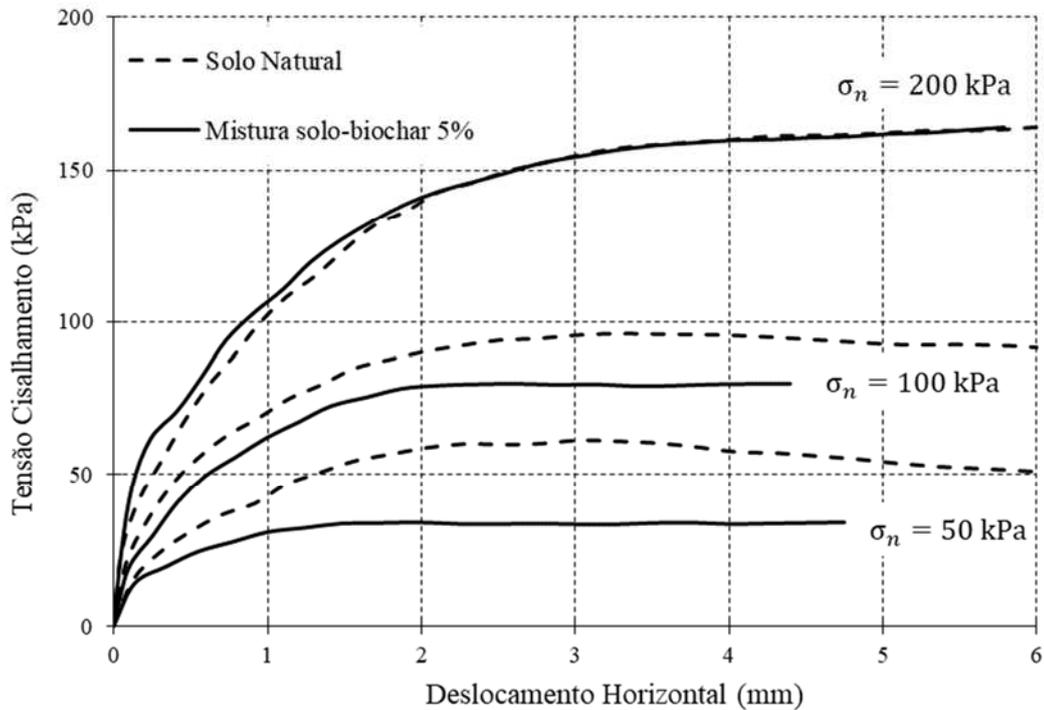
Ressalta-se que neste estudo, o tamanho das partículas de *biochar* influenciou na compressibilidade, de modo que as misturas de solo-*biochar* foram feitas com *biochar* de partículas de diâmetro abaixo de 2,00 mm, o que contribuiu para o preenchimento dos vazios da estrutura do solo e proporcionou um menor índice de compressão (0,0951). Por outro lado, Reddy *et al.* (2015), que estudaram misturas de solo-*biochar* com partículas de diâmetros maiores, afirma que a influência do tamanho das partículas interfere nesse comportamento, pois para maiores partículas de *biochar*, a fragilidade dos seus grãos é um fator relevante, interferindo na compressibilidade e conseqüentemente diminuindo seu volume.

Reddy *et al.* (2015) também constataram um aumento na quantidade de *biochar* e uma diminuição no tamanho de suas partículas resultaram na diminuição na compressibilidade, o que sugere que o solo adicionado de *biochar* é estável e pode ser utilizado como material de cobertura de aterros sanitários, em concordância com o observado na mistura de solo-*biochar* 5%.

#### **4.7 Resistência ao cisalhamento**

A Figura 24 mostra o deslocamento horizontal versus resposta à tensão de cisalhamento obtida a partir de três cargas incrementais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa no solo natural e na amostra de solo-*biochar* 5%.

Figura 24 - Tensão de cisalhamento horizontal vs. deslocamento horizontal



A mistura solo-*biochar* 5% apresentou uma perda de resistência com aumento de deformação horizontal na ruptura para tensões; normais menores, exceto para a tensão normal de 200 kPa, que apresentou o mesmo comportamento do solo natural. Os resultados dos ensaios de cisalhamento são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros do ensaio de cisalhamento

Material	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (graus)
Solo Natural	26,6	34,8
Mistura solo- <i>biochar</i> 5%	0	39,0

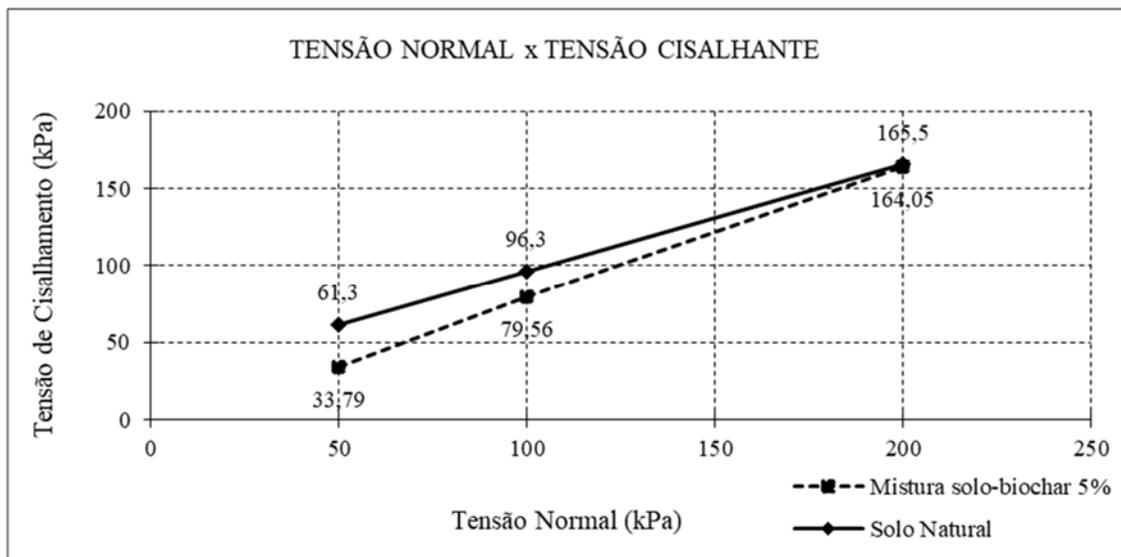
O solo natural apresentou um intercepto coesivo de 26,6 kPa e um ângulo de atrito de 34,9 graus. Enquanto a mistura com 5% de *biochar* apresentou o intercepto coesivo nulo e ângulo de atrito 39,0 graus. O resultado do estudo de Zong *et al.* (2014) também constatou que a adição de *biochar* (derivado da palha de trigo, aparas de madeira e lodo residual) resultou na diminuição da coesão e aumento do ângulo de atrito à medida que o *biochar* foi adicionado. Nesse caso, a maior angularidade e bordas afiadas do *biochar* de madeira podem

ser uma possível razão que aumenta o ângulo de atrito e melhora o intertravamento entre as partículas de *biochar* quando misturado ao solo.

O estudo de Wani *et al.* (2022) constatou que os impactos da aplicação de *biochar* na coesão e no ângulo de atrito podem variar consideravelmente dependendo do tamanho relativo das partículas do solo, das partículas de *biochar* e da taxa de alteração. Esse mecanismo é provavelmente devido ao preenchimento dos poros do solo e ao formato das partículas de *biochar*, o que pode influenciar o mecanismo de intertravamento entre as partículas. Com base nisso, foi observado que as partículas finas de *biochar* ao preencher os vazios são responsáveis por conferir resistência. Resultados semelhantes foram observados no estudo de Gupta e Kua (2017).

A Figura 25 apresenta os valores tensão normal versus tensão cisalhante de ambas as amostras analisadas.

Figura 25 - Tensão cisalhante x tensão normal



Zong *et al.* (2014) conduziram testes de cisalhamento direto, em misturas de solo e *biochar* feito de palha de trigo, lascas de madeira e lodo residual, em que os resultados indicaram que a resistência do solo diminuiu com o aumento do teor de *biochar*. Do mesmo modo, Sadasivam (2019) observou que houve uma diminuição de coesão atribuída a adição de *biochar* ao solo. Reddy *et al.* (2015) obteve um aumento da resistência ao cisalhamento do solo com o aumento do teor de *biochar* no solo, em conjunto com a diminuição da compressibilidade, o que torna o solo com propriedades geotécnicas adequadas para uso de cobertura de aterros sanitários.

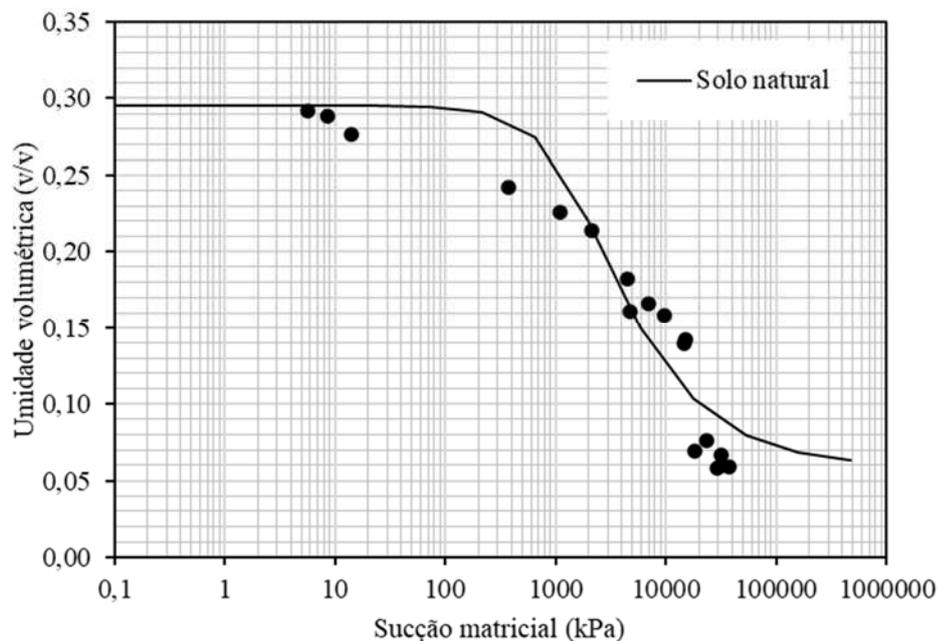
De acordo com o estudo de Yang e Lu (2021), a natureza porosa do *biochar* modifica a tensão de cisalhamento e o contato existente entre as partículas do solo (à medida que as partículas do solo entram nos interporos do *biochar*). Segundo Reddy *et al.* (2015), em incrementos de carga mais elevados, estes vazios podem ser preenchidos com água, empurrando o ar para fora, o que pode causar a queda repentina da inclinação entre as cargas.

#### 4.8 Curva de retenção

A realização do ensaio do papel filtro tem como objetivo a obter pontos experimentais que relacionam a quantidade de água presente no solo e a sucção correspondente. Com base nesses pontos e de modelos matemáticos, são traçadas as curvas de retenção de água no solo.

Nesta pesquisa, foram obtidas as curvas de retenção para o solo natural e para a mistura de solo-*biochar* 5%, moldados em umidade ótima com energia de compactação Proctor normal, e estão expressas em termos de sucção e umidade volumétrica, representadas no gráfico apresentado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Curva de retenção de água - solo natural

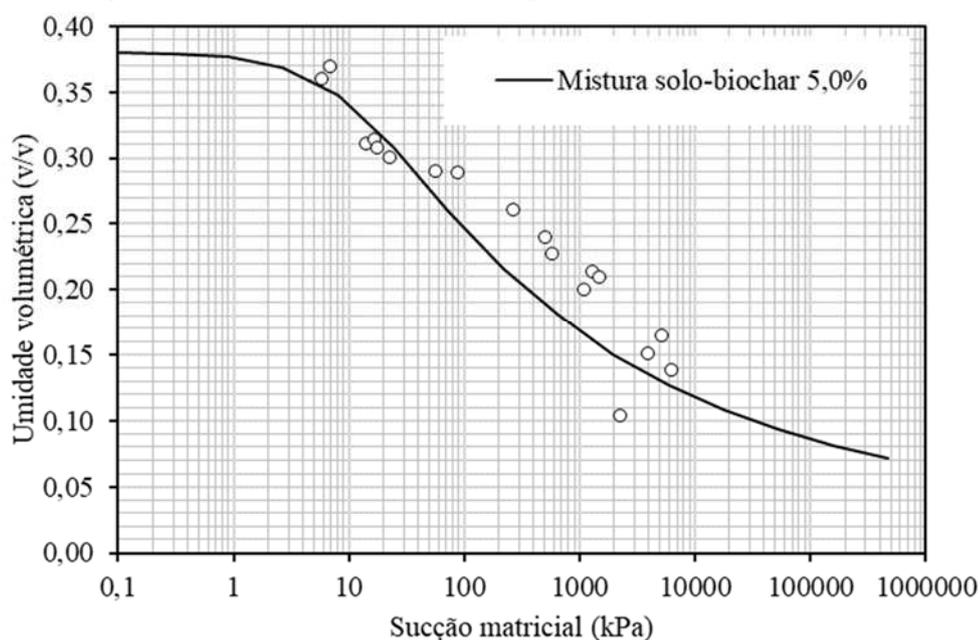


A partir da curva de retenção da água, têm-se que a sucção de entrada de ar foi de 500 kPa para o solo natural. Esse valor condiz com os valores mais elevados de sucção matricial de entrada de ar para solos argilosos de cobertura de aterro sanitário, como encontrados na pesquisa de Santos (2015), que chegou a valores na ordem de 1000 kPa. O formato da curva

de retenção de água também é semelhante com a pesquisa supracitada, que se apresenta características típicas de curvas de solos finos.

Em relação à umidade residual, foi observado o valor de 0,06. Nota-se que após o valor da entrada de ar, há uma significativa variação de sucção de umidade, sugerindo que no processo de secagem das amostras de solo natural, a perda de água ocorreu de forma rápida em comparação a mistura de solo-*biochar*, como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Curva de retenção de água - mistura solo-*biochar* 5%



A curva referente a mistura solo-*biochar* 5%, apresentou baixo valor de sucção de entrada de ar, aproximadamente 5 kPa e teor de umidade residual de 0,14. O aumento da umidade residual com a adição de *biochar* pode estar relacionado a sua capacidade de retenção de água, como observado por Wani *et al.* (2022).

Ao analisar cada material individualmente, observa-se a divergência das curvas para variação nos períodos de secagem, visto que, o solo natural apresentou uma inclinação brusca, enquanto a mistura solo-*biochar* 5% apresenta uma inclinação menos acentuada, sugerindo que a perda de água tenha ocorrido de forma mais lenta. Além disso, nota-se que a presença do *biochar* mostrou efeitos positivos atribuídos às propriedades de retenção de água, de acordo com Hov *et al.* (2023) reduz a evaporação e microfissuras.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios de papel filtro utilizados para o ajuste das curvas pelo modelo de Van Genuchten (1980), e dos parâmetros estatísticos de verificação para os materiais estudados.

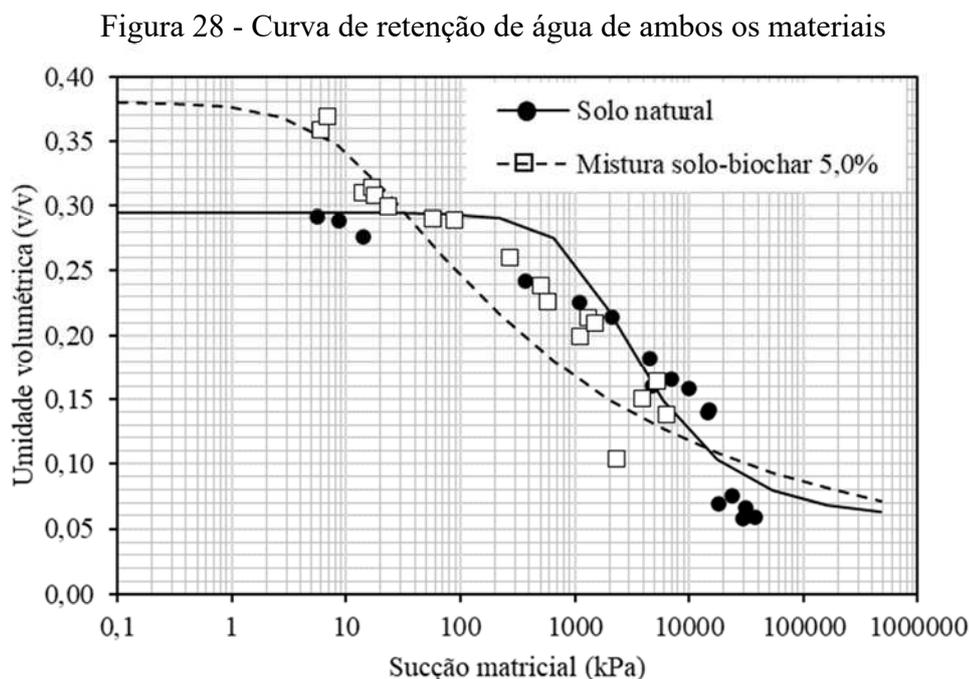
Tabela 9 - Parâmetros obtidos com os ajustes do modelo de Van Genuchten (1980)

Material	Parâmetros de ajuste de Van Genuchten (1980)			R <sup>2</sup>	Entrada de ar (kPa)
	$\alpha$	m	n		
Solo Natural	0,007	0,3980	1,6719	0,92	500
Mistura solo- biochar 5%	0,1011	0,3980	1,2056	0,90	5

Observa-se que em relação aos valores dos parâmetros de ajuste, que o solo natural difere consideravelmente da mistura no parâmetro  $\alpha$ , o que indica a diferença no valor de sucção de entrada de ar. Os valores dos parâmetros  $n$  e  $m$  remetem a inclinação das curvas de ajuste, o que justifica as diferenças nas curvas de retenção de água de ambos os materiais (SANTOS, 2015).

Os parâmetros de avaliação estatística considerados apresentaram valores que indicam boa validação para o ajuste das curvas realizados. Todos os materiais ficaram com R<sup>2</sup> acima de 0,9, o que indica boa correlação.

Na Figura 28 é apresentado os pontos experimentais obtidos no ensaio do papel filtro e as curvas de retenção de água do solo natural e da mistura solo-*biochar* 5% pelo método citado anteriormente.



A partir das curvas de retenção de água, percebe-se um teor de umidade volumétrico saturado (=porosidade) foi mais elevado na mistura solo-*biochar* 5% (0,38) do que no solo natural (0,29), devido a capacidade de retenção de água do *biochar*.

## 5 CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas por meio das análises dos resultados dos ensaios desta pesquisa. Na sequência, são apresentadas as sugestões para pesquisas futuras, como complementação dos resultados e conclusões aqui apresentadas.

Este estudo mostrou, a partir dos dados coletados, que a adição de *biochar* no solo apresentou características de material adequadas para a utilização em camadas de impermeabilização de cobertura de aterros. A mistura de solo-*biochar* 5% se mostrou como a melhor opção para aplicação na camada de cobertura do ASMOC, pois apresentou uma menor compressibilidade, quando comparado ao solo natural, sem alterar significativamente a permeabilidade e resistência em relação ao solo natural, que se enquadram nos valores exigidos pela NBR 14.545 (ABNT, 2021).

O acréscimo na quantidade de *biochar* ao solo até o percentual de 7,5% causou um aumento no Limite de Liquidez e no Limite de Plasticidade. Após esses valores, observou-se reduções para ambos os parâmetros. Além disso, para o teor de 10% de *biochar*, a mistura se apresentou como não plástica (NP) e não líquida (NL), o que a torna inapropriada para fins de cobertura, de acordo com as normas estabelecidas pela USEPA (2004) para solos de cobertura. Com relação ao índice de plasticidade (IP), foi observado uma elevação com o aumento do teor de *biochar*, alcançando seu nível máximo na mistura de solo-*biochar* 5%, e posteriormente um decréscimo, a partir do qual, o aumento do teor de *biochar* resulta na perda da plasticidade do solo.

Com base na análise dos resultados de caracterização geotécnica, tem-se que o solo natural consiste em uma areia argilosa (SC), segundo a classificação SUCS, assim como as misturas solo-*biochar*. Apenas a partir do percentual de 7,5% e 10% de *biochar* acrescido ao solo que houve mudança para areia siltosa (SM), indicando que a partir de percentuais mais altos, o *biochar* tende a mudar o comportamento geotécnico da mistura.

A partir dos ensaios de compactação, verificou-se que os parâmetros encontrados nas curvas de compactação apresentaram uma tendência de redução das massas específica aparente seco máximo e aumento da umidade ótima com o acréscimo de *biochar*, isto indica que o *biochar* elevou a umidade ótima consideravelmente, aumentando a porosidade das amostras, para uma mesma energia de compactação.

No que se refere aos resultados obtidos em ensaios hidromecânicos na mistura de solo e *biochar*, observaram-se os seguintes comportamentos:

a) No ensaio de cisalhamento direto observou-se que a resistência se mantém próxima do solo natural, aumentando esta proximidade em tensões mais elevadas (200 kPa), e que a influência adição de 5% do *biochar* acarretou na diminuição do intercepto coesivo e aumento do ângulo de atrito.

b) No ensaio de adensamento foi possível concluir que a mistura solo-*biochar* 5% foi menos compressível do que o solo natural, portanto, menos deformável. Dessa forma, o solo adicionado de *biochar* apresentou um comportamento estável, podendo ser utilizado como material de cobertura de aterros sanitários.

c) No ensaio permeabilidade à água observou-se que o acréscimo de *biochar* ao solo não acarretou modificações significativas em relação à permeabilidade do solo natural, que se manteve na ordem de  $10^{-8}$  m.s<sup>-1</sup>, sendo esse valor indicado para solo de cobertura de aterros sanitários de acordo com a NBR 14.545 (ABNT, 2021).

d) Com relação à retenção de água, a técnica do papel filtro se mostrou apropriada para a obtenção das curvas de retenção do solo natural e das misturas solo-*biochar*, pois os resultados experimentais encontrados foram concordantes com a literatura consultada, considerando o modelo de ajuste de Van Genuchten (1980), que se mostrou adequado, pois foi possível identificar o formato das curvas, que se aproximaram melhor dos pontos experimentais obtidos. A curva de retenção da mistura solo-*biochar* 5% apresentou menor sucção de entrada de ar e maior umidade residual, em virtude da retenção de água ter sido maior do que no solo natural.

## 5.1 Perspectivas futuras

- Em relação à heterogeneidade dos solos e *biochars*, é fundamental realizar uma caracterização quanto às suas propriedades físicas, em relação ao tipo de *biochar*, para compreensão sobre seus mecanismos na alteração das propriedades físicas do solo, sendo essencial para aplicação em campo.
- Analisar o desempenho de camadas impermeabilizantes com relação à permeabilidade à água, para outros percentuais de *biochar*.
- Realizar ensaios de permeabilidade ao ar para obtenção dos coeficientes para misturas de solo-*biochar*.
- Estudar o efeito da adição de *biochar* na mitigação da saída de metano pela camada de cobertura, por meio de ensaios de laboratório e de campo.

- Realizar ensaio de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) para analisar características morfológicas e inferir sobre a textura, estrutura, adesão do *biochar*.
- Estudar a influência da temperatura de pirólise do *biochar* com foco em otimizar a produção.
- Realizar a verificação da viabilidade econômica do projeto para aplicações em campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457a**: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459b**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180c**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6458d**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm. Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182e**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16853**: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbano. Rio de Janeiro, 1992.

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

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2022.

ALMEIDA, J. R. **Estudo do comportamento de barreira capilar em aterros de resíduos**. 2011. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2011.

AMADI, A.A., EBEREMU, A.O. Potential Application of Lateritic Soil Stabilized with Cement Kiln Dust (CKD) as Liner in Waste Containment Structures. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 31, p. 1221–1230, 2013.

ARAÚJO, T. T. **Estudo experimental de emissões fugitivas de biogás em camadas de cobertura de uma célula de aterro sanitário**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2016.

ARAÚJO, 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, Campina Grande-PB, 2017.

ASTM, American Society For Testing And Materials. **ASTM D3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. Philadelphia, 2011.

\_\_\_\_\_. **ASTM D5298: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. West Conshohocken, PA, USA, 2016.

BAHR, T.; FRICKE, K.; HILBRECHT, K.; KÖLSCH, F.; REINHARD, B. Clean development mechanism – Tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS E TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., 2006, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: SITTRS, 2006.

BARNES, R. T.; GALLAGHER, M. E.; MASIELLO, C. A.; LIU, Z.; DUGAN, B. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. **Plos One**, v. 9, 2014.

BARROSO, I. M.; **Avaliação da camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos com a utilização do modelo SoilCover**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro-RJ, 2008.

BISPO, M. D; OLIVEIRA, D. S; TOMASINI, M. D.; SCHENA, T.; CARAMAO, E. B.; KRAUSE, L. C. Produção e ativação do biochar pela pirólise da fibra de coco: aplicação na recuperação de fenóis em água residual. *In*: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXXIX, Belém, PA, 2019. **Anais...** Brasil, 2019.

BENTO, A. T. T. M; YANO, C. M; MAZON, L. L. Aproveitamento da fibra de coco como adição em concreto não estrutural e suas vantagens em relação ao meio ambiente. *In*: Simpósio Internacional de Iniciação Científica USP, 16. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008.

BOLAÑOS, R. E. Z. **Comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2013.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. Oficina de textos, 2008, 248p.

BROCKHOFF, S. R.; CHRISTIANS, N. E.; KILLORN, R. J.; HORTON, R.; DAVIS, D. D. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. **Agronomy Journal**, v. 102, p. 1627-1631, 2010.

CAI, J.; HE, Y.; YU, X.; BANKS, S. W.; YANG, Y., ZHANG, X.; YU, Y.; LIU, R.; BRIDGWATER, A. V. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, 2017.

CALDEIRA, I. M. G. **Resistência e deformabilidade de uma areia estabilizada com cimento e fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto-Portugal, 2012.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S.; MAKISHIMA, N. Fibra de casca de coco verde como substrato agrícola. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.20, n. 4, p.533-535, 2002.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; PRIM, E. C. C.; PIMENTEL, F. J. G. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos** – v.7 n.2, p. 86- 97. 2011.

CATAPRETA, C. A .A; SIMÕES. G. F.; Monitoramento ambiental e geotécnico de aterros sanitários. *In*: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, VII, Campina Grande, PB, 2016. **Anais**. Brasil, 2016.

CATAPRETA, C. A. C. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

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

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; SMITH, M. G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, v. 92, n. 2, p. 82-89, 1992.

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. **Géotechnique**, v.36, n.2, p.265-268, 1986.

CHATHURIKA, J. A. S.; KUMARAGAMAGE, D.; ZVOMUYA, F.; AKINREMI, O.O.; FLATEN, D. N.; INDRARATNE, S. P.; DANDENIYA, W. S. Woodchip biochar with or without synthetic fertilizers affects soil properties and available phosphorus in two alkaline, chernozemic soils. **NRC Research Press**, p. 472-484, 2016.

CHEN, X. W.; WONG, J. T. F.; NG, C. W. W. Feasibility of biochar application on a landfill final cover—a review on balancing ecology and shallow slope stability. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 7111–7125, 2015.

CHIEMCHAISRI, C.; CHIEMCHAISRI, W.; KUMAR, S.; WICRAMARACHCHI, P. N. Reduction of methane emission from landfill through microbial activities in cover soil: A brief review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 4, p. 412-434, 2012.

CONSOLI, N.; MONTARDO, J.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. Effect of material properties on the behavior of sand-cement-fibre composites. **Ground Improvement, ISSMGE**, v.8, n. 2, p. 77-90, 2004.

COSTA, M. D.; MARIANO, M. O. H.; ARAUJO, L. B.; JUCÁ, J. F. T. Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 77–90, 2018.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2015.

COSTA, C. M. C.; SILVA, T. J. L.; SANTOS, J. R.; RIBEIRO, L. F. M.; GURJÃO, C. M. Avaliação do ressecamento da camada de cobertura utilizando solo com adição de fibras de PET através de imagens. *In: Congresso brasileiro de geologia de engenharia ambiental*, 2., 2015, Bento Gonçalves-RS. **Anais...** Bento Gonçalves: ABGE, 2015.

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. **Physical Properties of Biochar**. *In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Ed. Londres: Earthscan, 2009, p. 416.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório**. ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; MASCHIO, R.; SILVA, E. M. (Org.). Teresina: EMBRAPA Meio Norte, 2007. 2p.

FARZAN, M. T. M.; KULARATNE, M. G.; WICKRAMASINGHE, W. M. S.; JAYASINGHE, G. Y. Evaluation of the quality-Y of compost mixed with coconut shell biochar. *In: Proceedings of the 1st International Symposium on Agriculture*, Sri Lanka. **Anais...** Sri Lanka, 2017.

FEITOSA, A. A. **Caracterização e sorção do NH<sub>4</sub> + em biocarvão de casca de banana e bagaço de laranja carbonizados a 400 e 600°C**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro – RJ, 2019.

FEITOSA, A. A.; TEIXEIRA, W. G.; RITTER, E.; RESENDE, F. A.; KERN, J. Caracterização Química de Amostras de Biocarvão de Casca de Banana e Bagaço de Laranja Carbonizados a 400 e 600°C. **Revista Virtual de Química**, v. 12, 2020.

FREDLUND, M. D.; FREDLUND, D. G.; WILSON, G.W. Prediction of the soil-water characteristic curve from grain size distribution and volume-mass properties. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., 1997, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...**Rio de Janeiro: ABMS, v.1, p.13-23, 1997.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 31, n. 4, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. **Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 132 (3), p. 286–321. 2006.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n.3, p.440-448, 1996.

FREIRE, S. C. **Estudo geotécnico da camada de cobertura final do aterro sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), Ceará**. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade de Fortaleza – UFC, Fortaleza, 2022.

GLASER, J.; LEHMANN, W.Z. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with bio-char – a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, p. 219–230, 2002.

GOMES, G. J. C.; **Análise da adição de composto orgânico para dimensionamento de biocoberturas em aterro sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

GONZAGA, M. I. S.; SOUZA, D. C. F. D; ALMEIDA, A. Q. D.; MACKOWIAK, C.; LIMA, I. D. S.; SANTOS, J. C. D. J.; ANDRADE, R. S. D. Eficiência de absorção de nitrogênio e fósforo em mostarda indiana cultivada durante três ciclos de crescimento em solo contaminado com cobre tratado com biochar. **Ciência Rural**, v. 49, 2019.

GUO, M.; HE, Z.; UCHIMIYA, S. M. **Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers**, v. 63, p. 175-197, 2016.

GUPTA, S.; KUA, H. W. Factors determining the potential of biochar as a carbon capturing and sequestering construction material: critical review. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 29, 2017.

GUSMÃO, L. R. C. **Influência de ciclos secagem-molhagem no comportamento hidráulico-mecânico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras de coco verde**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2020.

GURWICK, N. P.; MOORE, L. A.; KELLY, C.; ELIAS, P. A systematic review of biochar research, with a focus on its stability in situ and its promise as a climate mitigation strategy, **Plos One**, v.8, 2013.

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

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

HOV, S.; PANIAGUA, P.; SAETRE, C.; LONG, M.; CORNELISSEN, G.; RITTER, S. Stabilization of Soft Clay, Quick Clay and Peat by Industrial By-Products and Biochars. **Applied Sciences**, v. 13, 2023.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2007.

HUBER-HUMER, M.; TINTNER, J.; BÖHM, K.; LECHNER, P. Scrutinizing compost properties and their impact on methane oxidation efficiency. **Waste Management**. v. 31, n. 5, p. 871-883, 2011.

HUBER-HUMER, M.; RODER, S.; LECHNER, P. Approaches to assess biocover performance on landfills. **Waste Management**, v. 29, n.7, p. 2092-2104, 2009.

IPECE - Instituto De Pesquisa E Estratégia Econômica Do Ceara. **Perfil Básico Municipal – Caucaia**, 2010. Disponível em: < [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil\\_basico/pbm-2010/Caucaia.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/pbm-2010/Caucaia.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2023.

KINNEY T. J.; MASIELLO C. A.; DUGAN B; HOCKADAY W. C.; DEAN M. R; ZYGOURAKIS K; BARNES R. T. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. **Biomass Bioenergy**, v. 41, p. 34-43, 2012.

KOLB S. **Understanding the mechanisms by which a manure-based charcoal product affects microbial biomass and activity**. PhD Thesis, University of Wisconsin, Green Bay, US, 2007.

LAIRD, D. A.; FLEMING, P.; DAVIS, D. D.; HORTON, R.; WANG, B.; KARLEN, D. L. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, p. 443-449, 2010.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science and technology**, 1st ed. Routledge, London: Sterling, VA, 2009, 438p.

LEME, R. F. **Avaliação de uma metodologia para projeto de pequenas barragens de terra no semiárido: construção, ensaios e modelagem numérica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.

LIMA, J. R. S.; ARAÚJO, M. B.; OLIVEIRA, C. L.; BARROS, C. T.; AMORIM, A. S.; BEZERRA, A. L.; DILL, P. R. J.; MEDEIROS, E. V.; HAMMECKER, C.; ANTONINO, A. C. D.; LEITE, M. C. B. S. Biochar de Lodo de Esgoto Aumenta a Produção e Eficiência no Uso de Água da Alface. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n. 04, 2020.

LIMA, J. R. S.; OLIVEIRA, J. E. S.; MOURA, A. S.; SILVA, C. F.; MEDEIROS, E.V.; HAMMECKER, C. Produção e eficiência no uso de água do feijão comum adubado com biochar. **Diversitas Journal**, v. 4, 2019.

LIMA, J.R.S., SILVA, W.M., MEDEIROS, E.V., DUDA, G.P., CORREA, M.M., FILHO MARTINS, A.P., CLERMONT-DAUPHIN, C., ANTONINO, A.C.D., HAMMECKER, C., Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, v. 319, p. 14-23, 2018.

- LOPES, R. L. **Infiltração de água e fluxo de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2011.
- LUKJANTCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - SP, 2007.
- MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2008.
- MARINHO, F. A. M. **Soil Suction Measurement in Soils and Porous Materials**. GeoDenver 2000: Unsaturated Soils in Engineering Practice – Short Course Notes, ASCE, Denver, Colorado. 2000.
- MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. The filter paper method revisited. **Geotechnical Testing Journal**, USA, v. 29, n. 3, p. 250-258, 2006.
- MEEGODA, J. N.; HETTIARACHCHI, H.; HETTIARATCHI, P. Landfill design and operation. **Sustainable Solid Waste Management**. American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2016, p. 577-604.
- MELCHIOR, S. In situ studies on the performance of landfill caps (compacted clay liners, geomembranes, geosynthetic clay liners, capillary barriers). In: **International Containment Technology Conference: Proceedings**, Petersburg-FL, v. 29, 1997.
- MENEZES, M. B. M. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São CarlosSP, 2010.
- MOREIRA, F. G. S. **Emissões fugitivas de biogás em célula de aterro sanitário**. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2018.
- MOR, S.; VISSCHER, A. D.; RAVINDRA, K.; DAHIYA, R. P.; CHANDRA, A.; VAN CLEEMPUT, O. Induction of enhanced methane oxidation in compost: temperature and moisture response. **Waste Management**, v. 26, n. 4, p. 381-388, 2006.
- MORRIS, C. E.; STORMONT, J. C. Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 12, p. 1057-1065, 1999.
- MUALEM, Y. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.
- NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; MILAN, P.; LOPES, F. F.; CRESSONI, F.; KALAKI, R. **O retrato da citricultura brasileira**. São Paulo: Citrus BR, 2010.
- NI, J. J.; CHEN, X. W.; NG, C. W. W.; GUO, H. W. Effects of biochar on water retention and matric suction of vegetated soil. **Géotechnique**, v. 8, p. 124-129, 2018.
- OLIVEIRA, M. G. M.; LAFAYETTE, K. P.V.; TAVARES, Y. V. P.; SILVA, S. R.; TETI, L. M. E. H.; MACEDO, T. F. Melhoramento de solo com resíduos da construção civil reforçado com fibras de polipropileno. In: VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2011, Vitória - ES. **Anais...** Espírito Santo: ELECS, p. 13-23, 2011.

- OLIVEIRA JÚNIOR, A. I.; JUCÁ, J. F. T.; ALMEIDA, A. J. G.; FERREIRA, R. P. S.; BRANDÃO, F. J. R. Influência da adição de fibras curtas de coco distribuídas aleatoriamente na curva característica de retenção de água de um solo argiloso compactado. **Revista Aidis**, v. 16, p. 218-231, 2023.
- OUYANG, L.; WANG, F.; TANG, J.; YU, L.; ZHANG, R. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, p. 991-1002, 2013.
- PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2009
- PANDEY, D.; DAVEREY, A.; ARUNACHALAM, K. Biochar: production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, 2020.
- PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018, 294p.
- PASCOAL, P. P. R.; MESQUITA, R. R. S. **Estudo de viabilidade do uso do RCC em camadas de cobertura de aterros sanitários**. Trabalho de Projeto Final (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2014.
- PECORA, V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo. *In: Congresso Internacional de Bioenergia, IV, Anais...* Curitiba-PR. 2009.
- PLANO RMF. **Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**, 2018. Disponível em: <<https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2018/12/PLANO-RMF-A.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2023
- PETTER, F. A., LIMA, L. B., MORALES, M. M., MARIMONJÚNIOR, B. H.M., MORAIS, L. A. Biocarvão no solo: Aspectos agrônômicos e ambientais. *In: Simpósio Brasileiro de Agropecuária Sustentável, Anais...* Sinop, MT, 2016.
- PIRES, I. C. S. A.; NAKASHIMA, G. T.; PADILLA, E. R. D.; SANTOS, L. R. O.; VARANDA, L. D.; ALESI, L. S.; YAMAJI, F. M. Biochar de Palha de Cana-de-Açúcar: Caracterização e Estudo do Processo. **Revista Virtual de Química**, v. 10, 2018.
- PURAKAYASTHA, T. J.; KUMARI, S.; PATHAK, H. Characterization, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. **Geoderma**, v. 239, 2015.
- PRESA, E. P. **Indeformabilidad de las arcillas expansivas bajo succion controlada**. Tesis (Doctoral) – Universidad Politécnica de Madrid, 1982.
- REIS, A. M. F.; CORDOVIL, C. M. S.; MATOS, E. J. S.; GOUVEA, C. F.; BARREIROS, R. M.; VASCONCELOS, M. C.; SILVA, G. C. Efeito do uso do biocarvão de casca de coco e bagaço de laranja no desenvolvimento de mudas de *corymbia citriodora hill & johnson*. *In: Biomassa: recursos, aplicações e tecnologias em pesquisas*. Editora científica digital, p. 61-74, 2022.
- REDDY, K. R.; YARGICOGLU, E. N.; CHETRI, J. K. Field-scale performance of biochar-amended soil covers for landfill methane oxidation. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-16, 2021.

- REDDY, K. R.; YARGICOGLU, P.; YUE, D.; YAGHOUBI, P. Enhanced microbial methane oxidation in landfill cover soil amended with biochar. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 140, n. 9, 2014.
- REDDY, KR.; YAGHOUBI, P.; YUKSELEN-AKSOY, Y. Effects of biochar amendment on geotechnical properties of landfill cover soil. **Waste Management & Research**, v. 33, 2015.
- RODRÍGUEZ-VILA, A.; FORJÁN, R.; GUEDES, R. S.; COVELO, E.F. Changes on the phytoavailability of nutrients in a mine soil reclaimed with compost and biochar. **Water Air Soil Pollut**, v. 12, p. 1–12, 2016.
- RIOS, M. G. F. **Comportamento de um aterro compactado em campo e laboratório**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- ROGOVSKA, N.; LAIRD, D. A.; RATHKE, S. J.; KARLEN, D. L. Biochar impact on Midwestern Mollisols and maize nutrient availability. **Geoderma**, p. 340-347, 2014.
- RONCATO, C. D. L.; CABRAL, A. R. Evaluation of Methane Oxidation Efficiency of Two Biocovers: field and laboratory results. **Journal Of Environmental Engineering**, v. 138, n. 2, p. 164-173, 2012.
- SADASIVAM, B. Y. **Biochar-Based Biocovers for Landfill Methane Mitigation: Quantifying Adsorption, Transport & Oxidation**. Tese de M.Sc. em Anna University, Chennai, India, 2007.
- SADASIVAM, B. Y.; REDDY, K. R. Engineering properties of waste wood-derived biochars and biochar-amended soils, **International Journal of Geotechnical Engineering**, p. 521-535, 2015.
- SAFARI, E.; AL-SUWAIDI, G.; RAYHANI, M. T. Performance of Biocover in Mitigating Fugitive Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills in Cold Climates. **Journal of Environmental Engineering**, v. 143, n. 5, 2017.
- SANTOS, G. M. **Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2015.
- SANTOS, J. J. N. **Caracterização geotécnica de misturas de solo e composto orgânico para uso como biocoberturas em aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2019.
- SANTOS, J. C.; SANTOS, V. A. H. F.; MATOS, E. S.; MAGALHAES, C. A. S.; REZENDE, F. A.; Monitoramento de atributos do solo após aplicação de biochar em área de plantio de eucaliptus sp. *In: V Jornada Científica da Embrapa Agrossilvipastoril*, V, Sinop, MT, 2017. **Anais...** Brasil, 2017.
- SCHENA, T. **Aproveitamento dos Resíduos de Coco através da Pirólise: Uma Abordagem Analítica e Econômica**. Tese (Doutorado em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. 2019
- SCHEUTZ, C.; KJELDSSEN, P.; BOGNER, J. E.; VISSCHER, A. D.; GEBERT, J.; HILGER, H. A.; HUBER-HUMER, M.; SPOKAS, K. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. **Waste Management & Research**, v. 27, n. 5, p. 409-455, 2009.

SEMACE, Superintendência Estadual do Meio Ambiente Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais Ceará, 2011. Disponível em: [https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2020/06/11512641\\_4\\_RIMA-ASMOC-VERSAO-FINAL.pdf](https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2020/06/11512641_4_RIMA-ASMOC-VERSAO-FINAL.pdf)  
Acesso em: 20 ago. 2023.

SENA, T. S. **Permeabilidade ao ar e à água em misturas de solo e composto orgânico para uso em sistemas de cobertura de aterro sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande. 2022.

SLATYER, R.O. Plant-water relationships. **Academic Press**, New York, p. 73–77, 1967.

SILVA, W. K. A. S.; TAGLIAFERRO, E. R. Aterro sanitário - a engenharia na disposição final de resíduos sólidos / Landfill - engineering in the final disposal of solid waste, **Brazilian Journal of Development**, v. 7, p. 12216–12236, 2021.

SILVA, M. T. M. G. **Metodologia para determinação de parâmetros para solos não saturados utilizando ensaios com umidade conhecida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2009.

SILVEIRA, V.; ARAGÃO, T. R. P. Viabilidade financeira de instalação de uma unidade de beneficiamento de cascas de coco verde. **Revista iPecege**, p. 72-85, 2016.

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Desafios e Oportunidades para Redução das Emissões de Metano no Brasil**, 2022. Disponível em: [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/Estudo\\_Metano/ObsClima\\_SEEG2022\\_FINAL.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/Estudo_Metano/ObsClima_SEEG2022_FINAL.pdf). Acesso em 08 out. 2023.

SOUSA, A. T. C.; FIGUEIREDO, C. C. Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish. **Biological Agriculture & Horticulture**, v. 32, p. 127-138, 2016.

SOARES, A. F. **Cobertura final 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, São Leopoldo-RS, 2011.

SSSA - Soil Science Society of America. **Glossary of soil science terms**, Madison, 1984.

STERN, J. C.; CHANTON, J.; ABICHOU, T.; POWELSON, D.; YUAN, L.; ESCORIZA, S.; BOGNER, J. Use of biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. **Waste Management**, v. 27, p. 1248-1258, 2007.

STUERMER, M. M. **Estudo da capacidade de retenção de água em um solo residual compactado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 1998.

SULIMAN, W.; HARSH, J. B.; ABUL-LAIL, N. I.; FORTUNA, A. M.; ALLMEYER, I.; PÉREZ, M. G. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. **Science of The Total Environment**. p. 139–1547, 2017.

TAN, X.; LIU, Y; ZENG, G; WANG; X; HU, X; GU, Y; YANG; Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, v. 125, p. 70-85, 2015.

TAYLOR, G.D. **Materials in construction**. 2ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994, 284p.

TEIXEIRA, P. F.; LIOTTI, R. G.; TORVES, J. C.; FINOTTI, A. F.; CABRAL, A.; VAZOLLER, R. F.; TEIXEIRA, C. E.; MARINHO, F. A. M. Processo de oxidação do metano através das bactérias metanotróficas em coberturas de aterros sanitários. In: Simpósio

brasileiro de solos não saturados, 6., 2007, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: ABMS, v. 1, p. 541-549, 2007.

TEIXEIRA, W.; MAIA, C.; CARVALHO, M.; REZENDE, F. **Potencialidades do uso do biocarvão como condicionador de solo no Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/152801/1/2016-112.pdf> Acesso em: 23 set. 2023.

THANGARAJAN, R.; BOLAN, N. S.; TIAN, G.; NAIDU, R.; KUNHIKRISHNAN, A. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. **The Science of the Total Environment**, v. 465, 2013.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Fact sheet on evapotranspiration cover systems for waste containment**. Office of solid waste and emergency response. EPA-542-F-11-001. Cincinnati: USEPA, 2011. 26p.

\_\_\_\_\_. **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers**. Office of solid waste and emergency response. EPA-540-R-04-007. Washington DC.: USEPA, 2004. 421p.

UZOMA, K. C.; INOUE, M.; ANDRY, H.; ZAHOOR, A.; NISHIHARA, E. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 9, p. 1137-1143, 2011.

VALE, A. C.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T. Aplicabilidade de fibras de coco em misturas asfálticas tipo SMA. *In*: Congresso brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em petróleo e gás, IV., 2007, Campinas. **Anais...** Campinas: ABPG, 2007.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VIOTTO, R. S.; MAIA, A. A.; YAMAJI, F. M.; MORAIS, L. C. Thermogravimetric investigation of spent shiitake substrate to solid biofuel. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 96, p. 845-854, 2018.

WONG, J. T. F.; CHEN, X.; DENG, W.; CHAI, Y.; NG, C. W. W.; WONG, M. H. Effects of biochar on bacterial communities in a newly established landfill cover topsoil. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 667-673, 2019.

WANI, I.; KUSHVAHA, V.; GARG, A.; KUMAR, R.; NAIK, S.; SHARMA, P. Review on effect of biochar on soil strength: Towards exploring usage of biochar in geo-engineering infrastructure. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2022.

WILLIAMS, J. M.; LATIFI, N.; VAHEDIFARD, F. Effects of biochar amendment on mechanical properties of buckshot clay. *In*: **Conference IFCEE**, 2018.

WONG, J. T. F.; CHEN, Z.; CHEN, X.; NG, C. W. W.; WONG, M. H.; Soil-water retention behavior of compacted biochar-amended clay: a novel landfill final cover material. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, p. 590–598, 2017.

WONG, J. T. F. **The Effects of Biochar on Bacterial Communities and Geotechnical Properties of Landfill Cover Soils**. Dissertation of Doctor of Philosophy. The University of Science and Technology, Hong Kong, 2017.

WONG, J. T. F.; CHEN, X. W.; DENG, W.; CHAI, Y.; NG, C. W. W.; WONG, M. H. Effects of biochar on bacterial communities in a newly established landfill cover topsoil. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 667-673, 2019.

YAGHOUBI, P. **Development of biochar-amended landfill cover for landfill gas mitigation**. PhD Thesis, University of Illinois, 2011.

YARGICOGLU, E. R.; REDDY, K. R. Effects of biochar and wood pellets amendments added to landfill cover soil on microbial methane oxidation: A laboratory column study. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 19-31, 2017.

YANG, F.; ZHANG, G.; YANG, J.; LI, D.; ZHAO, Y.; LIU, F.; YANG, R. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 3086-3093, 2014.

YANG, C. D.; LU, S. G. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: a field experiment of three-season crops. **Soil and Tillage Research**, v. 205, 2021.

XU, K.; YANG, B.; WANG, J.; WU, M. Improvement of mechanical properties of clay in landfill lines with biochar additive. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, 2020.

ZHANG, J.; CHEN, Q.; YOU, C. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil. **Pedosphere**, v. 26, p. 265–272, 2016.

ZONG, Y.; CHEN, D.; LU, S. Impact of biochars on swell-shrinkage behavior, mechanical strength, and surface cracking of clayey soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, p. 920–926, 2014.

ZORNBERG, J. G.; LAFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J. A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, p. 427-438, 2003.