

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

MAITÊ MILLÉO ALMEIDA

INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM SOLO
REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS: INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E HIDRÁULICAS

PONTA GROSSA

2024

MAITÊ MILLÉO ALMEIDA

INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM SOLO
REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS: INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E HIDRÁULICAS

Dissertação apresentada para a obtenção do título de
Mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área
de Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Orientador (a): Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro
Lautenschläger

PONTA GROSSA

2024

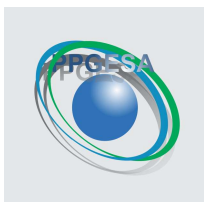
A447 Almeida, Maitê Milléo
Incorporação de lodo de estação de tratamento de água em solo reforçado com geossintéticos: influência nas propriedades mecânicas e hidráulicas / Maitê Milléo Almeida. Ponta Grossa, 2024.
95 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger.

1. Lodo de eta. 2. Geossintético. 3. Solo-lodo. 4. Solo - lodo geossintético. I. Lautenschläger, Carlos Emmanuel Ribeiro. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4

**CERTIFICADO 2343789/2024 - PPGESA****PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL**

Certificado nº 2343789/2024 PPGESA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Título da Dissertação: “INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS: INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS”

Nome: **MAITÊ MILLÉO AMEIDA**Orientador: **Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger**

Aprovada pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger (orientador)
Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG)

Profª. Drª. Maria Eugênia Gimenez Boscov (membro)
Universidade de São Paulo (USP)

Profª. Drª. Bianca Penteado de Almeida Tonus (membro)
Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG)

Profª. Drª. Giovana Kátie Wiecheteck (membro)
Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG)

Ponta Grossa, 10 de dezembro de 2024



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger, Professor(a)**, em 11/02/2025, às 18:46, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Bianca Penteado de Almeida Tonus, Professor(a)**, em 12/02/2025, às 07:34, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Giovana Katie Wiecheteck, Professor(a)**, em 12/02/2025, às 11:32, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **2343789** e o código CRC **1118D996**.

24.000073810-9

2343789v6



Documento assinado digitalmente
MARIA EUGENIA GIMENEZ BOSCOV
Data: 07/03/2025 18:50:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

À Companhia de Saneamento do Paraná pela disponibilização do lodo estudado. À CAPES por conceder a bolsa de estudo. Ao Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger pela orientação e apoio ao longo de toda a pesquisa. Ao técnico do laboratório de Mecânica dos Solos Nilson Bueno e ao estagiário Gustavo do Prado por todo o apoio e auxílio durante as etapas da pesquisa. À Prof. Dr^a Bianca Penteado de Almeida Tônus pelo apoio à pesquisa. À Eng^a Mestre Daiana Tatiele Fiedler pelo suporte nos ensaios e confiança. Aos alunos de iniciação científica Rafael Julinhaque Beraldo e Ingrid Leticia Andrusczak pelo auxílio na realização dos ensaios. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

RESUMO

O presente trabalho explora o potencial de reaproveitamento do Lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA), um resíduo ambientalmente prejudicial quando descartado de forma inadequada, como material de construção em aterros sanitários e outras obras geotécnicas. O lodo, composto de água, sólidos suspensos e químicos utilizados no tratamento da água bruta, é geralmente descartado em corpos hídricos, onde provoca impactos como assoreamento e poluição. O trabalho objetiva avaliar a utilização desse lodo em misturas com solo natural, formando misturas conhecidas como solo-lodo, que são reforçadas com geotêxteis ou barreiras geossintéticas. A abordagem fundamenta-se na demanda crescente por práticas sustentáveis no tratamento e destinação de resíduos, ao mesmo tempo em que busca uma alternativa técnica para substituir parcialmente o solo em estruturas geotécnicas, com objetivo de economia de recursos. A metodologia incluiu diversas fases: a caracterização geotécnica e mineralógica do solo e do lodo, a elaboração de misturas em proporções variadas de lodo (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%), ensaios de compactação, de condutividade hidráulica, de adensamento e de resistência ao cisalhamento direto. Esses ensaios foram realizados para verificar o comportamento mecânico e hidráulico das misturas com e sem a presença de geossintéticos. Os resultados apontaram que, embora a adição de lodo aumente a compressibilidade e diminua a resistência mecânica das misturas, as amostras reforçadas com geossintéticos apresentaram melhora na resistência ao cisalhamento, tornando-as mais estáveis e viáveis para aplicações como camada de cobertura e base de aterros sanitários. Por fim, os resultados obtidos apontaram que a incorporação controlada de lodo de ETA, aliada ao uso de geossintéticos, oferece uma solução sustentável e eficiente para a construção de obras geotécnicas.

Palavras-chave: Lodo de ETA, Geossintético, Solo-lodo, Solo-lodo-geossintético.

ABSTRACT

The present study explores the potential for reusing Water Treatment Plant (WTP) sludge, an environmentally harmful waste when improperly disposed of, as a construction material in landfills and other geotechnical works. The sludge, composed of water, suspended solids, and chemicals used in raw water treatment, is generally discarded into water bodies, causing impacts such as siltation and pollution. The study aims to evaluate the use of this sludge in mixtures with natural soil, forming mixtures known as soil-sludge, which are reinforced with geotextiles or geosynthetic barriers. The approach is based on the growing demand for sustainable waste treatment and disposal practices while seeking a technical alternative to partially replace soil in geotechnical structures to save resources. The methodology included several phases: geotechnical and mineralogical characterization of soil and sludge, preparation of mixtures with varying sludge proportions (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%), compaction tests, hydraulic conductivity tests, consolidation tests, and direct shear strength tests. These tests were conducted to assess the mechanical and hydraulic behavior of the mixtures with and without the presence of geosynthetics. The results indicated that although the addition of sludge increases compressibility and reduces the mechanical strength of the mixtures, the samples reinforced with geosynthetics showed improved shear strength, making them more stable and viable for applications such as landfill cover layers and base structures. Finally, the results suggest that the controlled incorporation of WTP sludge, combined with the use of geosynthetics, offers a sustainable and efficient solution for the construction of geotechnical works.

Keywords: WTP sludge, Geosynthetic, Soil-sludge, Soil-sludge- geosynthetic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um aterro sanitário de RSU	16
Figura 2 – Sistema de revestimento de base de aterro sanitário	17
Figura 3 – Sistema de revestimento de cobertura de aterro sanitário	17
Figura 4 – Barreira geossintética disponibilizada em rolos	20
Figura 5 – Diferentes texturas da barreira geossintética	21
Figura 6 – Exemplos de geotêxtil tecido (a) e não tecido (b) e geotêxtil tricotado (c)	22
Figura 7 – Pontos de contato entre camadas de sistemas de impermeabilização	23
Figura 8 – Diferentes mecanismos de interação entre o solo e geossintéticos planares	24
Figura 9 – Variação da massa específica real dos grãos com a temperatura de secagem	27
Figura 10 – Variação sazonal das frações granulométricas e de matéria orgânica em lodo da ETA Presidente Prudente, SP	28
Figura 11 - Curvas de compactação em função do teor de sólidos de lodos de ETA dos EUA com secagem prévia	30
Figura 12 – Curvas de adensamento de três tipos de lodo de ETA	31
Figura 13 – Comparação entre envoltórias de ruptura de amostras solo-lodo em condição drenada e solos brasileiros	33
Figura 14 – Resistência ao cisalhamento em função da adição de lodo da ETA Cubatão e da ETA de Taiaçupeba	34
Figura 15 – Envoltória de ruptura de cisalhamento (ensaio de cisalhamento direto)	35
Figura 16 – Fluxograma da pesquisa	40
Figura 17 – Localização do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa – CEEG-PG	41
Figura 18 – Coleta do lodo da ETA de Iraí	42
Figura 19 – Exemplo de curva de compactação	45
Figura 20 – Permeâmetro de parede rígida	46
Figura 21 – MS102 – CISALHAMENTO AUTOMÁTICO	47
Figura 22 – Disposição da célula de adensamento	49
Figura 23 – Disposição da célula de cisalhamento	50
Figura 24 – Análise granulométrica do solo do CEEG-PG	51
Figura 25 – Lodo de ETA – Ampliações MEV-FEG	57
Figura 26 – Comparação entre critérios de ruptura – Sem geossintético	70

Figura 27 – Comparativo entre envoltórias de ruptura – Sem geossintético, geotêxtil e barreira geossintética.....	85
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica real dos grãos de lodos de ETA's dos EUA	26
Tabela 2 – Características geotécnicas do lodo de ETA em Hitachi, Japão.....	27
Tabela 3 – Limites de Atterberg de lodos de ETAs distintos.....	29
Tabela 4 – Parâmetros de resistência de lodos de ETA (ensaio de cisalhamento direto não drenado).....	32
Tabela 5 – Coeficiente de permeabilidade de misturas solo-lodo da Estação de Tratamento de Água de Frederico Westphalen – RS.....	36
Tabela 6 – Total de amostras para os ensaios de compactação, condutividade hidráulica, adensamento e cisalhamento direto	44
Tabela 7 – Cargas aplicadas nos estágios do ensaio de adensamentos	48
Tabela 8 – Caracterização geotécnica do solo do CEEG-PG.....	51
Tabela 9 – Teores de umidade do lodo de ETA em secagens distintas.....	52
Tabela 10 – Peso específico real dos grãos – Lodo de ETA	53
Tabela 11 – Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade das amostras.....	54
Tabela 12 – Ensaio MEV-FEG: Composição química das amostras de lodo de ETA.....	56
Tabela 13 – Peso específico real dos grãos e Limites de Consistência das amostras solo-lodo	57
Tabela 14 – Resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima	59
Tabela 15 – Propriedades físicas iniciais e valores de condutividade hidráulica.....	60
Tabela 16 – Índice de compressão e recompressão das amostras de solo, lodo e solo-lodo....	63
Tabela 17 – Resultados de intercepto coesivo e ângulo de atrito – Amostras sem geossintético	71
Tabela 18 – Resultados de intercepto coesivo e ângulo de atrito – Amostras geotêxtil.....	78
Tabela 19 – Resultados de intercepto coesivo e ângulo de atrito – Amostras barreira geossintética.....	83
Tabela 20 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento – RSU	86
Tabela 21 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento – Lodo de ETA.....	86

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 SISTEMA SOLO-GEOSSINTÉTICO	15
2.1.1 Principais Parâmetros de Comportamento de Solos para Aplicações em Aterros Sanitários.....	15
2.1.2 Influência do Geossintético nos Parâmetros de Comportamento do Solo.....	20
2.2 SISTEMA SOLO-LODO	24
2.2.1 Comportamento Geotécnico do Lodo de ETA.....	25
2.2.2 Influência do Lodo de ETA nos Parâmetros de Comportamento de Solo.....	32
2.2.3 Aplicação de Lodo em Aterros Sanitários.....	36
2.3 SISTEMA SOLO-LODO-GEOSSINTÉTICO.....	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 ETAPA 1 - COLETA DAS AMOSTRAS	40
3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS AMOSTRAS	42
3.3 ETAPA 2 - ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS	43
3.4 ENSAIOS MECÂNICOS E HIDRÁULICOS	43
3.4.1 Preparação das Amostras.....	43
3.4.2 Etapa 3 - Ensaio de Compactação	45
3.4.3 Etapa 3 - Ensaio de Condutividade Hidráulica.....	45
3.4.4 Etapa 4 - Ensaio de Compressão Confinada.....	47
3.4.5 Etapas 4 e 5 - Ensaio de Cisalhamento Direto.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51

4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS	51
4.1.1 Propriedades Físicas das Misturas Solo-lodo	57
4.2 ENSAIOS MECÂNICOS E HIDRÁULICOS	58
4.2.1 Ensaio de Compactação.....	58
4.2.2 Ensaio de Condutividade Hidráulica	60
4.2.3 Ensaio de Compressão Confinada	62
4.2.4 Ensaio de Cisalhamento Direto	65
4.2.4.1 Amostras sem geossintético.....	65
4.2.4.2 Amostras com geossintético	74
5 CONCLUSÃO.....	87
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional acelerado de grandes centros urbanos, obteve-se um aumento na procura por meios que possam contribuir na busca por soluções de problemas ambientais que surgiram como resultado das ações humanas. Um exemplo dessas questões ambientais é o resíduo proveniente dos decantadores e da lavagem de filtros nas estações de tratamento de água (ETAs) de ciclo convencional, também conhecido como lodo de ETA, ou LETA (Silva, 2021).

O lodo de ETA é um resíduo composto de água e sólidos suspensos e possui características variáveis com relação a origem da água bruta. Outros fatores que influenciam nas propriedades do resíduo são os processos aplicados nas estações e os produtos utilizados ao longo do tratamento da água (Roque; Montalvan; Boscov, 2021). Nesse contexto, o lodo é considerado um material não biodegradável, rico em matéria orgânica — dependendo da origem da água bruta —, silicatos e produtos gerados dos químicos utilizados no tratamento da água (Rodrigues; Holanda, 2013). Por causa dessa variabilidade de componentes presentes no resíduo e propriedades observadas, duas amostras de lodos coletados na mesma estação em períodos distintos do mesmo ano podem apresentar comportamentos diferentes (Boscov; Tsugawa; Montalvan, 2021).

Embora seja classificado segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido, o descarte inadequado desse lodo em corpos de água tem sido uma prática muito comum no Brasil (Montalvan, 2016), sendo considerado crime ambiental de acordo com o art. 33 da lei nº 9.605 (Brasil, 1998). Além da ilegalidade, a liberação do resíduo em corpos de água pode acarretar em assoreamento e deterioração da qualidade da água (Boscov; Tsugawa; Montalvan, 2021).

Verifica-se o crescimento da quantidade de pesquisas que objetivam a busca por soluções econômicas e benéficas no reaproveitamento do lodo, visto que os padrões ambientais atuais se apresentam mais rigorosos em relação aos anteriores quando se trata do descarte do resíduo (CONAMA, 2011). Além desse fator, ocorre também o aumento do custo de transporte desses resíduos das ETAS até aterros sanitários e a falta de áreas adequadas para destinação em regiões urbanas (Prim, 2011; Gonçalves *et al.*, 2017).

Um exemplo de pesquisa é a utilização de lodo misturado a solos naturais, que possuam propriedades geotécnicas adequadas. Essa mistura recebe a denominação de solo-lodo e possui pontos positivos como a redução desses resíduos sólidos na natureza, a preservação do solo como um recurso natural por substituí-lo parcialmente (Montalvan, 2016) e a redução da

condutividade hidráulica do solo quando aditivado do lodo (Bosco; Tsugawa; Montalvan, 2021). Porém, a mistura também pode apresentar pontos negativos como, por exemplo, a diminuição da resistência da mistura quando comparada ao solo natural (Wang; Hull; Jao, 1992 apud Ferreira, 2020).

Nesse contexto, a utilização de geossintéticos – estruturas poliméricas empregadas em obras geotécnicas – pode ser considerada uma alternativa possível de ser utilizada, em conjunto com a mistura solo-lodo, quando se leva em consideração os benefícios que sua aplicação pode impactar no âmbito econômico, ambiental e de segurança das obras geotécnicas (Pimentel; Palmeira, 2011).

1.1 JUSTIFICATIVA

Uma das questões que envolve o emprego do lodo como possível material de melhoria de características é que os materiais alternativos disponíveis para utilização em aterros sanitários podem apresentar propriedades inadequadas para sua aplicação. Esse ponto faz com que a utilização do lodo de ETA como material de melhoria de características mecânicas e hidráulicas seja uma solução para a emprego em camadas impermeabilizantes de fundo, cobertura diária e cobertura final de aterros sanitários (Gonçalves *et al.*, 2017).

Entretanto, como a utilização de misturas de solo natural com lodo de ETA pode apresentar certa diminuição da resistência do conjunto dependendo da análise abordada (Wang; Hull; Jao, 1992 apud Ferreira, 2020), aliar a utilização do solo-lodo com geossintéticos com o objetivo de minimizar essa dificuldade torna-se um caminho viável de pesquisa (Pimentel; Palmeira, 2011).

Os possíveis objetivos que a união de amostras solo-lodo com geossintéticos pode apresentar são dependentes do tipo de geossintético selecionado, visto que esse material pode apresentar diversas funções. Uma delas é sua possível função de impermeabilização, vista especialmente em geossintéticos do tipo membrana. As barreiras geossintéticas utilizadas na atribuição possuem elevada flexibilidade, resistência química e mecânica, além de resistência à intemperes, calor e degradação. Esse tipo de geossintético possui alta aplicação em obras como aterros sanitários já que pode ser executado tanto em camadas de base – para impedir a fuga de material lixiviado para camadas de lençóis freáticos – quanto para camadas de cobertura com função de selagem do aterro (Duarte, 2009). Portanto, compreende-se a necessidade de pesquisas direcionadas à união de misturas de solo-lodo e a utilização do geossintético em estruturas geotécnicas.

Portanto, dentro do contexto apresentado, utilizar o lodo de ETA em obras geotécnicas – como aterros sanitários ou outros tipos de obras, visto que possuiriam reforços dos geossintéticos – possibilitará que esse resíduo seja reaproveitado, deixando de ocupar espaços de disposição para ser um material de construção destes mesmos locais (Gonçalves *et al.*, 2017). Dessa forma, ocorre o incentivo da preservação de materiais naturais de jazidas, gera mais espaços para a deposição em aterros de outros tipos de resíduos não recicláveis ou reaproveitáveis e preserva os corpos da água que o lodo seria despejado inadequadamente. Além dos pontos apresentados, unir o resíduo com um material polimérico já estabelecido no mercado facilitará o emprego do conjunto solo-lodo-geossintético, além de popularizar como mais uma opção de utilização dos geossintéticos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho consiste em avaliar a influência da adição de lodo de ETA nas propriedades mecânicas de solo reforçado com geossintéticos e nas propriedades hidráulicas de amostras solo-lodo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar geotecnicamente o solo, o lodo e as misturas de solo e lodo de ETA, variando a porcentagem de lodo presente na mistura para auxiliar na compreensão da influência das adições;
- Realizar ensaios de condutividade hidráulica nas amostras de solo-lodo para compreensão do comportamento hidráulico das misturas;
- Realizar ensaios de cisalhamento direto para determinar as propriedades mecânicas das amostras de solo-lodo e de solo-lodo reforçados com geossintéticos do tipo geomembrana e geotêxtil para compreensão de comportamentos das misturas;
- Comparar a influência da adição do lodo no comportamento mecânico e hidráulico das amostras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica do presente trabalho trata sobre os temas de parâmetros de comportamento de solo em aplicações de aterros sanitários e a influência do geossintético nos parâmetros do solo. Além disso, também são abordados os temas da influência do lodo de ETA nos parâmetros do solo e aplicação de lodos em aterros. Por fim, a revisão apresenta os trabalhos mais recentes que possuem como objeto de estudo o sistema solo-lodo-geossintético.

2.1 SISTEMA SOLO-GEOSSINTÉTICO

Quando se discute a concepção de obras ambientais, como aterros sanitários, entende-se que a utilização de geossintéticos nesse tipo de construção pode apresentar diversas vantagens como a repetibilidade de camadas, uniformidade de propriedades como resistência ao cisalhamento, e a redução ou a eliminação de materiais de construção naturais. Além disso, pode-se atestar que a utilização de geossintéticos auxilia na redução do impacto ambiental em relação às alternativas convencionais (Palmeira; Gardoni; Araújo, 2021).

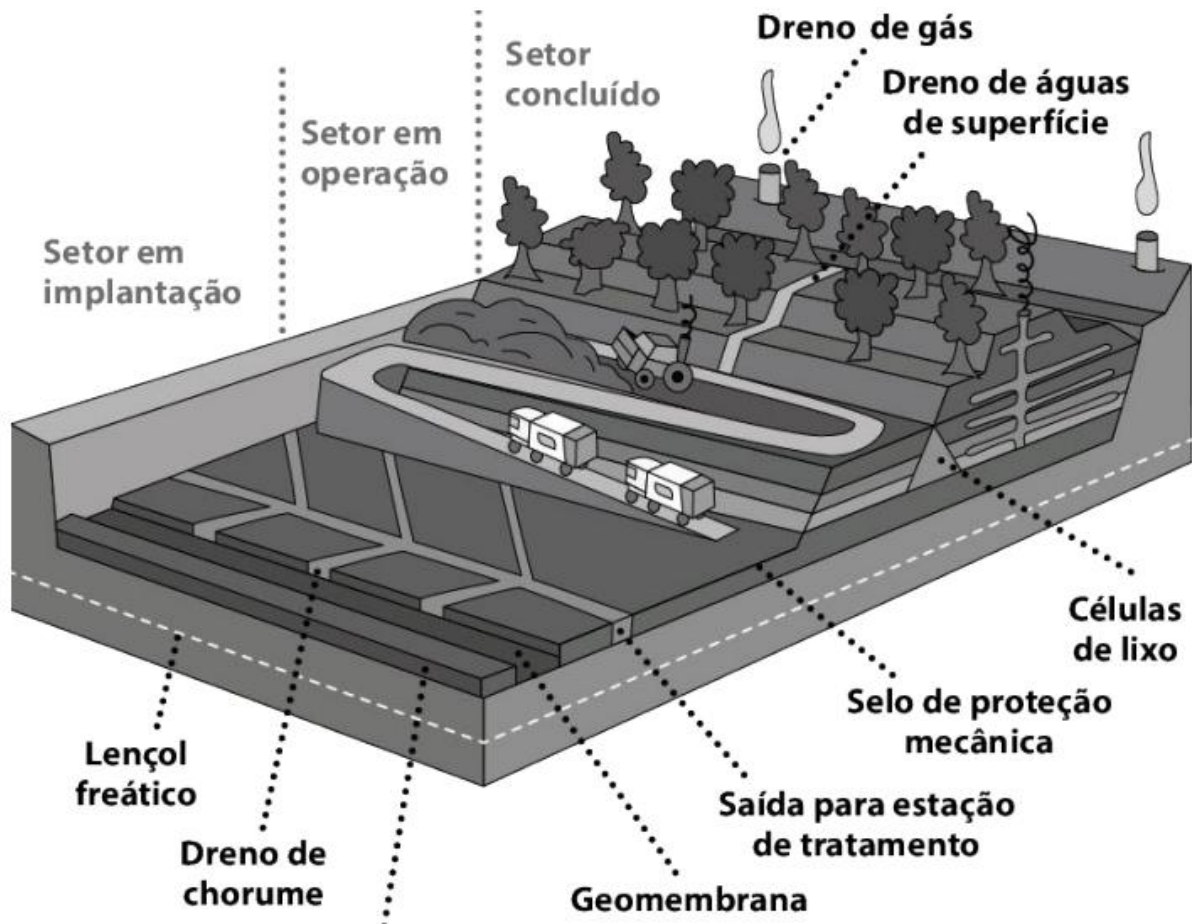
Dentro desse contexto, é necessário compreender o material natural — o solo — que será utilizado para construção do aterro, bem como qualquer elemento que esteja trabalhando em conjunto com o solo — como o geossintético — para entender a interação desse sistema.

2.1.1 Principais Parâmetros de Comportamento de Solos para Aplicações em Aterros Sanitários

Devido ao desenvolvimento industrial e ao crescimento de áreas urbanas, o aumento da geração de resíduos sólidos provocou a busca por soluções viáveis de disposição desses resíduos (Locastro; Angelis, 2016). Uma das alternativas encontradas é a instalação de aterros sanitários, definidas como obras estruturadas a partir da concepção do processo utilizado para disposição final de rejeitos e resíduos sólidos no solo (Santiago Junior *et al.*, 2021) e pode ser representado pela Figura 1.

De acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1992), aterro sanitário é definido como uma técnica de destinação de resíduos sólidos urbanos e que não causa danos à saúde pública ou impactos ambientais. Além disso, quando devidamente controlado, o aterro pode ser considerado como um dos métodos disponíveis mais adequado no quesito de disposição de todos os tipos de resíduos, inclusive os resíduos dos serviços de saúde (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2010).

Figura 1 – Representação de um aterro sanitário de RSU



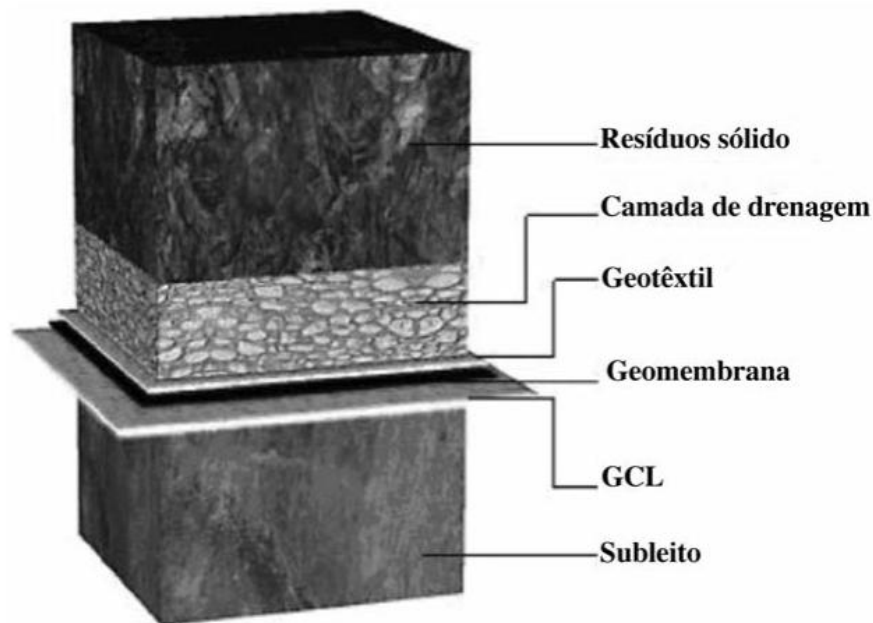
Fonte: Palermo; Gomes (2017)

Seu processo consiste no aprisionamento dos resíduos em uma área pequena com menor volume possível, com controle da percolação de líquidos e gases gerados pelos resíduos, conhecido como *lixiviado* (Bosco, 2008).

Para que seja possível realizar esse confinamento, é importante entender como funcionam os elementos de proteção, ou seja, as estruturas que compõem o aterro (Locastro; Angelis, 2016). Dentro desses elementos, destacam-se aqueles responsáveis pela impermeabilização do sistema, já que possuem como objetivo o impedimento de infiltração do chorume no solo, fenômeno esse considerado altamente prejudicial para o objetivo final de proteção da obra (Workman; Keeble, 1989).

O aterro sanitário é composto por camadas de base (Figura 2) e camadas de cobertura (Figura 3). As camadas de base possuem a função de impedir que os líquidos percolam e contaminem quaisquer camadas de solo, lençol freático ou aquífero abaixo dele. As camadas de cobertura exercem a função de controlar a entrada de água proveniente de chuvas e saída de biogás para a atmosfera (Catapreta, 2008, Maciel; Jucá, 2011).

Figura 2 – Sistema de revestimento de base de aterro sanitário



GCL = *geosynthetic clay liner* ou geocomposto bentonítico.

Fonte: Pitanga, Gourc e Vilar, 2009.

Figura 3 – Sistema de revestimento de cobertura de aterro sanitário



GCL = *geosynthetic clay liner* ou geocomposto bentonítico.

Fonte: Pitanga, Gourc e Vilar, 2009.

O sistema de impermeabilização da base pode ser composto por materiais naturais, como solos argilosos, ou sintéticos, como geossintéticos (Piedade Junior, 2003). Além do

material que compõem a impermeabilização, também é levado em consideração se a camada de base é simples, formada apenas por um elemento, ou dupla, composta pelo revezamento entre camada de solo natural e geossintético, como o geocomposto bentonítico (GCL) ou a barreira geossintética de PEAD (Santiago Junior *et al.*, 2021).

A decisão do tipo de impermeabilização utilizado na camada de base leva em conta: a composição química do lixiviado, para entender as necessidades de camadas de proteção; a periculosidade do resíduo e seus riscos ambientais; o coeficiente de permeabilidade, para analisar a capacidade de percolação da camada; e a economia com relação ao empréstimo do material natural, para realizar a análise econômica de viabilidade (Santiago Junior *et al.*, 2021) (Locastro; Angelis, 2016).

De forma geral, as normativas brasileiras não apresentam especificações técnicas das propriedades geotécnicas que camadas de cobertura diária e final em aterros devem apresentar (Montalvan, 2016).

Porém, de acordo com a NBR 13896 (ABNT, 1997), quando se analisa um solo para possível aplicação em aterros sanitários, é necessário conhecer sua classificação e seu comportamento hidráulico e mecânico.

Sobre sua classificação, alguns autores determinam que um solo adequado para ser utilizado na impermeabilização de aterros sanitários deve apresentar certas características, como demonstradas no Quadro 1.

Quadro 1 – Características de solos para impermeabilização em camadas de aterros sanitários

Características	Rocca <i>et al.</i> (1993)	Daniel (1993)	Qasin e Chiang (1994)
Porcentagem de pedregulhos	Classificação SUCS (CL, CH, SC ou OH)	% Retido na #4 < 30%	% Retido na #4 < 50%
Porcentagem de finos	% Passante na #200 > 30%	% Passante na #200 > 20%	% Passante na #200 > 30%
Limite de Liquidez	LL>30%	-	-
Índice de Plasticidade	IP≥15%	IP>7%	IP 7% a 15%

SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solos; CL = argila de baixa compressibilidade; CH = argila de alta compressibilidade; SC = areia argilosa; OH = solo orgânico

Fonte: Fiedler, 2023 - modificado

Em relação às suas características hidráulicas, é necessário conhecer seu coeficiente de condutividade hidráulica, sendo esse entendido como a facilidade com que a água se movimenta no solo (Gonçalves; Libardi, 2013). Esse parâmetro é considerado principal quando se trata da aplicação do material em coberturas finais e nos revestimentos de fundo dos aterros, visto que a baixa permeabilidade diminui a infiltração de água e a contaminação do aquífero (Montalvan, 2016).

A NBR 13896 (ABNT, 1997) determina que a construção de um aterro deve ocorrer em áreas onde possua a predominância no subsolo de materiais com coeficiente de permeabilidade igual ou inferior à 5×10^{-7} m/s. Dessa forma, o atendimento a essa especificação é essencial para cumprimento de legislações locais de uso do solo.

Workman e Keeble (1989) concluíram que a permeabilidade do solo é o fator mais importante para estimar a eficiência a longo prazo da camada de base. Os autores determinam que solos argilosos que possuem permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s são mais usualmente considerados adequados para fornecer proteção a longo prazo.

Em outra perspectiva, Daniel (1993) e Qasim e Chiang (1994) observaram que, em países como Estados Unidos, a camada impermeabilizante deverá possuir um coeficiente de condutividade não superior a 1×10^{-9} m/s.

A respeito do comportamento mecânico que o material a ser utilizado na construção do aterro deve apresentar, entende-se como importante compreender a resposta à compactação do material, principalmente quando é utilizado como construção das camadas diárias. De acordo com Susin (2020), pode-se considerar a compactação como uma das etapas mais importantes da terraplanagem de um aterro. Essa é a etapa responsável por garantir densidade, compacidade e grau de compactação adequado em toda a construção e qualquer falha cometida pode ocasionar escorregamentos, processos erosivos e recalques excessivos causando assim retrabalho durante a execução e a operação do aterro sanitário (Susin, 2020).

A compactação realizada nos aterros também influencia na compressibilidade do material, que interfere nos recalques primários, ocasionados pela ação de sobrecargas, e recalques secundários, causados sob carga constante e de baixa velocidade (Elk; Corrêa; Ritter, 2019).

Outra característica mecânica a ser observada em materiais a serem utilizados para construção de aterros sanitários é sua resistência ao cisalhamento, definida usualmente pelos parâmetros de resistência como coesão e ângulo de atrito interno, a partir do critério de Mohr-Coulomb. Ambos parâmetros podem sofrer variações ao longo do tempo causadas por fatores como alteração do nível piezométrico do aterro, mudança no grau de compactação, morfologia e gravimetria (Norberto *et al.*, 2020).

Nesse contexto, considerando todas as possíveis influências causadas por propriedades geotécnicas dentro do sistema de aterros sanitários, compreende-se a importância de estudar com mais profundidade as características hidráulicas e mecânicas de quaisquer materiais a serem utilizados na construção de aterros sanitários.

2.1.2 Influência do Geossintético nos Parâmetros de Comportamento do Solo

Geossintéticos são materiais poliméricos (manufaturados ou naturais) utilizados em obras geotécnicas e de proteção ambiental com o objetivo de solucionar problemas de reforço, estabilização de solos, drenagem e filtração, barreiras de fluidos, gases ou de sedimentos, entre outras funções.

Existe uma grande variedade de geossintéticos que podem ter distintas funções dependendo da forma como suas fibras são dispostas e também de acordo com seu processo de fabricação e cada geossintético apresenta uma forma de influenciar o material onde está sendo aplicado (Palmeira, 2018).

As barreiras geossintéticas (GBR), conhecidas como geomembranas, são materiais poliméricos bidimensionais com coeficiente de permeabilidade reduzido em torno de 10^{-11} a 10^{-13} m/s. São estruturas utilizadas com função de barreira ou de separação, em situações onde é necessário promover a separação de dois ou mais materiais (Palmeira, 2018) e podem ser visualizadas na Figura 4.

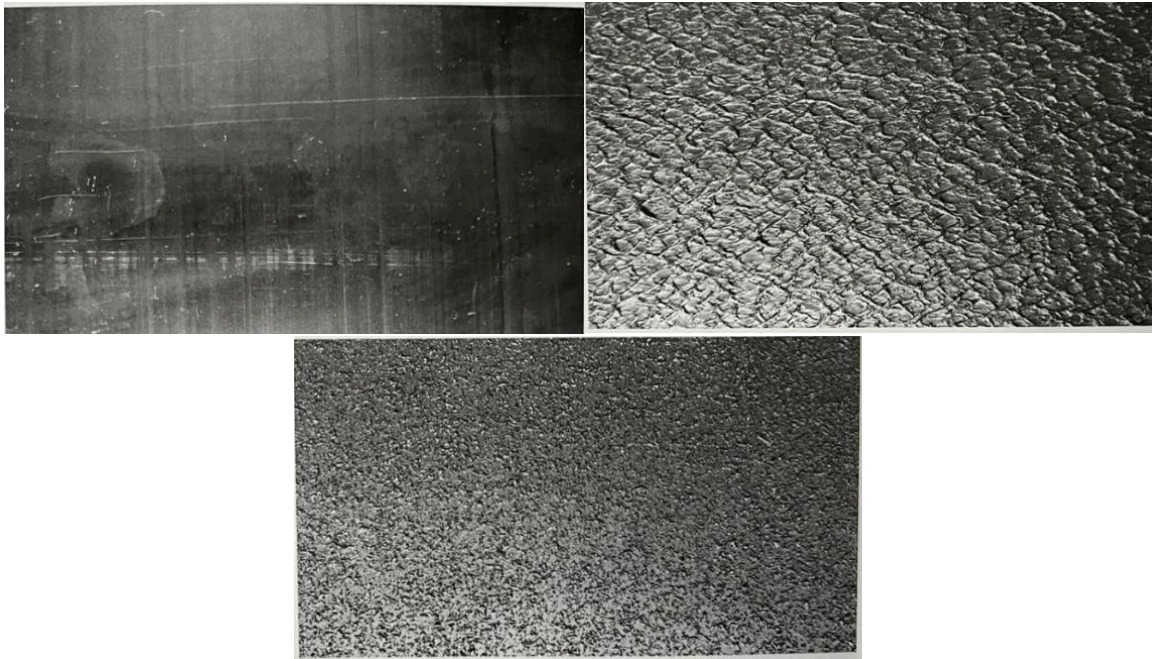
Figura 4 – Barreira geossintética disponibilizada em rolos



Fonte: Geossintec, 2022.

Esses geossintéticos são fabricados a partir de polímeros termoplásticos como o PVC (policloreto de vinila), o PEAD (polietileno de alta densidade) e o PEBD (polietileno de baixa densidade). Dependendo do polímero a ser utilizado, a barreira geossintética pode ser apresentada como um material flexível com superfície lisa (PVC) ou rígida com a superfície lisa ou texturizada (PEAD) (Chiarello, 2022), como possível de observar na Figura 5.

Figura 5 – Diferentes texturas da barreira geossintética



Fonte: Palmeira, 2018.

Em relação às possíveis dimensões, uma barreira geossintética pode ser processada em folhas de diversas larguras e espessuras dependendo do material e da texturização. Por exemplo, uma geomembrana de PEAD lisa pode variar de 0,75 a 2,5 mm (Valentin, 2008).

Por essas características e possíveis funções, a barreira geossintética tem sido utilizada em diversos tipos de obras, como em obras de controle de fluxo, tanques de armazenamento de produtos químicos, canais, reservatórios, entre outras situações (Santiago Junior *et al.*, 2021).

Além disso, esse geossintético é considerado ideal para emprego em estruturas de deposição de resíduos, como aterros sanitários, visto que sua utilização promove um sistema impermeabilizante, evitando a contaminação do solo e de águas subterrâneas por chorume (Mello; Lavoie; Lodi, 2021). Outra questão é que, por causa de sua composição polimérica e alta cristalinidade, a geomembrana PEAD possui alta resistência química e é a barreira geossintética mais utilizada em aterros sanitários (Lavoie; Bueno; Lodi, 2014).

Por causa de sua capacidade de reduzir o coeficiente de condutividade hidráulica do sistema solo-geossintético, a barreira geossintética pode ser considerada como um dos componentes mais importantes de sistemas de camada de base e camada de cobertura em aterros sanitários modernos (Zhang, 2020).

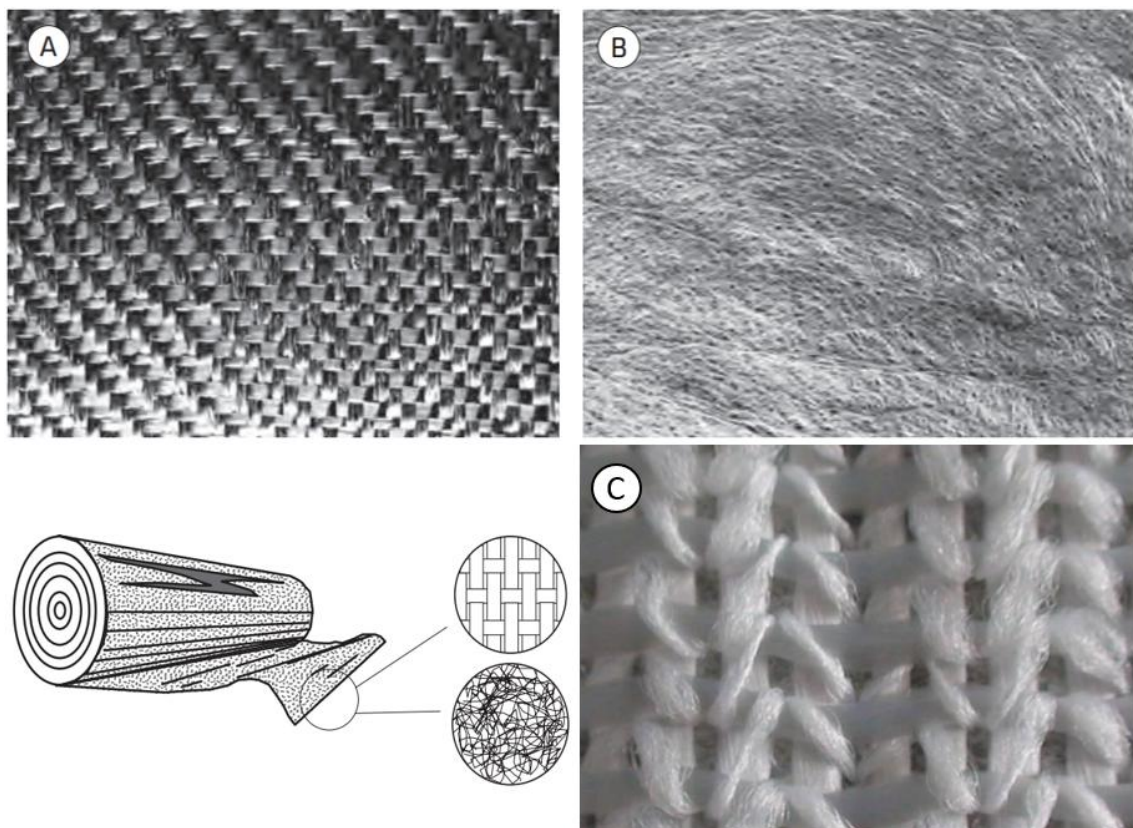
Entretanto, a geomembrana sozinha pode acabar recebendo danos mecânicos que podem causar perfurações, assim danificando sua estrutura e prejudicando sua performance dentro da aplicação onde for colocada. Por esse motivo existem outros tipos de geossintéticos

que podem ser utilizados em conjunto com a geomembrana para exercer função de proteção, como o geotêxtil (Costa, 1999).

O geotêxtil (GTX) é um material polimérico têxtil permeável que possui certas funções como drenagem, filtração, reforço, separação e proteção (Costa, 1999). Por causa de sua grande gama de utilizações, o geotêxtil é considerado o geossintético mais versátil, além de ser produzido com diversos tipos de polímeros como polietileno, polipropileno, poliéster, poliamida, polivinil álcool e poliaramida (Vertematti, 2022).

Dependendo do processo de como suas fibras são manufaturadas, ele pode ser classificado em geotêxtil tecido (GTX-X), geotêxtil não tecido (GTX-NW) ou geotêxtil tricotado (GTX-K) (Palmeira, 2018). Os geotêxteis tecido e não tecido, bem como o geotêxtil tricotado, podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6 – Exemplos de geotêxtil tecido (a) e não tecido (b) e geotêxtil tricotado (c)



Fonte: Palmeira, 2018; Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012.

Quando se trata da aplicação de geomembranas e geotêxteis em uma obra, deve-se atentar às questões de comportamento devido à interação entre o geossintético e o solo, visto que o solo deixa de ser considerado um material homogêneo por causa da presença do material polimérico, ou seja, acaba tornando-se um material compósito.

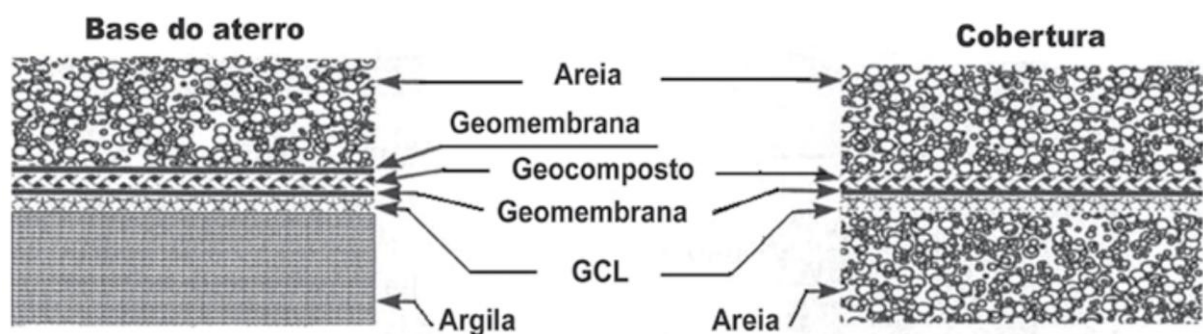
Os planos de fraqueza ocasionados pela união de um geossintético e uma matriz de solo acabam por afetar significativamente no comportamento do conjunto em relação à resistência ao cisalhamento.

Analisando um material compósito, entende-se que essa estrutura é formada de duas etapas: a matriz, responsável pela distribuição das tensões, e o reforço, responsável pelo aumento das propriedades mecânicas.

A interação entre o solo (matriz) e a geossintético (reforço) acaba formando superfícies consideradas mais frágeis, ou seja, planos de fraqueza, que podem ocasionar na ruptura da camada onde está sendo aplicada o solo-geossintético, como a camada de base, a célula de resíduos ou a camada de cobertura de um aterro sanitário, por exemplo (Chiarello, 2022).

A partir da Figura 7 observa-se interfaces que podem ser consideradas planos de fraqueza em um sistema impermeabilizante de camada de cobertura e camada de base de um aterro sanitário. Os planos podem ser prejudiciais em estruturas inclinadas, como taludes, que são previstas no aterro. Esses planos de fraqueza também podem ser decorrentes do recalque esperado devido as variações volumétricas que o resíduo estocado no aterro sofre ao longo do tempo.

Figura 7 – Pontos de contato entre camadas de sistemas de impermeabilização

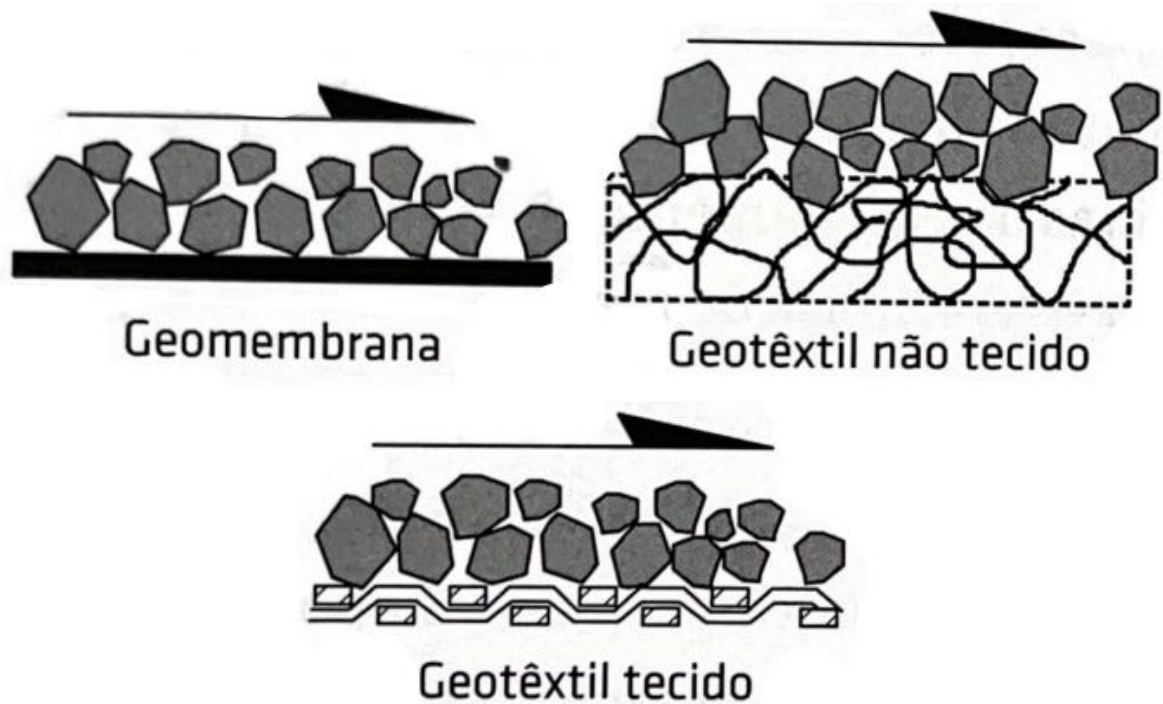


GCL = *geosynthetic clay liner* ou geocomposto bentonítico.

Fonte: Vidal, 2007.

Compreende-se que a intensidade da interação entre o geossintético e o solo é dependente de certos fatores como o tamanho e forma dos grãos do solo, o tipo de geossintético que é aplicado e o nível das tensões atuantes no sistema (Palmeira, 2018). Nas geomembranas e nos geotêxteis, o mecanismo de interação é considerado como de atrito, como possível de ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Diferentes mecanismos de interação entre o solo e geossintéticos planares



Fonte: Palmeira, 2018.

Em relação aos geotêxteis não tecidos, por causa da disposição de suas fibras, pode ocorrer a inserção parcial dos grãos do solo entre as fibras, aumentando o atrito entre os dois elementos. Nos geotêxteis tecidos, apesar de não permitirem tanta introdução dos grãos como os não tecidos, a irregularidade da superfície exerce um papel no aumento da aderência (Palmeira, 2018).

Entretanto, a forma de aderência se altera um pouco quando se trata das geomembranas, onde essa ligação entre o solo e o geossintético aumenta conforme eleva-se o nível de tensão e provoca-se um afundamento localizado no geossintético, pelos grãos do solo, em maiores níveis de tensão (Palmeira, 2018).

Para compreender melhor o comportamento mecânico dessas camadas de solo-geossintético, é necessário realizar ensaios como o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de arrancamento. A partir deles, pode-se obter informações sobre parâmetros importantes como resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito e adesão (Bergado *et al.*, 2006).

2.2 SISTEMA SOLO-LODO

O lodo de ETA é um resíduo gerado pela produção de água potável nas estações de tratamento de água. O processo mais convencional de tratamento inclui etapas de coagulação,

floculação, decantação, filtração, correção do pH, desinfecção e fluoretação (Gomes *et al.*, 2019).

Alguns produtos químicos utilizados no tratamento de água, como coagulantes, acarretam o acúmulo de impurezas nos filtros e decantadores, que são sólidos suspensos de origem inorgânica, como grãos de solo, e de origem orgânica, como algas e bactérias (Boskov *et al.*, 2021).

A escolha do tipo de coagulante utilizado para o tratamento da água é feita através da análise da qualidade da água bruta, da disponibilidade do produto, da facilidade de operação e do menor custo de compra (Gomes *et al.*, 2019).

Além disso, deve-se levar em consideração qual seria o menor volume de lodo produzido utilizando o coagulante e quais as melhores condições pra desidratar o lodo, visto que a melhor destinação do lodo de ETA ainda não é considerada um consenso (Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2022).

De acordo com Guerra (2005), é necessário conhecer as características do resíduo para determinar a influência que o resíduo pode ter no meio que for inserido. Nesse contexto, por possuir características de formação estrutural diferentes do solo natural e, visto que, o objetivo da pesquisa se tratar da substituição de solo com propriedades geotécnicas adequadas por porcentagens de lodo de ETA, entende-se como imperativo explorar os aspectos físicos e de comportamento de amostras de lodo de ETA e de misturas solo-lodo.

2.2.1 Comportamento Geotécnico do Lodo de ETA

Apesar de ainda serem consideradas escassas, tem-se observado um aumento na quantidade de pesquisas com o foco no estudo das propriedades geotécnicas do lodo de estação de tratamento de água nos últimos anos (Boskov; Tsugawa; Montalvan, 2021).

Além disso, visto a variabilidade das características que o lodo pode possuir por causa da qualidade da água bruta originária, Boskov, Tsugawa e Montalvan (2021) determinam que o lodo de ETA deveria ser caracterizado de acordo com a aplicação geotécnica estudada.

Desse modo, quando se pensa em uma aplicação para camadas formadoras de aterros sanitários, considera-se relevante conhecer parâmetros de caracterização como umidade, massa específica real dos grãos, limites de Atterberg e curva granulométrica.

A umidade do lodo é altamente variável de acordo com o processo de desaguamento que o resíduo passa para ser descartado, podendo não sofrer processo nenhum ou passando por

leitos de secagem, lagoas de lodo ou centrífugas onde irá perder uma parcela de sua umidade (Cordeiro; Campos, 1998).

Valores de umidade excepcionalmente altos podem ser observados em trabalhos de diversos autores estudando lodos de estações de tratamento de água distintas. Montalvan (2016) obteve como material de estudo o lodo da ETA Cubatão no estado de São Paulo e o resíduo apresentou umidade inicial na faixa de 300%. Ao sul do Brasil, Fiedler (2023) no Paraná analisou o lodo de ETA de Iraí e observou o teor de umidade natural, após processo de centrifugação, na faixa de valores de 343%. Já em Santa Maria, no Rio Grande do Sul, Scapin (2021) obteve valores de 200% de umidade natural no lodo de estação de tratamento de água.

Em relação à massa específica real dos grãos, observa-se na Tabela 1 que os valores encontrados são considerados menores do que aqueles usuais para grãos de solos (2,55 a 2,75 g/cm³). Essa diminuição dos valores de massa específica pode ser justificada pela presença de matéria orgânica oriunda da água bruta tratada e dos coagulantes e floculantes utilizados no tratamento (Montalvan, 2016).

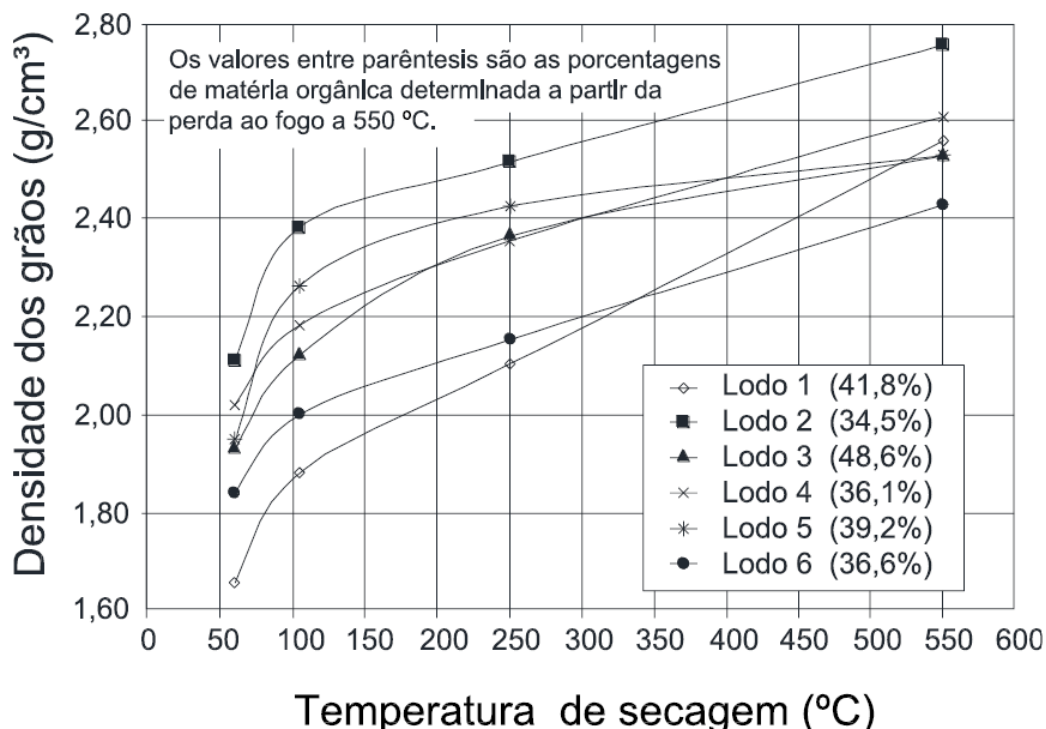
Tabela 1 – Massa específica real dos grãos de lodos de ETA's dos EUA

ETA	Massa específica real dos grãos (g/cm ³)
ETA Port Wentworth	2,55
ETA Lake Kilby	2,21
ETA E.M. Johnson	2,07
ETA York	2,18
ETA Lake Gaillard	2,05

Fonte: Vandermeiden; Cornwell, 1998 - modificado

Outro ponto que influenciará na determinação da massa específica real dos grãos é o efeito da temperatura de secagem para preparação das amostras. De acordo com Basim (1999), o valor de massa específica dos grãos aumenta conforme eleva-se a temperatura de secagem, como possível de ver na Figura 9, visto que a matéria orgânica passa por processo de oxidação devido ao aumento da temperatura.

Figura 9 – Variação da massa específica real dos grãos com a temperatura de secagem



Fonte: Basim, 1999 - modificado

Além da influência da matéria orgânica, também pode ocorrer uma influência de sazonalidade. Watanabe *et al.* (2011) observaram que o lodo de ETA pode apresentar características físicas variáveis ao longo do tempo de acordo com condições climáticas, visto que esse fator influencia na qualidade da água bruta e, por essa razão, o efluente do tratamento também se altera. Os autores coletaram amostras de lodo em meses diferentes e foram obtidos teores de massa específica real dos grãos diferentes para cada uma das amostras, conforme observável na Tabela 2, bem como para valores de limites de Atterberg.

Tabela 2 – Características geotécnicas do lodo de ETA em Hitachi, Japão

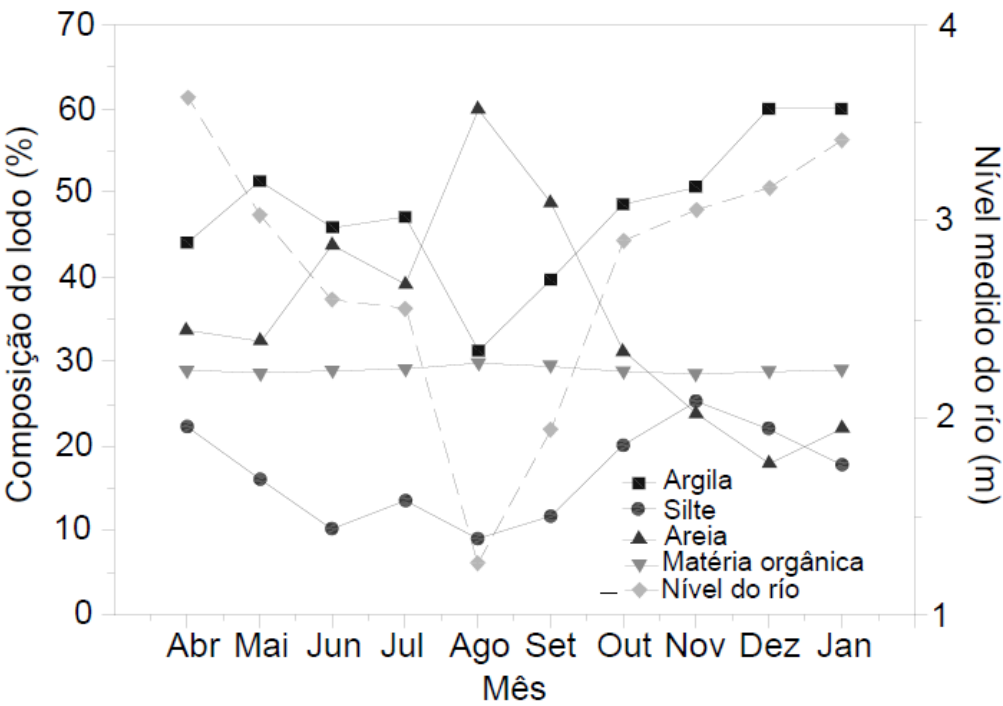
Mês/ano	Fev/06	Abr/06	Nov/06	Jun/07	Set/07	Nov/07	Nov/07	Dez/07	Jun/08	Nov/08
Massa específica real dos grãos (gf/cm ³)	2,48	2,51	2,60	2,40	2,61	2,45	2,51	2,45	2,58	2,58
Limite de Liquidez (%)	330	275	420	248	178	116	221	511	83	224
Limite de Plasticidade (%)	167	140	166	165	104	69	145	186	60	145

Índice de Plasticidade (%)	163	135	254	83	74	47	76	325	23	79
----------------------------	-----	-----	-----	----	----	----	----	-----	----	----

Fonte: Watanabe *et al.* (2011) – modificado.

A sazonalidade também afeta a distribuição granulométrica do lodo, como possível de observar na Figura 10. Dependendo do mês analisado e das alterações climáticas, a água bruta pode apresentar uma maior ou menor necessidade de coagulantes para obter a água tratada, gerando em variáveis teores de produtos químicos que impactam nos teores analisados na granulometria (Teixeira *et al.*, 2011). Essa sazonalidade também influencia na umidade inicial das amostras de lodo prévias à análise granulométrica (Montalvan, 2016).

Figura 10 – Variação sazonal das frações granulométricas e de matéria orgânica em lodo da ETA Presidente Prudente, SP



Fonte: Teixeira *et al.* (2011) – modificado.

Em relação aos limites de Atterberg, observou-se na Tabela 2 que a sazonalidade, bem como a variação de massa específica real dos grãos causada pela alteração de matéria orgânica, influenciou no comportamento mais ou menos plástico do lodo. Entretanto, dependendo do coagulante utilizado no processo de tratamento da água, os valores de limite de plasticidade e limite de liquidez também sofrem variação, como possível de observar na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de Atterberg de lodos de ETAs distintos

Referência	Coagulante	Limite de Liquidez (%)		Limite de Plasticidade (%)		Índice de Plasticidade (%)	
		$h_{natural}$	$h_{seca\ ao\ ar}$	$h_{natural}$	$h_{seca\ ao\ ar}$	$h_{natural}$	$h_{seca\ ao\ ar}$
Basim (1999)	Alumínio	371	107	228	NP	144	NP
	Ferro	690	151	20	NP	670	NP
Delgado (2016)	Ferro	-	NP	-	NP	-	NP
Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	Ferro	-	NP	-	NP	-	NP
Knierim; Delongui; Barbosa Pinheiro (2023)	Alumínio	-	164	-	143	-	21
Montalvan (2016)	Ferro	239	NP	81	NP	158	NP

$h_{natural}$ = umidade natural; $h_{seca\ ao\ ar}$ = umidade seca ao ar; NP = não plástico

Fonte: A autora, 2024.

Observa-se que, há uma diminuição do valor de limite de liquidez (LL) quando se compara a perda de umidade das amostras após secas ao ar. O valor de limite de plasticidade acaba por indicar que as amostras secas ao ar se tornam não plásticas.

De acordo com Basim (1999), essa ocorrência pode ser explicada devido à perda da camada dupla e consequente cimentação das partículas do lodo. Isso leva a uma formação de partículas maiores, levando o material a um comportamento mais próximo do granular.

Outras características relevantes de serem estudadas em relação ao lodo de ETA são seus parâmetros de compactação, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e compressibilidade. Em relação ao ensaio de compactação, não há normas que delimitem a metodologia correta para realizar o ensaio com amostras de lodo de ETA. Por esse motivo, autores como O’Kelly (2016), Knierim; Delongui; Barbosa Pinheiro (2023) e Gonçalves *et al.* (2017) utilizaram procedimentos já estabelecidos para solos.

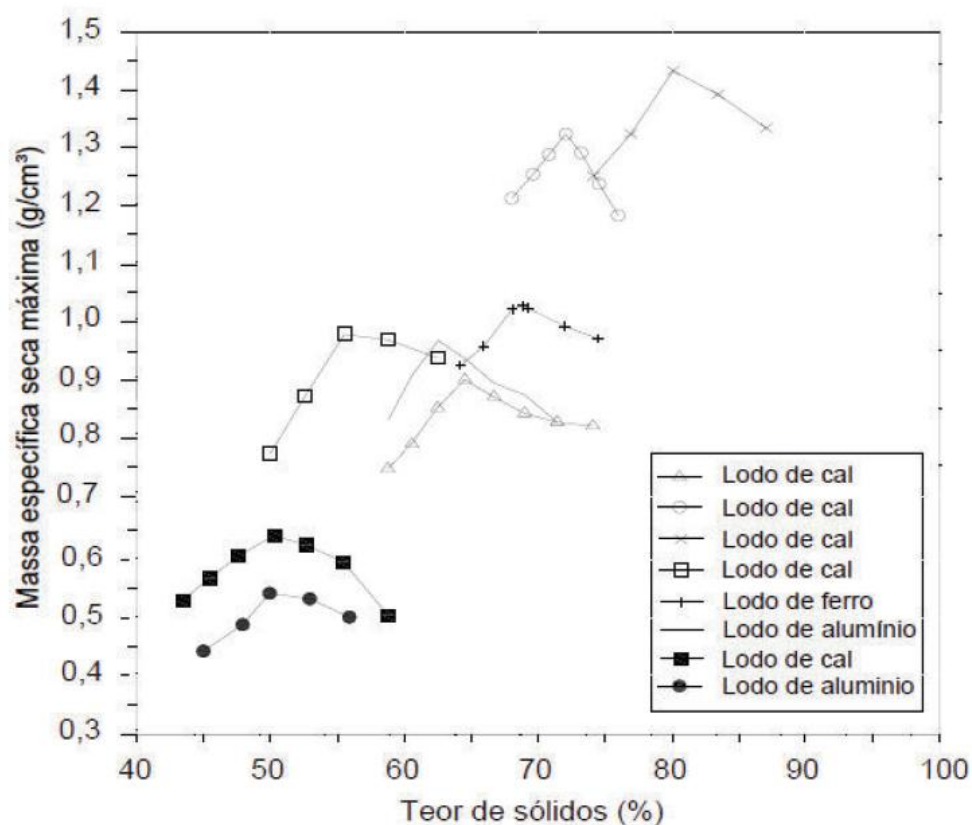
Acerca dos resultados possíveis de serem obtidos em um ensaio de compactação com amostras de lodo de ETA, Basim (1999) optou por realizar o ensaio para duas condições. A primeira seria com o umedecimento do lodo após a sua secagem prévia (NBR 7182) e a segunda ocorreria a partir da secagem do lodo a partir da umidade inicial elevada (ASTM D0698-00ae1).

Basim (1999) observou que, na amostra com secagem prévia e comparando ao ensaio realizado com a umidade inicial, as umidades ótimas são mais baixas (25% a 80%) e as massas específicas aparente seca máxima são mais elevadas (0,72 a 1,388 g/cm³). Trabalhando com um lodo de outra estação, Rodriguez *et al.* (2011) analisaram somente a compactação da

amostra de lodo seca previamente e observaram resultados de umidade ótima na faixa de 38,5% com massa específica de 1,320 g/cm³, valores esses próximos do obtido por Basim (1999).

Anteriormente a Basim (1999) e Rodriguez *et al.* (2011), Xia (1993) relatou que as curvas de compactação resultantes do ensaio apresentaram formato parabólico, como possível de ser observado na Figura 11, além de apresentar valores de massa específica aparente seca máxima no intervalo de 0,540 a 1,454 g/cm³ e umidade ótima na faixa de 50 a 80%.

Figura 11 - Curvas de compactação em função do teor de sólidos de lodos de ETA dos EUA com secagem prévia

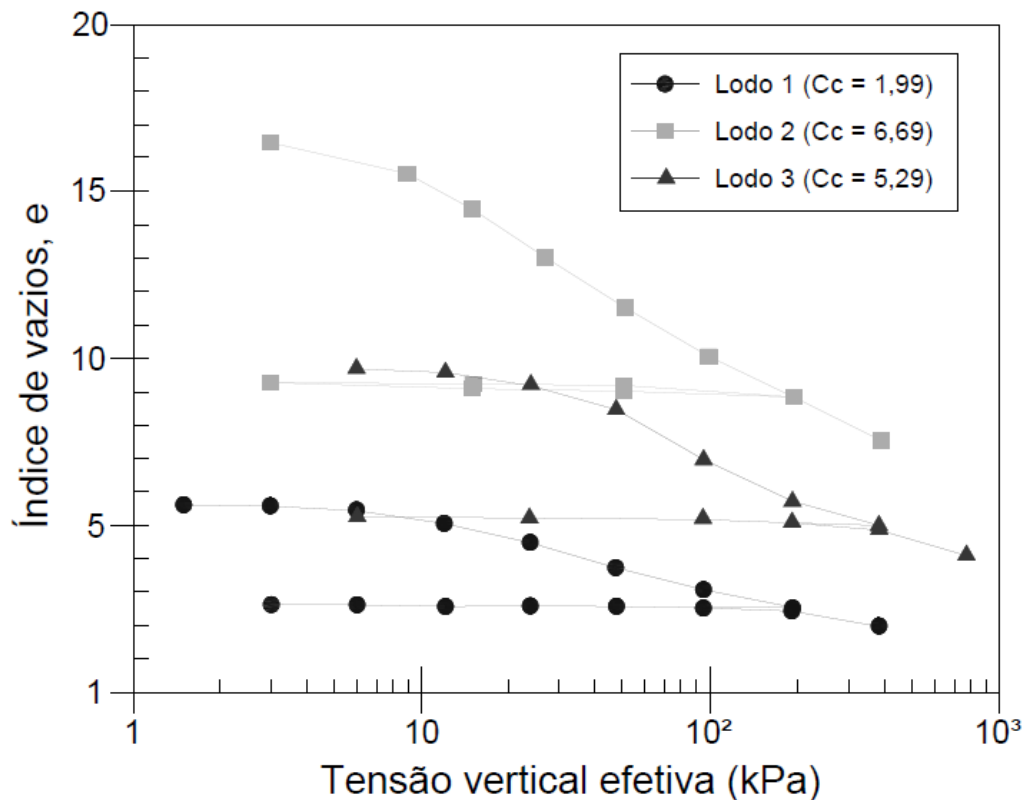


Fonte: Xia (1993) – modificado.

Outro ponto é o coeficiente de permeabilidade, onde Caniani *et al.* (2013) analisou o lodo com umidade natural e obteve valores na faixa de 10^{-8} a 10^{-6} m/s. Por esses valores baixos de coeficiente, os autores concluíram que o resíduo poderia ser um substituto da argila em camadas de cobertura de aterros, já que o intervalo de variação se apresentou próximo à da argila local (10^{-9} a 10^{-4} m/s).

A respeito da análise da compressibilidade, Wang *et al.* (1992) analisaram três tipos de lodos de ETA's diferentes a partir de ensaios de compressão edométrica e seus resultados, como os índices de compressão (C_c) podem ser visualizados na Figura 12, sendo que o lodo 1 é o lodo proveniente de tratamento utilizando ferro no tratamento ($C_c = 1,99$) e os lodos 2 ($C_c = 6,69$) e 3 ($C_c = 5,29$) são os lodos onde foram utilizados alumínio em seus tratamentos.

Figura 12 – Curvas de adensamento de três tipos de lodo de ETA



Fonte: Wang *et al.* (1992) – modificado.

De acordo com Wang *et al.* (1992), o C_c da maioria das argilas naturais é menor que 1, como 0,19 a 0,28 para caulinita, 0,50 a 1,10 para a ilita e 1,0 a 2,6 para a montmorilonita. Considerando que dois dos três lodos analisados apresentaram valores de índice de compressão superiores à faixa de valores do argilomineral mais compressível, pode-se considerar que o lodo de ETA se apresenta como mais compressível que argila natural.

A análise da resistência ao cisalhamento de amostras de lodo de ETA é considerada relevante quando realizada a aplicação do lodo em obras geotécnicas, já que é um parâmetro que influencia na estabilidade de taludes e sua capacidade de suporte (Montalvan, 2016).

A maioria dos trabalhos que estudam a resistência ao cisalhamento de solos ou resíduos realizam ensaios triaxiais (adensado não drenado/*consolidated undrained*/CU e não densado não drenado/*unconsolidated undrained*/UU) para obter os resultados, porém os objetivos próximos, em termos dos parâmetros de resistência, podem ser atingidos através de ensaios de cisalhamento direto.

No trabalho de Hsieh e Raghu (1997), foram determinados parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito através de ensaios de cisalhamento direto na condição não drenada para onze lodos de ETA's, sendo que os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de resistência de lodos de ETA (ensaio de cisalhamento direto não drenado)

Amostra	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Lodo 1	15,4	549,4	4,2	3
Lodo 2	19,8	405,1	2,4	7
Lodo 3	24,6	306,5	10,6	6
Lodo 4	34,6	189,0	11,4	9
Lodo 5	38,9	157,1	3,4	20
Lodo 6	39,9	150,6	3,0	9
Lodo 7	52,9	89,0	20,7	19
Lodo 8	59,7	67,5	15,5	26
Lodo 9	64,1	56,0	3,1	20
Lodo 10	72,6	37,7	17,7	16
Lodo 11	74,7	33,9	45,1	24

Fonte: Hsieh e Raghu (1997) – modificado.

É visível na Tabela 4 que algumas amostras de lodo com teores de umidade mais baixos apresentaram maiores valores de coesão quando comparados àqueles com altos teores de umidade. O ângulo de atrito se observou como maior conforme era menor a umidade e é considerado relevante destacar que esses valores apresentados não refletem o atrito entre as partículas, já que nesse tipo de ensaio acaba por sendo cisalhado o floco formado no processo de secagem e não a partícula de lodo (Montalvan, 2016). De acordo com Hsieh e Raghu (1997), a presença de matéria orgânica no lodo também influencia nos valores de ângulo de atrito, visto que pode ocorrer uma lubrificação da superfície dos flocos, ocasionando em redução do atrito entre eles.

2.2.2 Influência do Lodo de ETA nos Parâmetros de Comportamento de Solo

O lodo de ETA por si só pode apresentar características não favoráveis dependendo do foco com que é estudado. Por essa característica, vários autores, como Montalvan (2016), Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021), Knierim, Delongui e Barbosa Pinheiro (2023) e Mazzutti, Klamt e Faro (2023) estudaram as incorporações de lodo de ETA com amostras de solo para entender a influência do lodo em um meio já conhecido.

Montalvan (2016) realizou a pesquisa a partir de amostras de solo-lodo de ETA de Cubatão em misturas 3:1, 4:1 e 5:1 e observou que a adição do lodo não alterou

significativamente a granulometria. O lodo tinha sido classificado pelo SUCS como MH (silte de alta compressibilidade) e o solo e as misturas foram classificados como SC (areia argilosa). Além disso, os valores de massa específica dos grãos e os limites de consistência também não sofreram mudanças significativas.

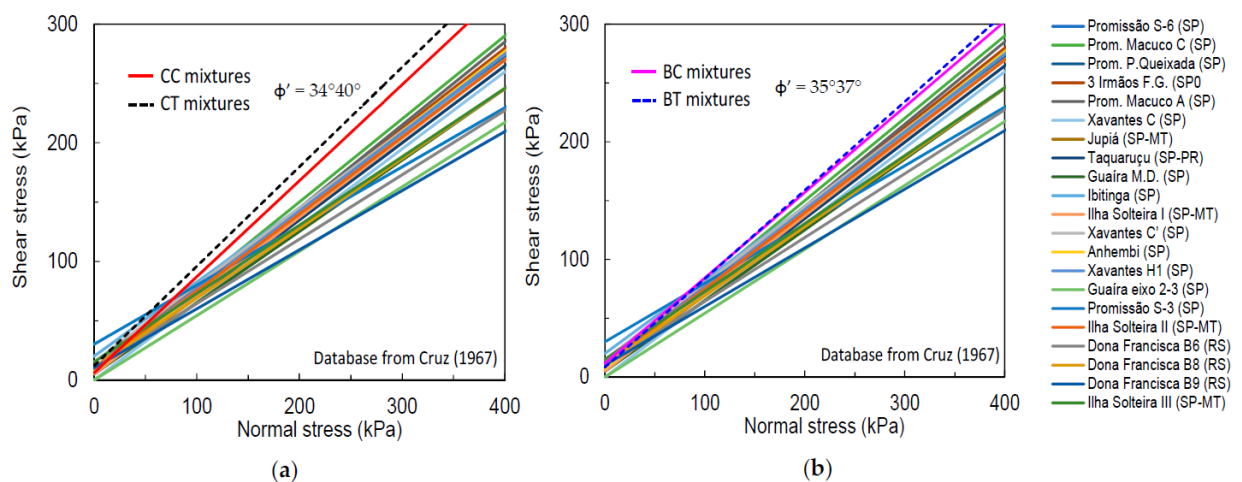
Além dos ensaios iniciais, Montalvan (2016) também realizou ensaios de adensamento e obteve valores de índice de compressão (solo: 0,07; misturas: 0,13 a 0,19) e índice de recompressão (solo: 0,02; misturas: 0,02 a 0,03). O autor observou que as misturas compactadas na umidade inicial são mais compressíveis que o solo quando compactado na umidade ótima.

Bosco, Tsugawa e Montalvan (2021) utilizaram amostras de dois tipos de solo (areia de Botucatu e argila de Campinas) misturados com amostras de dois tipos de lodo (lodo de ETA de Cubatão e lodo de ETA de Taiaçupeba). Como os autores observaram inicialmente que a adição de lodo pode ocasionar na redução da resistência ao cisalhamento do conjunto, além de aumentar a compressibilidade ou acabar por prejudicando a trabalhabilidade de solos, as amostras foram preparadas em proporções distintas de 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 e 1,5:1.

A partir da realização de ensaios de compactação, Bosco, Tsugawa e Montalvan (2021) observaram que, à medida que aumentava a adição de lodo, o peso específico aparente seco máximo diminuiu conforme elevava-se a umidade ótima.

Além disso, também foram realizados ensaios para determinar a resistência ao cisalhamento das misturas, em condições drenadas. Os autores compararam os resultados com resistências ao cisalhamento de um banco de dados de solos brasileiros, como possível de ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 – Comparação entre envoltórias de ruptura de amostras solo-lodo em condição drenada e solos brasileiros



(a) CC mixtures: misturas de solo argiloso de Campinas e lodo da ETA Cubatão; CT mixtures: misturas de solo argiloso de Campinas e lodo de ETA de Taiaçupeba

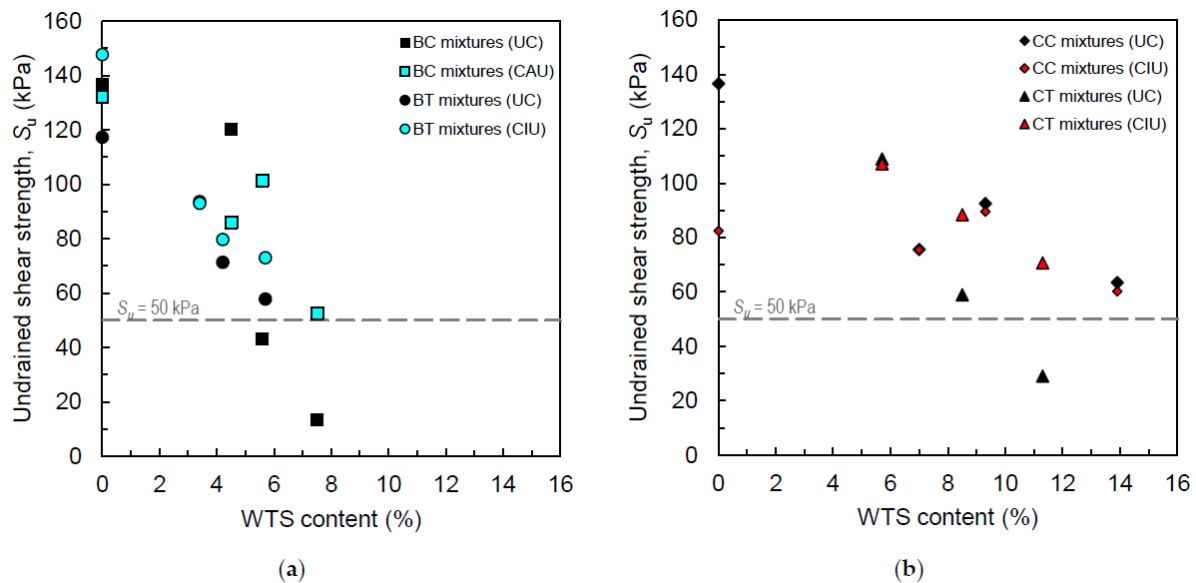
- (b) BC mixtures: misturas de solo arenoso de Botucatu e lodo de ETA de Cubatão; BT mixtures: misturas de solo arenoso de Botucatu e lodo de ETA de Taiaçupeba

Fonte: Boscov, Tsugawa e Montalvan, 2021.

Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021) observaram que as misturas apresentaram maior resistência ao cisalhamento, em condições drenadas, que os solos para tensões de confinamento maiores que 80 kPa. A maioria das amostras do estudo apresentou ângulo de atrito maior que o dos solos comparados e esse aumento foi acompanhado de uma diminuição na coesão das misturas, conforme aumentaram as incorporações de lodo.

Por fim, quando se analisou a resistência ao cisalhamento em condições não drenadas e com tensão de consolidação de 50 kPa (Figura 14), a adição do lodo diminui a resistência ao cisalhamento não drenado.

Figura 14 – Resistência ao cisalhamento em função da adição de lodo da ETA Cubatão e da ETA de Taiaçupeba



WTS = *Water treatment sludge*

Fonte: Boscov, Tsugawa e Montalvan, 2021.

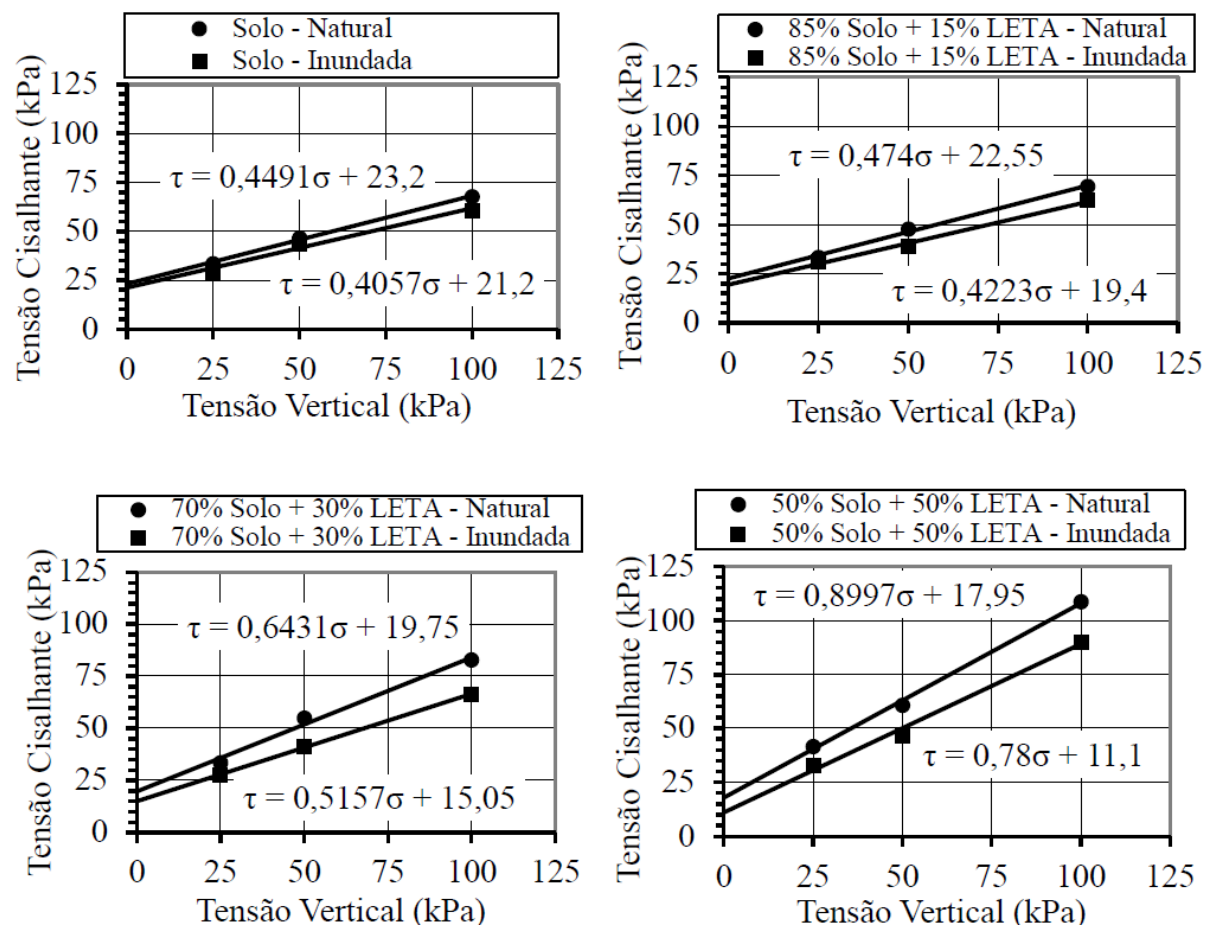
Pelos pontos destacados, os autores recomendam que a caracterização geotécnica ou mineralógica do lodo deve ocorrer conforme a necessidade da aplicação. Entretanto, a caracterização ambiental deve ser realizada considerando a forma como o lodo será condicionado em sua reutilização.

Essa questão é considerada relevante por Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021), visto que, dependendo da água bruta e dos processos de tratamento utilizados na estação, o lodo pode apresentar metais pesados que podem ser liberados em altas concentrações.

Knierim, Delongui e Barbosa Pinheiro (2023) realizaram ensaios para definir a resistência ao cisalhamento de amostras de solo laterítico com lodo de ETA de Santa Maria – RS nas condições natural (umidade ótima) e inundada.

Foi constatado que os valores encontrados na condição inundada foram menores do que aqueles encontrados na condição natural (Figura 15). A partir dessa diferença, os autores observaram que também ocorreu a redução dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno e justificaram o fenômeno a partir da saturação no processo de ruptura, onde ocorre perda de resistência decorrente da tensão por sucção.

Figura 15 – Envoltória de ruptura de cisalhamento (ensaio de cisalhamento direto)



Fonte: Knierim; Delongui; Barbosa Pinheiro, 2023.

No trabalho de Mazzutti, Klamt e Faro (2023) foram realizadas misturas de solo e lodo de ETA em 3 porcentagens: 15%, 30% e 50% de adição de lodo. Os autores observaram que, conforme aumentava a adição de lodo, ocorreu um aumento do tamanho dos grãos na distribuição granulométrica das misturas. Porém essa alteração não foi significativa a ponto de influenciar na classificação, assim como observado por Montalvan (2016).

Outros pontos observados pelos autores foram: a redução do peso específico real dos grãos das misturas solo-lodo, a redução do peso específico aparente seco máximo com o aumento da umidade ótima — assim como visto por Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021) — e o aumento da resistência quando realizados os ensaios de resistência à compressão não confinados.

Destaca-se a influência no coeficiente de permeabilidade visto no trabalho de Mazzutti, Klamt e Faro (2023), que pode ser visualizado na Tabela 5, onde ocorreu uma diminuição da condutividade hidráulica conforme aumentava a adição de lodo de ETA nas misturas.

Tabela 5 – Coeficiente de permeabilidade de misturas solo-lodo da Estação de Tratamento de Água de Frederico Westphalen – RS

Mistura	k (m/s)
M1 (100% solo)	$1,66 \times 10^{-8}$
M2 (85% solo + 15% lodo de ETA)	$1,71 \times 10^{-9}$
M3 (70% solo + 30% lodo de ETA)	$2,44 \times 10^{-9}$
M4 (50% solo + 50% lodo de ETA)	$2,03 \times 10^{-9}$

Fonte: Mazzutti, Klamt e Faro, 2023 – modificado.

Também há estudos que analisam o comportamento de amostras de misturas de lodo de ETA associadas ao solo, lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) e cal, para estabilização química, como o trabalho de Castilhos Junior, Prim e Pimentel (2012).

Os autores compararam a mistura com amostras de solo natural e chegaram à conclusão de que a adição do lodo resultou em aumento do tamanho típico dos grãos, redução no índice de plasticidade (IP) e da massa específica dos grãos. Além dessas observações, os parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentaram resultados significativos, os quais os autores associaram à reação pozolânica entre a cal e os minerais argilosos do solo utilizado.

2.2.3 Aplicação de Lodo em Aterros Sanitários

O lodo é um resíduo que ainda costuma ser descartado em corpos d'água, o que prejudica a qualidade da água bruta de mananciais a jusante. As possíveis alternativas de descarte do lodo de ETA, por exemplo, incluem destinação para tratamento em ETE's ou disposição em aterros sanitários.

Entretanto, devido à grande quantidade de produção do lodo, que tende a aumentar conforme piora a qualidade da água bruta visto que necessita de mais produtos para o devido tratamento, o resíduo acaba sobrecarregando as ETE's quando alocados a elas. Quando destinado aos aterros, o lodo prejudica a estabilidade estrutural da obra, devido à sua baixa resistência ao cisalhamento na condição natural (Boscov; Tsugawa; Montalvan, 2021).

Com o objetivo de investigar possíveis aplicações do lodo para evitar o descarte inadequado, estudos exploram a possibilidade de utilização do lodo de ETA, como também o lodo de ETE e o lodo de estações de tratamento de chorume (ETC), como um elemento construtivo, sendo esse associado ao solo ou não.

Locastro e Angelis (2016) analisaram que o lodo proveniente de ETC's poderia ser utilizado em camadas de cobertura de aterros depois da realização de um processo de compactação do resíduo.

Bizarreta-Ortega e Campos (2011) realizaram a caracterização geotécnica e químico-mineralógica de lodo de ETC coletado da lagoa de armazenamento do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Os autores observaram pouco risco de formação de trincas no processo de secagem do lodo de ETC, sendo isso considerado positivo quando se analisa a aplicação do material em camadas de cobertura final de aterros por evitar a passagem de gases como metano e, dessa forma, acaba por melhorando o aproveitamento do gás.

Em relação à aplicação de lodo de ETA e de ETE, Castilhos Junior, Prim e Pimentel (2012) realizaram caracterizações físico-químicas dos dois tipos de lodo que foram coletados nas estações de Jurerê Internacional, na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. Os autores também realizaram a caracterização de misturas dos lodos com cal virgem, para estabilização química, e solo argiloso. Eles chegaram à conclusão de que, apesar dos lodos de ETA e de ETE não apresentarem qualidade para serem utilizados diretamente como material de cobertura, suas misturas com solo e cal atenderam os requisitos geotécnicos para serem aplicados em camadas de coberturas de aterros sanitários.

O trabalho de Mazzutti, Klamt e Faro (2023) indicou que, para o lodo da estação de tratamento de água da cidade de Frederico Westphalen - RS, as mistura de solo e lodo de ETA estudadas poderiam ser aplicadas como camadas de construção de aterros sanitários. Destaca-se a mistura de 30% de adição de lodo que foi definida como a melhor para aplicação em camadas de base e de cobertura. As amostras da mistura atingiram o coeficiente de permeabilidade necessário para ser aplicado em aterros e apresentaram a maior resistência à compressão simples dentro de todas as amostras.

Knierim, Delongui e Barbosa Pinheiro (2023) realizaram uma análise de viabilidade técnica da utilização de misturas solo-lodo de ETA de Santa Maria - RS em camadas de aterro sanitário a partir de valores mínimos de coeficiente de permeabilidade estabelecidos por normativas distintas. Os autores chegaram à conclusão de que a mistura de 15% de incorporação de lodo de ETA apresentou melhor desempenho, visto que atendeu os requisitos mais críticos

de permeabilidade, sendo possível a aplicação em camadas de base e de cobertura de aterros sanitários.

Por fim, Scapin (2021) realizou a análise de amostras de solo-lodo de ETA de Santa Maria – RS sob os parâmetros químicos, físicos e biológicos. A autora realizou células experimentais de resíduos sólidos urbanos e, após análise da massa de resíduo no interior das células e o lixiviado gerado, pode-se concluir que o lodo não auxiliou no aumento de parâmetros nocivos ambientalmente. Scapin (2021) concluiu que o resíduo poderia ser utilizado como camada de base e camada de cobertura em aterros sanitários com 15% de lodo nas camadas.

2.3 SISTEMA SOLO-LODO-GEOSSINTÉTICO

São considerados escassos os trabalhos que englobam o estudo do comportamento e aplicações de misturas de solo, lodo de ETA e geossintéticos. Por esse motivo, obteve-se como objetivo deste item destacar os trabalhos encontrados na literatura que tiveram como objetos de estudo o lodo, associado ou não ao solo, e o geossintético.

Aydilek e Edil (2002) utilizaram geotêxtil do tipo tecido para a elaboração de um sistema de filtração para projetos de cobertura de sedimentos contaminados, o que incluiria o lodo de diversas origens. Os autores consideraram que o desempenho da filtração seria um fator determinante para o funcionamento a longo prazo da cobertura e, a partir dos ensaios, obtiveram resultados positivos, demonstrando que o lodo poderia ser filtrado utilizando o geossintético.

Ainda na função de filtração, mas com outro foco, Avancini, Muller e Vidal (2021), Oliveira e Vidal (2020), Souza (2016) e Ardila *et al.* (2020) definiram o lodo de ETA ou de ETE como o principal objeto de estudo. Os autores tiveram como objetivo entender os fatores que influenciavam na filtração e no desaguamento do lodo. Para isso, cada autor aplicou tipos e dosagens diferentes de condicionantes químicos em sistemas de desaguamento em geotêxtil, como uma alternativa aos métodos mecânicos convencionais de diminuição do teor de umidade.

Os estudos utilizando o geotêxtil para formação de um sistema de desaguamento demonstram a adequação dos grãos que compõem a granulometria do lodo em relação ao tamanho dos poros do geotêxtil. Os geotêxtis analisados apresentaram capacidade de retenção das partículas, indicando uma boa interação entre o lodo e o geossintético.

Em relação ao desempenho de geossintéticos diante à exposição aos possíveis metais presentes na composição do lodo, Lake *et al.* (2007) realizaram ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade com amostras de GCL (geocomposto bentonítico) contaminadas por solução de sulfato de alumínio. Lake *et al.* (2007) observaram que o GCL poderia fornecer

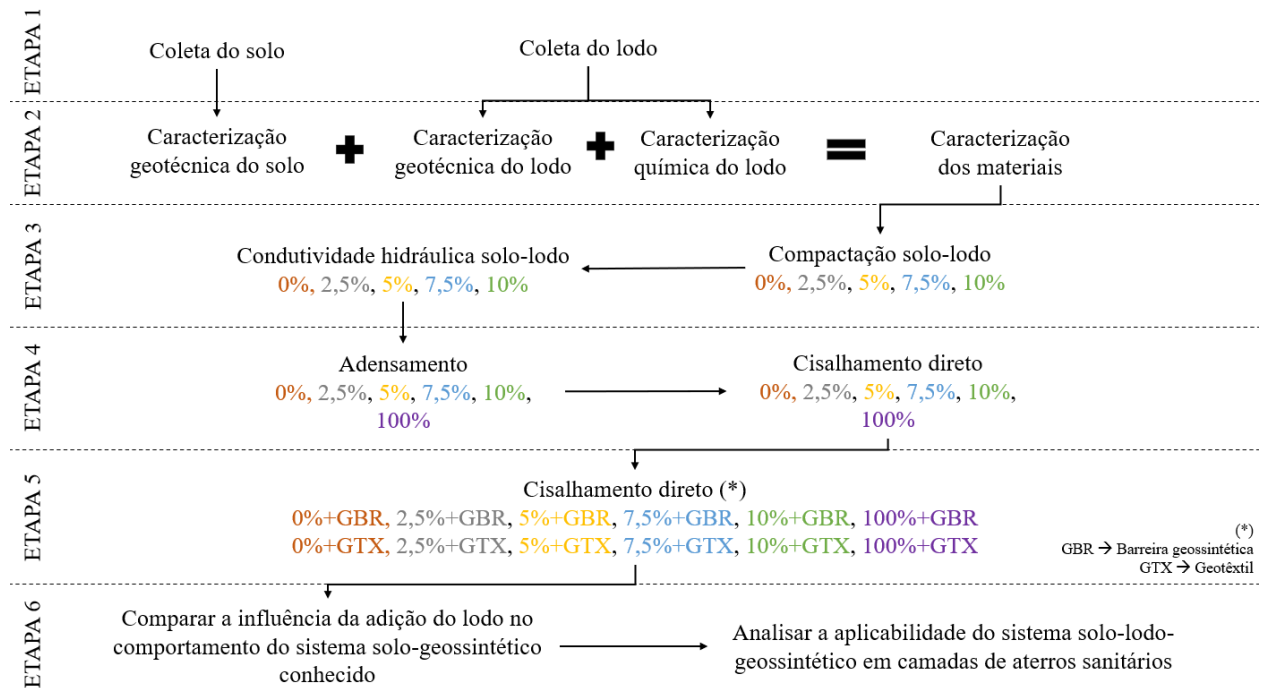
proteção adequada ao solo abaixo da camada de base contra a migração do alumínio, visto que os valores de coeficiente de permeabilidade encontrados foram de aproximadamente $5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$.

De forma geral, a partir do levantamento dos trabalhos citados no capítulo atual e nos anteriores, pode-se observar o comportamento do lodo de estações de tratamento de água de forma individual e aliado a geossintéticos. A perspectiva de utilização do geotêxtil para desaguamento de amostras de lodo indica a possibilidade de interação entre os materiais. Essa interação pode ser refletida em análises de resistência ao cisalhamento, considerando o efeito fibra que um geotêxtil não tecido pode apresentar quando aliado a materiais minerais, ao contrário do comportamento esperado em barreiras geossintéticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir da Figura 16, observa-se o fluxograma com o planejamento da pesquisa, que foi separado em 6 etapas, iniciando com a coleta dos materiais do estudo até o tratamento dos dados e a análise da influência da adição do lodo no comportamento conhecido de amostras solo-geossintético.

Figura 16 – Fluxograma da pesquisa

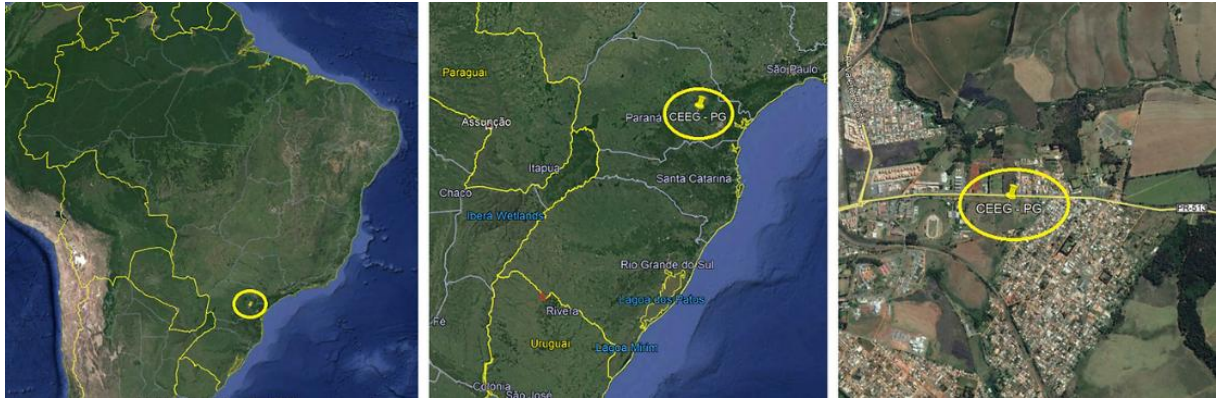


Fonte: A autora, 2023.

3.1 ETAPA 1 - COLETA DAS AMOSTRAS

As amostras deformadas de solo estudadas foram coletadas de forma manual, a aproximadamente 3 metros da superfície, no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG), localizado no Campus Uvaranas da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), como observado na Figura 17.

Figura 17 – Localização do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa – CEEG-PG



Fonte: CEEG-PG, 2024.

De acordo com Bloinski *et al.* (2020), o solo do Campo Experimental é caracterizado como silte de baixa plasticidade pelo Sistema Unificado de Caracterização dos Solos (SUCS). Contudo, mesmo havendo os dados de caracterização do material, considerou-se relevante a realização de ensaios específicos para atestar as características das novas amostras de solo que foram coletadas, como análise granulométrica e peso específico real dos grãos.

O lodo utilizado foi coletado de forma manual na saída da centrífuga e as amostras foram armazenadas hermeticamente em 3 recipientes de plástico com capacidade de 60 kg cada. As amostras coletadas são provenientes da Estação de Tratamento de Água da Represa do Iraí, localizada em Pinhais, região metropolitana de Curitiba.

A Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) é a responsável pela captação, tratamento e abastecimento de água no estado e, além do tratamento da água, a empresa também é responsável pela coleta e tratamento de esgoto e da destinação dos resíduos sólidos gerados nas unidades de tratamentos.

A partir da Figura 18 pode-se observar o estado inicial do lodo coletado da etapa de floto filtração, no local de disposição na ETA após processo prévio de centrifugação ao final do tratamento da água.

Figura 18 – Coleta do lodo da ETA de Iraí



Fonte: Fiedler, 2023.

3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS AMOSTRAS

Sendo necessário conhecer o comportamento geotécnico individual do solo e do lodo, ocorreu a caracterização de ambos individualmente. Entretanto, em relação às amostras de solo, os resultados da análise granulométrica bem como os valores de limite de liquidez e limite de plasticidade foram adquiridos a partir da pesquisa de Anibele *et al.* (2020), que caracterizou o mesmo solo utilizado neste trabalho. Destaca-se, como foi citado anteriormente no item 3.1, que foram repetidos os ensaios para determinar o peso específico real dos grãos e a curva granulométrica, dessa vez a partir do Analisador de Tamanho de Partículas do Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Todas as amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016). Realizaram-se os ensaios de teor de umidade descrito pela NBR 6457 (ABNT, 2016), análise granulométrica detalhada pela NBR 7181 (ABNT, 2018), massa específica real dos grãos relatada pela DNER-ME 093 (DNER, 1994), limite de liquidez e limite de plasticidade especificados pelas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

Após realizada a caracterização das amostras de lodo, foram realizados os ensaios de determinação da massa específica real dos grãos e dos limites de liquidez e de plasticidade nas misturas solo-lodo.

Para o desenvolvimento desse trabalho, determinou-se que as porcentagens de incorporação de lodo em amostras de solo seriam denominadas como solo-lodo 2,5%, solo-lodo 5%, solo-lodo 7,5% e solo-lodo 10%. Essas porcentagens significam que em uma certa quantidade de massa seca da amostra, 97,5% seriam equivalentes à parcela de solo e 2,5% equivaleriam à parcela de lodo, por exemplo. Fiedler (2023) apresentou resultados iniciais de amostras solo-lodo 2,5% e solo-lodo 5% com o lodo da Estação de Tratamento de Água de Iraí. As proporções foram definidas considerando o objetivo de analisar o comportamento do solo com incorporações menores de lodo, já que foi observado em literatura a ocorrência de trabalhos semelhantes que utilizam proporções de 15% a 100%, como visto por Montalvan (2016), Silva (2021) e Gonçalves *et al.* (2017).

3.3 ETAPA 2 - ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS

As análises química e mineralógica das amostras ocorreram paralelamente com a caracterização geotécnica. Em relação à análise química, foi realizado o ensaio para determinar o teor de matéria orgânica (NBR 13600/2022) das amostras de lodo.

Em relação à análise mineralógica das amostras, realizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV-FEG) com Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) nas amostras de solo, lodo e solo-lodo. Os ensaios MEV-FEG foram realizados no Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) onde as amostras foram submetidas à secagem prévia em estufa à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e passaram por recobrimento metálico.

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS E HIDRÁULICOS

3.4.1 Preparação das Amostras

A preparação das amostras para todos os ensaios levou em consideração a incorporação de lodo *in natura* nas amostras solo-lodo, assim como também foi trabalhado por Fiedler (2023). A autora atestou a possibilidade de utilizar o material sem tratamento prévio, além daquele executado na ETA, já que permitiria a economia de recursos naturais e conferiria valor ao rejeito.

Para a realização de cada um dos ensaios de compactação e de condutividade hidráulica foi preparada uma amostra de cada mistura de solo-lodo em diferentes porcentagens (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%). Ambos os ensaios iniciaram com amostras de solo – ou seja, 0% de lodo presente na amostra – e seguiram incorporando o resíduo até atingir 10% de substituição de solo por lodo de ETA na mistura.

Para o ensaio de adensamento ocorreu a preparação de uma amostra para cada uma das misturas solo-lodo (0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 100%). Para o ensaio de cisalhamento direto foram preparadas quatro amostras para cada uma das misturas solo-lodo (0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 100%), visto que, para esse tipo de ensaio, cada uma das amostras foi submetida a uma tensão vertical diferente.

Após essa etapa ocorreram duas novas remessas de amostras com as mesmas porcentagens de lodo, porém com a adição dos dois tipos geossintéticos para a execução do ensaio de cisalhamento direto.

A quantidade total de amostras para todos os ensaios pode ser observada na Tabela 6. Foi pressuposto que com as duas frentes de análise, com e sem a presença do geossintético, seria possível observar a interferência nos parâmetros de resistência das misturas solo-lodo.

Tabela 6 – Total de amostras para os ensaios de compactação, condutividade hidráulica, adensamento e cisalhamento direto

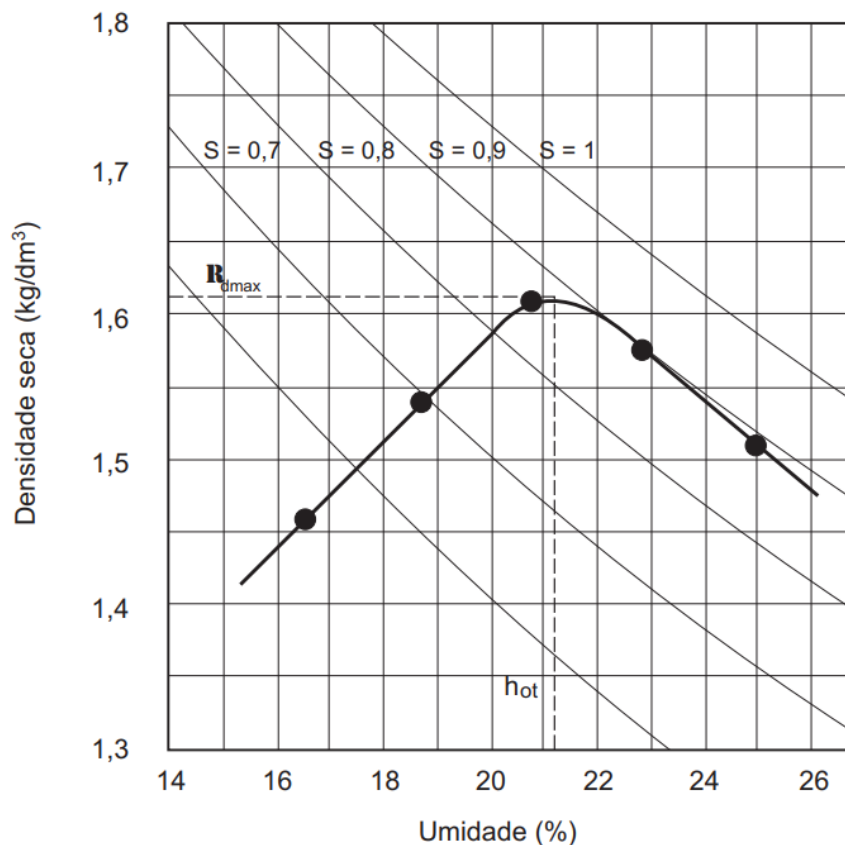
MISTURAS			ENSAIOS			
SOLO	LODO	GEOSSINTÉTICO	Compactação	Condutividade Hidráulica	Adensamento	Cisalhamento Direto
100,0%	0,0%	NÃO	1	1	1	3
97,5%	2,5%	NÃO	1	1	1	3
95,0%	5,0%	NÃO	1	1	1	3
92,5%	7,5%	NÃO	1	1	1	3
90,0%	10,0%	NÃO	1	1	1	3
0,0%	100,0%	NÃO	0	0	1	3
100,0%	0,0%	SIM	0	0	0	8
97,5%	2,5%	SIM	0	0	0	8
95,0%	5,0%	SIM	0	0	0	8
92,5%	7,5%	SIM	0	0	0	8
90,0%	10,0%	SIM	0	0	0	8
0,0%	100,0%	SIM	0	0	0	8
SUBTOTAL			5	5	6	66
TOTAL			82			

Fonte: A autora, 2023.

3.4.2 Etapa 3 - Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação seguiu as recomendações da norma NBR 7182 (ABNT, 2016) partindo da preparação das amostras descrita anteriormente no item 3.4.1. Foram realizados no mínimo cinco teores de umidade diferente para se obter cinco pontos na curva de compactação de cada uma das amostras com diferentes teores de lodo, como representa na Figura 19.

Figura 19 – Exemplo de curva de compactação



Fonte: Pinto, 2006.

Após delinear a curva de compactação das amostras, obtiveram-se os valores de peso específico aparente seco máximo (γ_d) e o ponto de umidade ótima ($h_{ótima}$). Com essas informações foi possível dar continuidade na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de condutividade hidráulica, adensamento, cisalhamento direto e compressão simples, nas condições ótimas de compactação em cada caso.

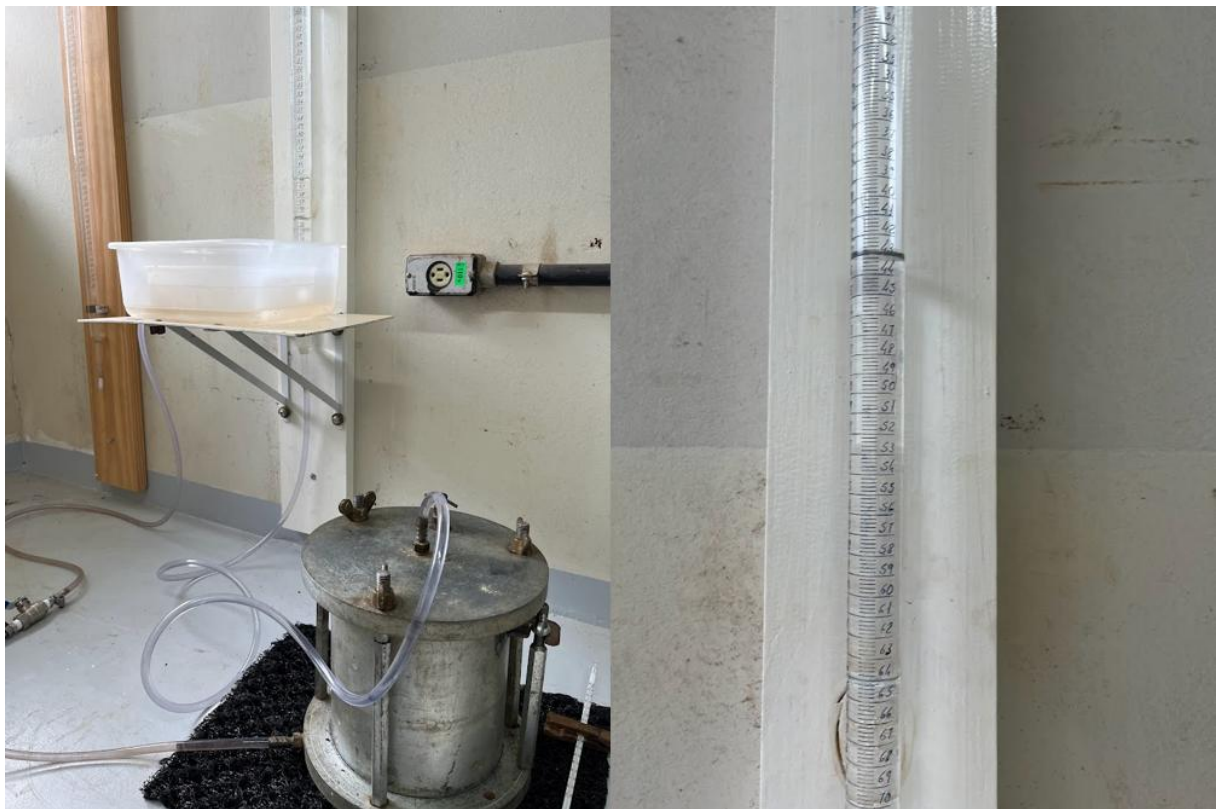
3.4.3 Etapa 3 - Ensaio de Condutividade Hidráulica

Seguindo as recomendações da norma NBR 14545 (ABNT, 2001), o ensaio de condutividade hidráulica ocorreu partindo da preparação das amostras descrita no item 3.4.1

em relação às porcentagens utilizadas. A compactação para a preparação da amostra foi realizada a partir de energia Proctor norma de forma que fosse possível atingir o valor de peso específico aparente seco máximo (γ_d) de cada uma das dosagens. Dessa forma, foi possível realizar a comparação entre os valores de condutividade hidráulica de todas as amostras, considerando que todas estavam em sua capacidade máxima de compactação.

O ensaio transcorreu em um permeâmetro de parede rígida com carga variável, tal como descrito na NBR 14545 (ABNT, 2001), e o equipamento utilizado pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Permeâmetro de parede rígida



Fonte: A autora, 2023.

Cada um dos ensaios realizados para as amostras possuiu cinco repetições cujos resultados obtidos foram utilizados para realizar a média do coeficiente de condutividade hidráulica (k). Para se atingir os resultados de k , foi utilizada a Equação 1, derivada da Lei de Darcy.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h} \quad \text{Equação 1}$$

Q é a vazão do fluxo de água através do solo (m^3/s);

A é a área do corpo de prova submetido ao ensaio (m^2);

Δh é a diferença de carga hidráulica entre dois pontos, ou seja, a altura da coluna de água (m);

L é o comprimento da amostra (m)

3.4.4 Etapa 4 - Ensaio de Compressão Confinada

Após os ensaios de compactação e definição da condutividade hidráulica, os geossintéticos foram selecionados e ocorreu o ensaio de adensamento nas amostras preparadas e descritas no item 3.4.1. A compactação para a preparação da amostra ocorreu assim como descrito no item 3.4.2.

Os ensaios foram realizados seguindo as recomendações da NBR 16853 (ABNT, 2020) em um equipamento mecanizado MS102 – CISALHAMENTO AUTOMÁTICO da empresa Owntec. O equipamento, mostrado na Figura 21, realiza tanto os ensaios de adensamento e cisalhamento direto. Essa dualidade possibilita a aplicação de diferentes condições para estudo do comportamento dos materiais (OWNTEC, 2023).

Figura 21 – MS102 – CISALHAMENTO AUTOMÁTICO



Fonte: A autora, 2024.

Cada ensaio de adensamento possuiu duas etapas de pré-carregamento, seis etapas de carregamento e três etapas de descarregamento. As tensões aplicadas em cada estágio estão apresentadas na Tabela 7, seguindo as recomendações indicadas no Manual v1.2 do fabricante do equipamento.

Tabela 7 – Cargas aplicadas nos estágios do ensaio de adensamentos

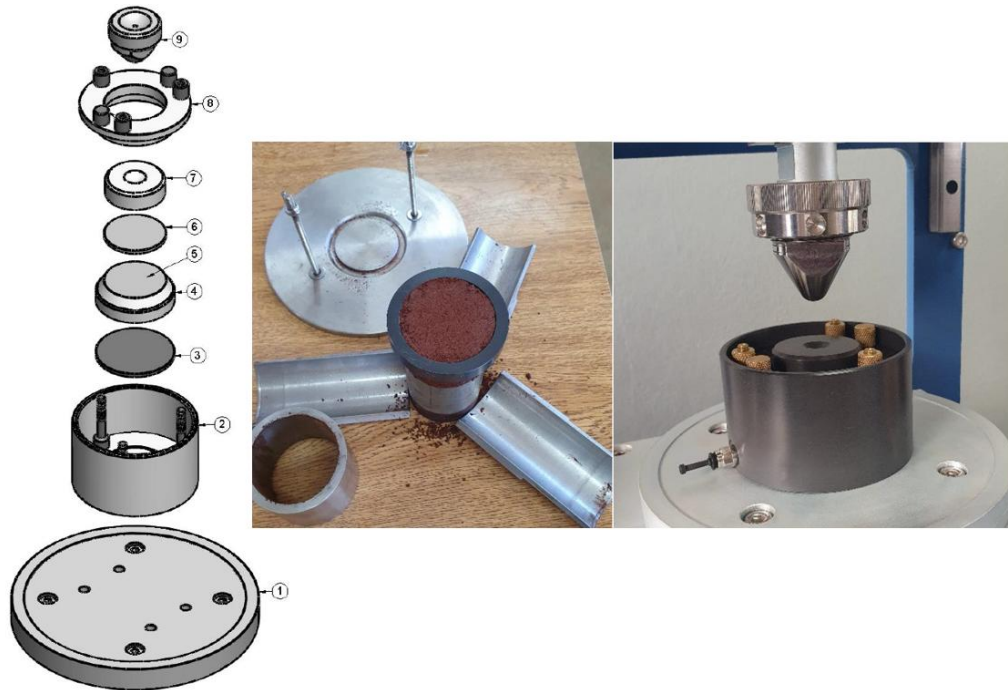
Etapas	Estágio	Carga aplicada (kPa)
Pré-carregamento	1º	2
	2º	5
Carregamento	1º	12
	2º	25
	3º	50
	4º	100
	5º	200
	6º	400
Descarregamento	1º	200
	2º	50
	3º	12

Fonte: A autora, 2023.

Para a execução do ensaio, foram atendidas as estabilizações de deslocamento entre incrementos de carregamento. O critério de tempo de aquisição foi definido de modo que o intervalo de tempo entre cada aquisição possua raiz quadrada exata, como indicado pela norma ASTM D 2435M-11 (ASTM, 2011).

As amostras foram preparadas dentro de um molde circular de 50,5 mm de diâmetro com 20 mm de altura com controle de massa para atingir os valores de peso específico aparente seco máximo de cada amostra. O molde é incorporado à célula de adensamento e o conjunto é posicionada no centro da base. A amostra é colocada em estado de saturação para a execução do ensaio. A partir da Figura 22 pode-se observar a disposição dos componentes da célula onde será montada a amostra.

Figura 22 – Disposição da célula de adensamento



Fonte: Owntec, 2023; Fiedler (2023).

Para os cálculos dos coeficientes de compressão (C_c), referente à compressão do solo sob carga em uma fase de adensamento primário, e recompressão (C_r), referente à deformabilidade do solo quando ele é recarregado após ter sido descarregado, utilizou-se a Equação 2 para ambos os cálculos.

$$C_c, C_r = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} \quad \text{Equação 2}$$

e_1 e e_2 são os índices de vazios correspondentes a dois pontos quaisquer das retas de recompressão ou virgem;

p_1 e p_2 são as pressões associadas aos índices de vazios e_1 e e_2 .

3.4.5 Etapas 4 e 5 - Ensaio de Cisalhamento Direto

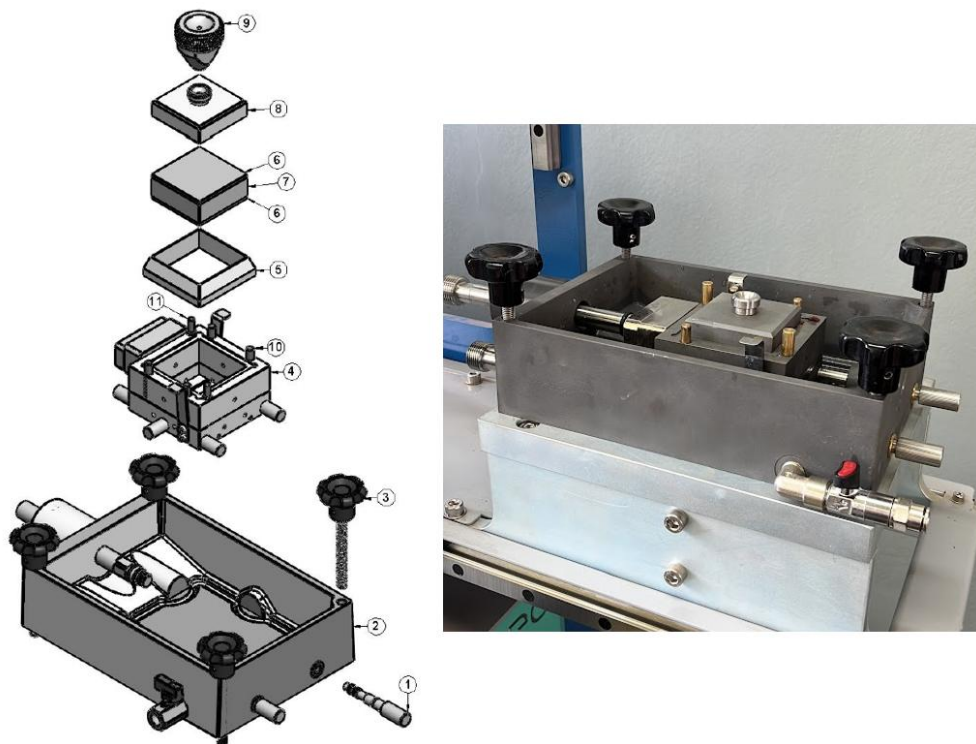
A conclusão do ensaio de adensamento possibilitou a realização dos ensaios de cisalhamento direto nas amostras preparadas e descritas no item 3.4.1 com a compactação para a preparação descrita no item 3.4.3. O ensaio ocorreu como recomendado pela D3080M (ASTM, 2014) no mesmo equipamento citado no item 3.4.4.

O ensaio de cisalhamento direto ocorreu em três etapas para cada um dos tipos de misturas solo-lodo, sendo que cada etapa foi aplicada uma tensão de pré-adensamento diferente. Portanto, para cada combinação de dosagem foram ensaiadas três amostras iguais, sendo aplicadas, em cada uma delas, três diferentes tensões verticais: 50 kPa, 200 kPa e 350 kPa. O

ensaio ocorreu dessa forma para que se pudesse observar os valores de tensão cisalhante e deformação cisalhante, calculados a partir da área corrigida, e obtidos pela MS 102 – CISALHAMENTO AUTOMÁTICO da Owntec. Com isso, seria possível estimar a envoltória de ruptura de cada uma das misturas, a partir da qual se pode obter o intercepto coesivo e o ângulo de atrito.

Os ensaios aconteceram em uma célula de cisalhamento quadrada com um molde do corpo de prova 60 mm de lado com 20 mm de altura. Na Figura 23 observa-se a montagem da célula de cisalhamento, bem como a configuração final do conjunto para iniciar as etapas do ensaio.

Figura 23 – Disposição da célula de cisalhamento



Fonte: Owntec, 2023; A autora, 2023.

Em relação aos ensaios de cisalhamento com as amostras de geossintético, foi realizado inicialmente os ensaios com as amostras de geotêxtil do tipo não tecido de poliéster com abertura aparente O95 de 0,102 mm. As amostras de barreira geossintética utilizadas possuíram espessura de 0,8 mm, compostas de PEAD e textura lisa. Ambos os tipos de geossintéticos foram cortados de forma que possuissem as dimensões internas do molde do corpo de prova. Dessa forma poderia garantir a correta aplicação do geossintético dentro do molde e que a interface entre a mistura e o geossintético se encontrasse no plano de ruptura da amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS

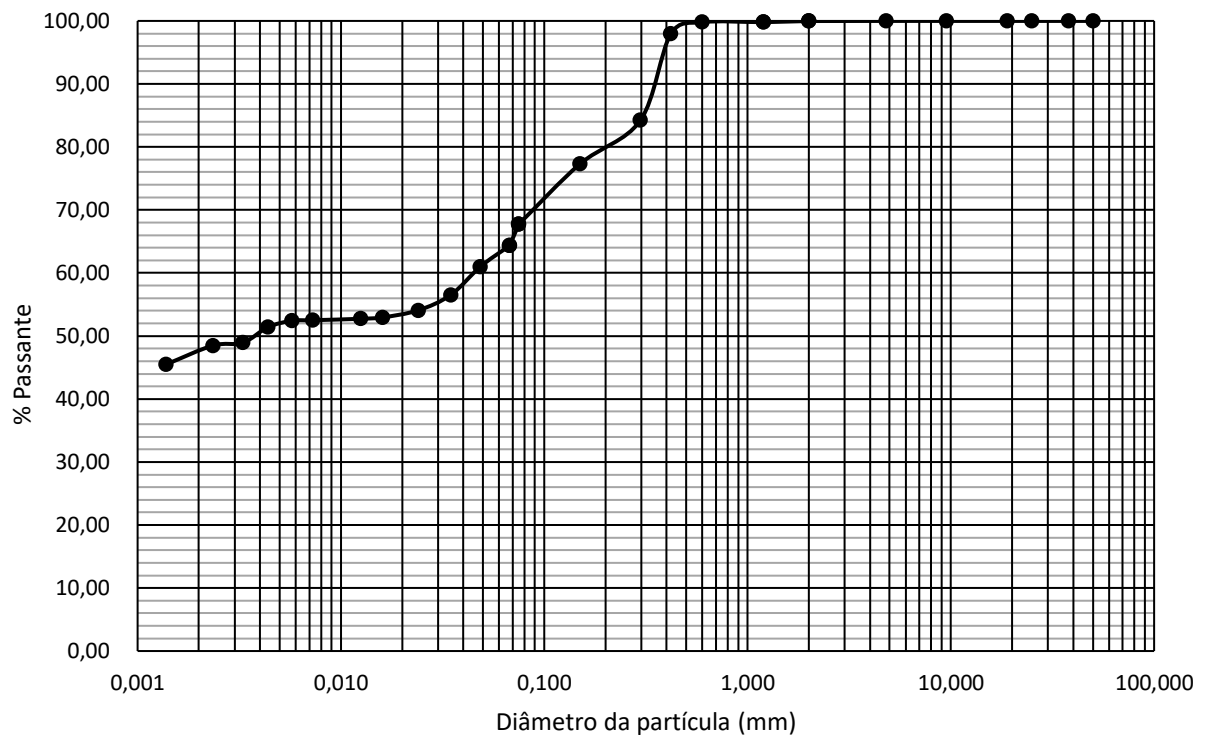
A caracterização do solo residual utilizado pode ser observada na Tabela 8 e na Figura 24. De acordo com Anibele *et al.* (2020), o solo do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos (CEEG-PG) se enquadra como uma argila areno-siltosa, a partir da Classificação Unificada de Classificação dos Solos (SUCS), de comportamento laterítico que seria típico de regiões tropicais.

Tabela 8 – Caracterização geotécnica do solo do CEEG-PG

Material	Densidade real dos grãos (gf/cm ³)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade
Solo do CEEG-PG	2,669	37	-	NP

Fonte: Anibele *et al.*, 2020.

Figura 24 – Análise granulométrica do solo do CEEG-PG



Fonte: Anibele *et al.*, 2020.

Em relação à caracterização geotécnica do lodo, os ensaios iniciaram com o preceito de que o lodo de ETA é considerado como um material formado por água e sólidos suspensos provenientes do tratamento de água bruta. Dessa forma, houve a suposição inicial de que as amostras possuiriam alguma porcentagem de matéria orgânica em sua composição. Nesse contexto iniciaram-se os ensaios realizando a determinação do teor de umidade a partir da

secagem de amostras em estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ e a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ com o objetivo de comparação. Os resultados foram publicados por Almeida *et al.* (2023) e podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Teores de umidade do lodo de ETA em secagens distintas

Temperatura de secagem em estufa	Teor de Umidade (%)
$60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$	382,491
$105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$	416,148

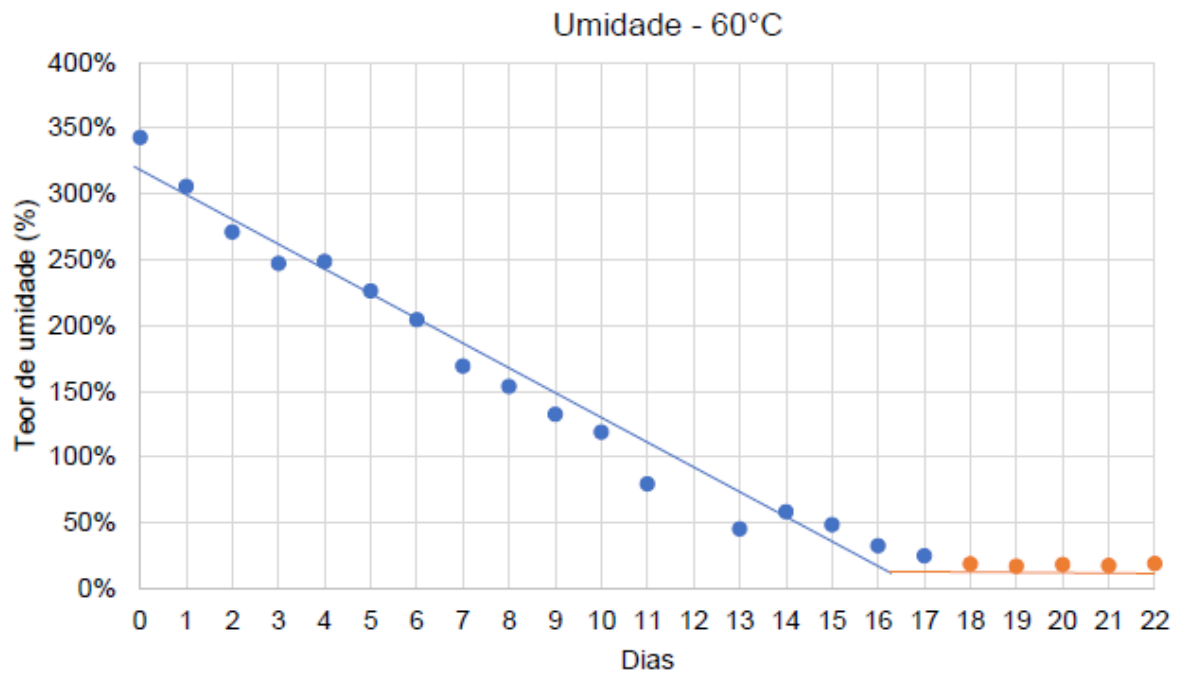
Fonte: Almeida *et al.*, 2023.

A partir da análise desses resultados, pode-se observar que ocorreu variação entre os teores das duas secagens. Esse fato demonstrou que existe um certo teor de matéria orgânica sendo volatilizada em maiores temperaturas.

Considerando que esse trabalho objetivou a utilização do lodo *in natura*, ou seja, da forma como foi coletado diretamente da estação de tratamento de água para evitar processos que onerassem o reuso do lodo, adotou-se como teor de umidade o valor referente à secagem de $60 \pm 5^\circ\text{C}$. De acordo com a NBR 6457 (ABNT 2016), essa temperatura de secagem é aplicável a solos com a presença de matéria orgânica.

Posteriormente, para moldagem dos corpos de prova dos ensaios subsequentes, foi realizada novamente a determinação do teor de umidade na secagem em estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ e constatou que, apesar da armazenagem correta do resíduo, ocorreu uma perda de umidade e o novo valor de teor de umidade das amostras utilizado para fins de cálculo seria 342,87%.

Outra questão em relação ao teor de umidade é a estabilização de massa no processo de secagem. Fiedler (2023) realizou a curva de teor umidade do lodo, que pode ser observada no Gráfico 1, e observou que o lodo apresentou duas fases de secagem distintas, indicando a alta capacidade de retração de umidade que o resíduo possui. A autora também constatou que essa dificuldade de extrair a água intrínseca pode ser causada pela presença de matéria orgânica ou ao coagulante utilizado no tratamento na estação de ETA.

Gráfico 1 – Curva de teor de umidade do lodo da ETA Iraí (secagem à $60 \pm 5^\circ\text{C}$)

Fonte: Fiedler, 2023.

Os resultados do ensaio para determinar o peso específico real dos grãos (γ_s) de lodo podem ser observados na Tabela 10. Para esse ensaio foram realizadas as determinações do γ_s para duas temperaturas de secagem, $60 \pm 5^\circ\text{C}$ e $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Assim como observado por Montalvan (2016), verificam-se os valores reduzidos do peso específico do lodo quando comparados com valores usuais de solo ($2,60$ a $2,70 \text{ gf/cm}^3$). Outro ponto a ser destacado é que a temperatura de secagem influenciou nos resultados de γ_s , podendo indicar a presença de uma maior quantidade de matéria orgânica que é possível de ser volatilizada quando submetida a maiores temperaturas.

Tabela 10 – Peso específico real dos grãos – Lodo de ETA

Temperatura de secagem na estufa	Peso específico real dos grãos (γ_s) (gf/cm^3)
$60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$	2,051
$105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$	2,110

Fonte: Fiedler, 2023 e Almeida *et al.*, 2023.

Em seguida foi realizado o ensaio para determinar o teor de matéria orgânica das amostras de lodo. As amostras foram preparadas passando por secagem em estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ até a estabilização do teor de umidade. Após a preparação, as amostras foram submetidas à temperatura de 700°C em um forno MUFLA por 2 horas.

Dessa forma, assim como demonstrado por Fiedler (2023), obteve-se o resultado de que 51,72% do material sólido se enquadrrou como matéria orgânica. Esse resultado corrobora

a suposição inicial de presença de matéria orgânica e se relaciona com os resultados de peso específico real dos grãos (γ_s) das amostras de lodo. De acordo com O’Kelly (2016), ocorre uma relação inversa entre o teor de matéria orgânica e o γ_s , ou seja, um alto teor de matéria orgânica tenderá a diminuir o valor de γ_s .

Os ensaios para determinar os limites de liquidez e de plasticidade foram realizados com o lodo *in natura* e com o lodo seco e os resultados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 – Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade das amostras

Amostra	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
Lodo <i>in natura</i>	487	392	95
Lodo seco	100	-	-

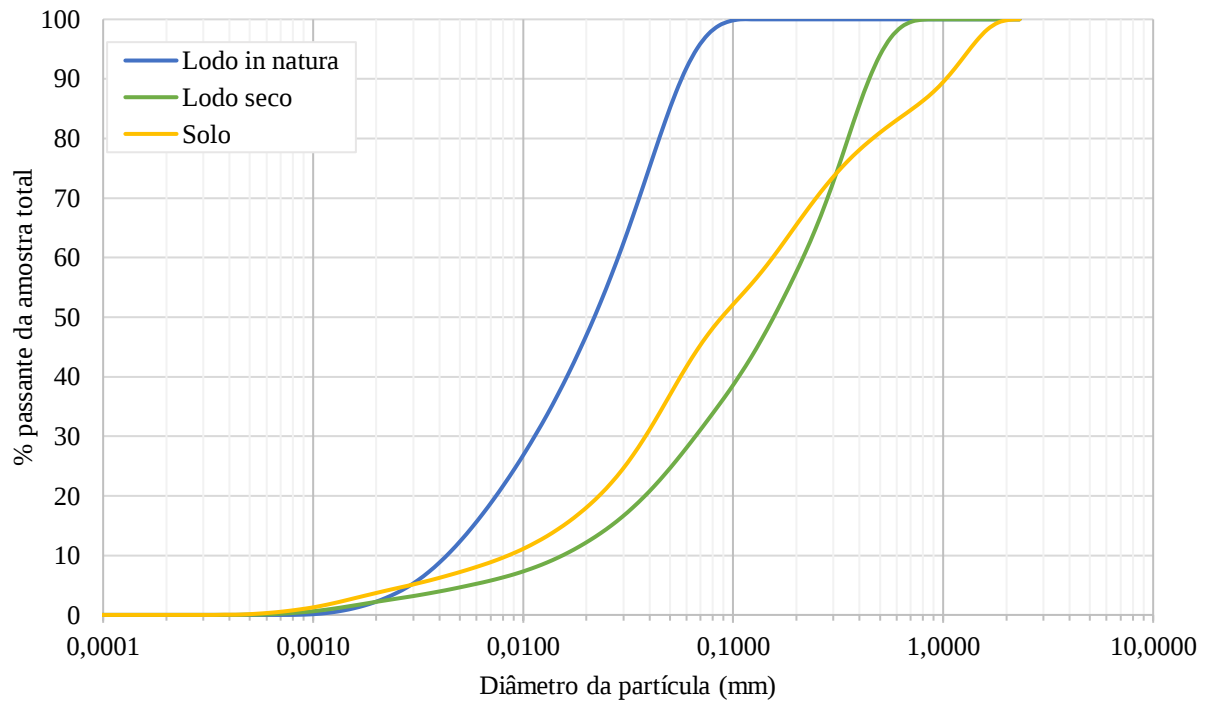
Fonte: Fiedler, 2023 e Almeida *et al.*, 2023.

A partir da análise dos resultados dos limites de consistência, observa-se que o lodo *in natura* pode ser considerado altamente plástico, condizente com os resultados encontrados por Scapin (2021). O lodo seco apresentou uma diferença de comportamento, sendo possível ser classificado como não plástico. Conforme levantado por Scapin (2021), as propriedades plásticas do lodo são correlacionadas com o teor de umidade natural, a forma das partículas, da granulometria e da composição química. Então, se o lodo é submetido à secagem, acaba perdendo suas características plásticas, mesmo com adições de água destilada durante o ensaio, sinalizando possíveis alterações estruturais devidas ao processo de secagem prévia.

Quanto à granulometria das amostras de lodo de ETA, destaca-se que o ensaio de análise granulométrica da amostra de lodo foi influenciado pela presença de componentes aglomerantes — como o sulfato de alumínio — provenientes das etapas de tratamento de água bruta da estação. A interação entre o aglomerante e o defloculante comumente utilizado na etapa de sedimentação da análise granulométrica impossibilitou a análise conforme recomendação da norma para granulometria em solos. Tentativas sem o defloculante foram realizadas, porém os resultados foram prejudicados pelo agrupamento das partículas sólidas causados pelo coagulante.

Nesse contexto, a solução encontrada foi realizar a análise a partir da submissão da amostra de lodo em um Analisador de Tamanho de Partículas do modelo Bettersizer 2600 do Complexo de Laboratórios Multiusuário da UEPG (C-LABMU). Foram submetidas três amostras para a análise: lodo *in natura*, lodo seco e solo do CEEG-PG *in natura*, sem a defloculação. A partir do Gráfico 2 pode-se observar as curvas granulométricas de ambas as amostras e elas em comparação com a curva granulométrica do solo.

Gráfico 2 – Curvas granulométricas – Lodo de ETA e Solo do CEEG-PG



Fonte: Adaptado de Fiedler (2023), com dados adicionais deste estudo.

Observou-se uma tendência de deslocamento da curva do lodo seco em relação à curva do lodo *in natura*. Esse direcionamento indica a resposta do lodo à secagem, aglutinando suas partículas e formando grumos fortemente cimentados, como visto por Montalvan (2016). Com essa textura mais granular causada pela cimentação, ocorre o deslocamento da curva e, dessa forma, altera a granulometria do material originário.

Além disso, também se observa a diferença entre o comportamento granulométrico de ambas as amostras de lodo e o solo do CEEG-PG. Como a análise do lodo foi executada em um aparelho analisador de partículas, a quantidade de dados obtidos é consideravelmente mais alta que os dados obtidos para o solo, que foi executado em laboratório por Anibele *et al.* (2020). Analisando as três amostras, pode-se constatar que o lodo seco se apresenta com maior similaridade em relação ao solo do que em relação ao lodo *in natura*, reforçando a transformação em material mais granular pela cimentação da secagem.

A partir do gráfico também podem ser observados o coeficiente de uniformidade (C_U), o diâmetro efetivo (D_{10}) e o coeficiente de curvatura (C_C) das curvas do lodo seco e do lodo *in natura* (ABNT, 1995). A diferença de valores de C_U para ambas as curvas — 7,5 para o lodo *in natura* e 14 para o lodo seco — reforça a desigualdade entre elas, mesmo que os valores de C_C — 1,30 para o lodo *in natura* e 1,34 para o lodo seco — não apontem o mesmo nível de

diferenciação. A partir desses valores e dos diâmetros efetivos — 0,004 mm para o lodo *in natura* e 0,015 mm para o lodo seco — observa-se que o tanto o lodo seco quanto o lodo *in natura* apresentaram a tendência de um solo de uniformidade média.

No contexto geral dos dados apresentados, pode-se determinar que o lodo seco pode ser classificado, a partir do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), como uma areia siltosa graças a sua granulação mais grosseira com porcentagem de finos inferior à 50%. No entanto, o lodo *in natura* se enquadraria geotecnicamente como uma argila orgânica (OH), por consideração de suas características não plásticas após secagem (Roque; Montalvan; Boscov, 2021) e sua elevada porcentagem de matéria orgânica.

Em relação à análise mineralógica, foi realizado o ensaio MEV-FEG com EDS e as composições químicas de cada amostra de lodo submetida ao ensaio podem ser observadas na Tabela 12. As altas porcentagens de alumínio podem ser justificadas pelos produtos químicos utilizados como coagulantes no processo de tratamento da água bruta (sulfato de alumínio). Em relação à quantidade de ferro observada, entende-se como proveniente do tipo de solo da região da reserva de Iraí. Os valores mais elevados de carbono se justificam devido à presença de alto teor de matéria orgânica, como demonstrado pelo ensaio de teor de matéria orgânica.

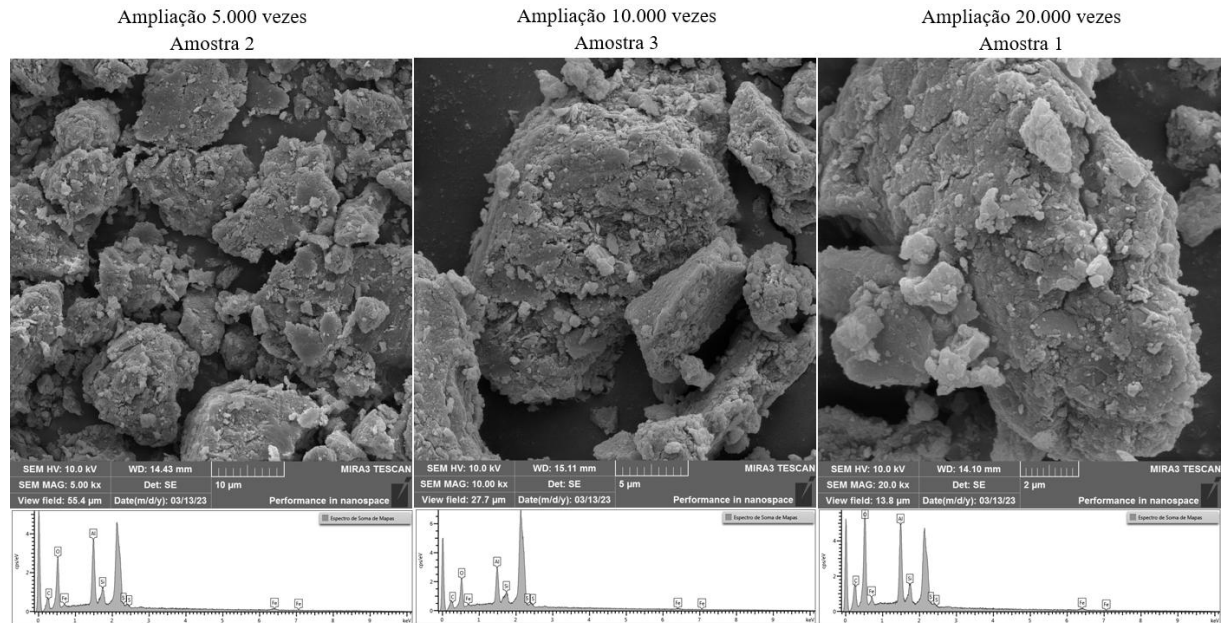
Tabela 12 – Ensaio MEV-FEG: Composição química das amostras de lodo de ETA

Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
C	24,5%	C	20,97%	C	20,67%
O	37,79%	O	31,88%	O	31,12%
Al	18,36%	Al	23,41%	Al	22,83%
Si	5,33%	Si	7,12%	Si	8,02%
S	0,93%	S	1,09%	S	1,26%
Fe	13,09%	Fe	15,54%	Fe	16,1%
Total	100%	Total	100%	Total	100%

Fonte: Fiedler, 2023 e Almeida *et al.*, 2023.

As ampliações de 5.000, 10.000 e 20.000 vezes podem ser observadas na Figura 25, juntamente com suas micrografias. A partir das imagens pode-se constatar que, por causa da tendência de aglutinação dos componentes do lodo, não foi possível visualizar a menor unidade que compõe o lodo de ETA mesmo na maior ampliação (Almeida *et al.*, 2023). Essa aglomeração com fragmentos na faixa coloidal confirma a origem excepcionalmente fina do resíduo.

Figura 25 – Lodo de ETA – Ampliações MEV-FEG



Fonte: Fiedler, 2023 e Almeida *et al.*, 2023.

4.1.1 Propriedades Físicas das Misturas Solo-lodo

As propriedades de peso específico real dos grãos (γ_s) e dos limites de consistência das amostras solo-lodo foram determinados a partir dos ensaios especificados no item 3.2 e podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13 – Peso específico real dos grãos e Limites de Consistência das amostras solo-lodo

Amostra	Peso específico real dos grãos (γ_s) (gf/cm ³)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
Solo-Lodo 2,5%	2,661	36	-	NP
Solo-Lodo 5%	2,656	37	-	NP
Solo-Lodo 7,5%	2,593	35	-	NP
Solo-Lodo 10%	2,566	34	-	NP

Fonte: A autora, 2024.

Observa-se que a maior incorporação do lodo de ETA em diferentes porcentagens influenciou na diminuição do valor final de γ_s e esse comportamento se justifica graças ao próprio valor baixo de γ_s do lodo (2,110 gf/cm³) apresentado na Tabela 10 do item 4.1.

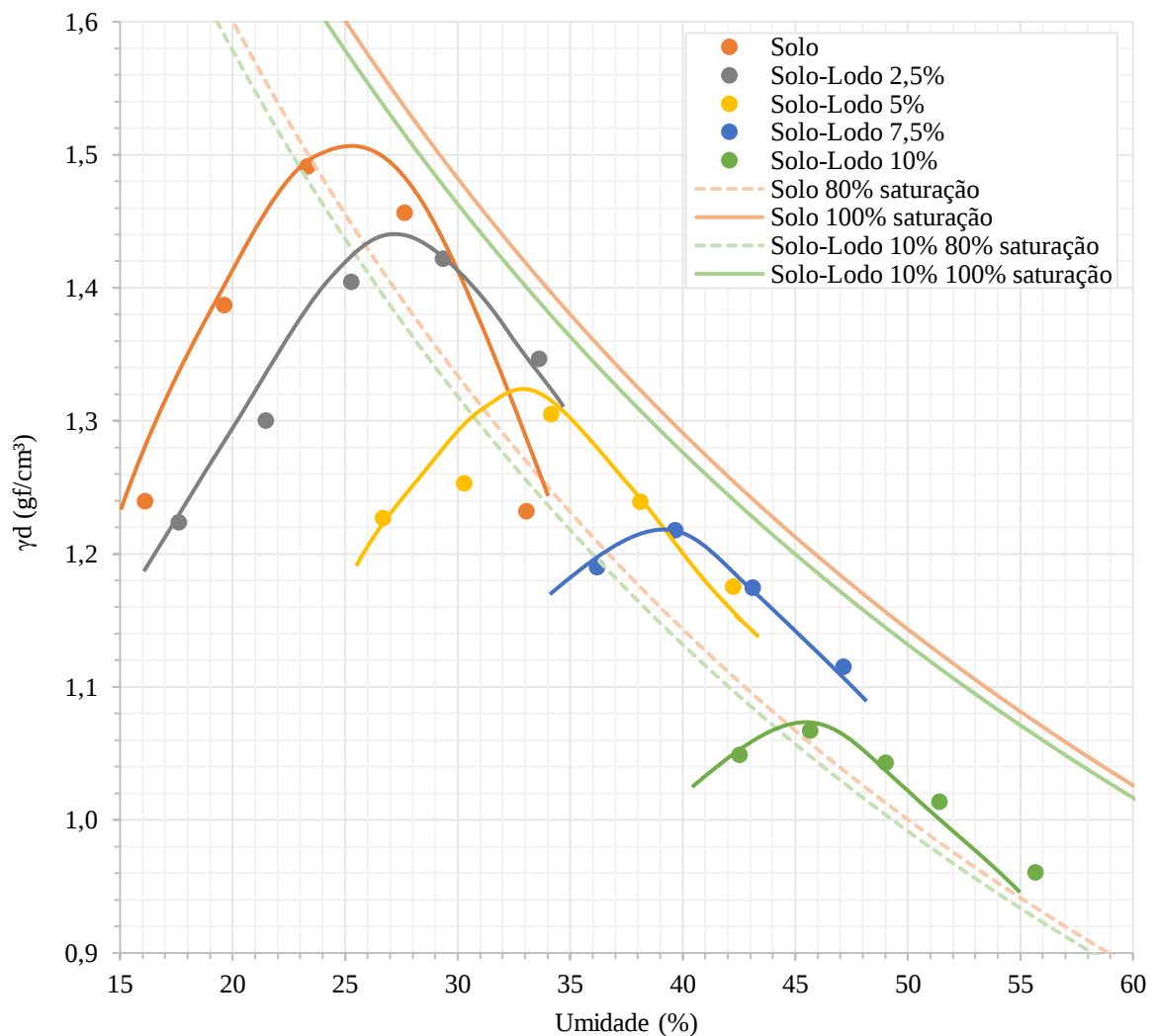
Em relação à análise dos limites de consistência, apesar da alta plasticidade observado no lodo *in natura* (IP = 95%) na Tabela 11 do item 4.1, a baixa porcentagem de incorporação do resíduo não apresentou uma influência considerável a ponto de causar uma alteração no índice de plasticidade das amostras, permanecendo como material Não Plástico (NP) como o solo empregado na matriz.

4.2 ENSAIOS MECÂNICOS E HIDRÁULICOS

4.2.1 Ensaio de Compactação

Após a realização dos ensaios de caracterização das amostras, foram realizados os ensaios para determinar os comportamentos mecânicos e hidráulicos. Foi possível realizar o ensaio de compactação com as amostras de solo e de solo-lodo em diferentes porcentagens (2,5%, 5%, 7,5% e 10%). A partir do Gráfico 3 observam-se as curvas de compactação e as curvas de saturação e podem-se determinar os valores de peso específico aparente seco máximo (γ_D) e umidade ótima ($h_{ótima}$) de cada amostra, apresentados na Tabela 14.

Gráfico 3 – Curvas de compactação das amostras



Fonte: A autora, 2024.

Tabela 14 – Resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima

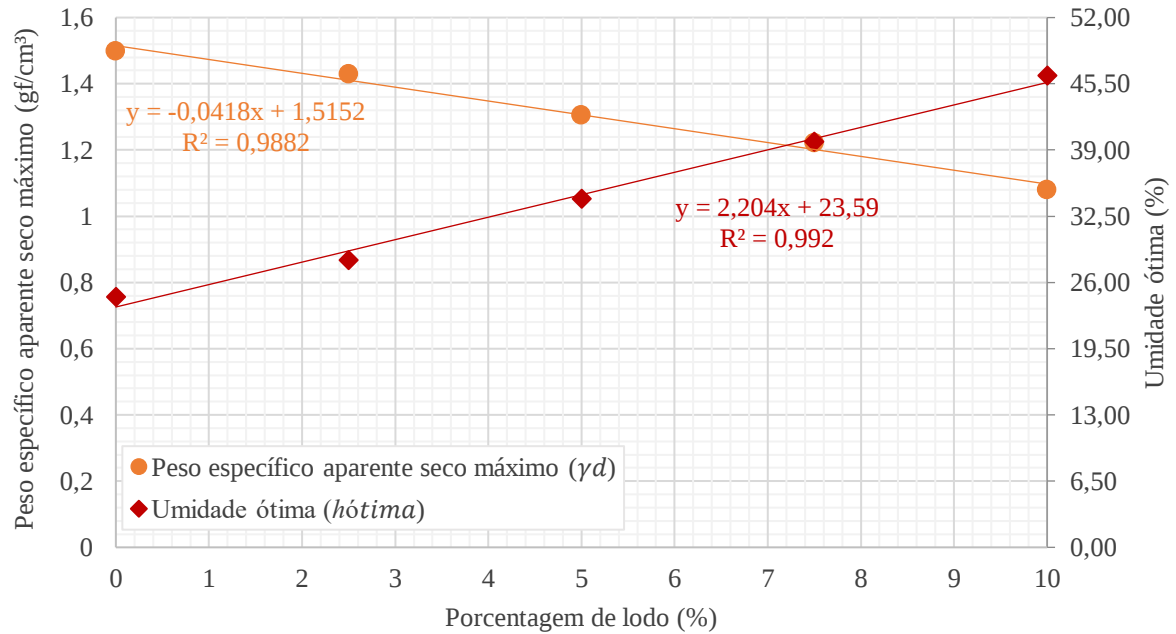
Amostra	Peso específico aparente seco máximo (gf/cm ³)	Umidade ótima (%)
Solo	1,498	24,55
Solo-Lodo 2,5%	1,428	28,20
Solo-Lodo 5%	1,305	34,20
Solo-Lodo 7,5%	1,221	39,80
Solo-Lodo 10%	1,079	46,30

Fonte: Almeida *et al.*, 2024.

Destaca-se que não consta no gráfico a curva de compactação da amostra de lodo, visto que, por causa do seu estado semissólido provocado pelo seu alto teor de umidade *in natura*, não foi possível realizar o ensaio de compactação. Essa dificuldade de trabalhabilidade do lodo afetou a execução do ensaio de compactação para as amostras de solo-lodo conforme aumentou a porcentagem de incorporação do resíduo e esse comportamento havia sido observado por Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021).

Analizando o comportamento das curvas de compactação, os ramos úmidos de todas se apresentaram abaixo da curva de 100% de saturação do solo e da mistura com maior percentual de lodo, bem como acima das curvas de 80% de saturação. Observa-se também uma tendência de deslocamento das curvas conforme aumentou a quantidade de lodo incorporado na mistura. Esse deslocamento ocasionou na diminuição do γ_D e no aumento da $h_{ótima}$, conforme constatado por Montalvan (2016).

Considera-se justificado o aumento da umidade por causa do alto teor de umidade visto nas amostras de lodo *in natura*. Analisa-se a possibilidade de também haver uma influência da fina granulometria do lodo, que é mais expressiva na condição *in natura*, levando a um comportamento mais próximo de solos argilosos. Então, a partir da análise observável no Gráfico 4, espera-se que conforme aumenta-se o teor de lodo na mistura, maior será o decréscimo do γ_D — quando comparado a valores de um solo residual — e maior será o valor de $h_{ótima}$.

Gráfico 4 – Valores de γ_d e $h_{ótima}$ em função da incorporação de lodo de ETA

Fonte: A autora, 2024.

4.2.2 Ensaio de Condutividade Hidráulica

Em relação ao ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida e carga variável, os resultados podem ser observados na Tabela 15. As amostras foram preparadas conforme especificado nos itens 3.4.1 e 3.4.3, ou seja, atingiu-se a compactação máxima de cada uma das amostras para prepará-las no permeâmetro.

Tabela 15 – Propriedades físicas iniciais e valores de condutividade hidráulica

Amostra	Peso específico aparente seco máximo (g/cm³)	Umidade ótima (%)	Índice de vazios	Porosidade (%)	Coefficiente de condutividade hidráulica (m/s)
Solo	1,498	24,55	0,78	44	$8,5 \cdot 10^{-8}$
Solo-Lodo 2,5%	1,428	28,20	0,86	46	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Solo-Lodo 5%	1,305	34,20	1,04	51	$4,9 \cdot 10^{-9}$
Solo-Lodo 7,5%	1,221	39,80	1,18	54	$3,7 \cdot 10^{-9}$
Solo-Lodo 10%	1,079	46,30	1,46	59	$8,6 \cdot 10^{-9}$

Fonte: Almeida *et al.*, 2024.

Pode-se observar que a incorporação do lodo de ETA nas misturas afetou os valores de condutividade hidráulica. Ocorreu uma diminuição dos coeficientes conforme aumentava o teor de lodo na mistura, visto que o lodo *in natura* utilizado pode apresentar alto teor de finos, assim como previsto para um resíduo classificado como argila orgânica (Fiedler, 2023).

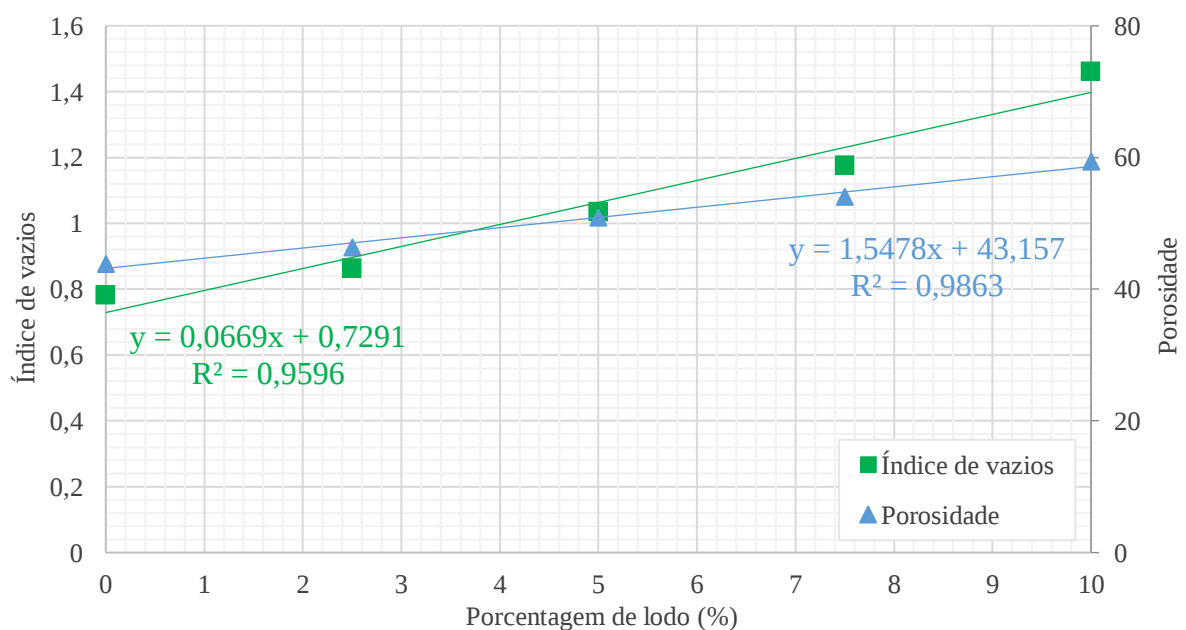
O decréscimo da condutividade hidráulica pode indicar a menor permeabilidade do sistema, o que sugere a possibilidade de aplicação em camadas de aterros sanitários do produto solo-lodo em porcentagens pré-estabelecidas.

A quantidade do lodo de ETA na faixa coloidal, aquela entre 1 nm e 1 μ m, pode ter provocado na redução do tamanho dos poros entre os grãos da mistura, reduzindo os valores de coeficiente de permeabilidade. Dessa forma, as amostras se tornaram menos permeáveis quando comparadas com o solo residual (Ferreira *et al.*, 2011).

Em contradição com o restante das amostras, o coeficiente da amostra solo-lodo 10% apresentou pequeno acréscimo em relação à amostra solo-lodo 7,5%. Apesar disso, o resultado apresentado ainda se encontra na mesma grandeza de 10^{-9} m/s, sendo mantida a boa correlação da aproximação linear com os pontos de estudo.

A partir do Gráfico 5 percebe-se que, conforme aumentava o teor de lodo nas misturas, o índice de vazios e a porosidade aumentavam proporcionalmente. Essa questão pode ser explicada quando se analisa os valores de peso específico aparente seco máximo das amostras com lodo, sendo eles inferiores ao resultado da amostra de solo. Além desse ponto, foram considerados, para preparação das amostras, os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo das curvas de compactação obtidas para as amostras. Essa sequência de fatores resultou em um aumento linear do índice de vazios e também da umidade, por ser uma umidade ótima maior.

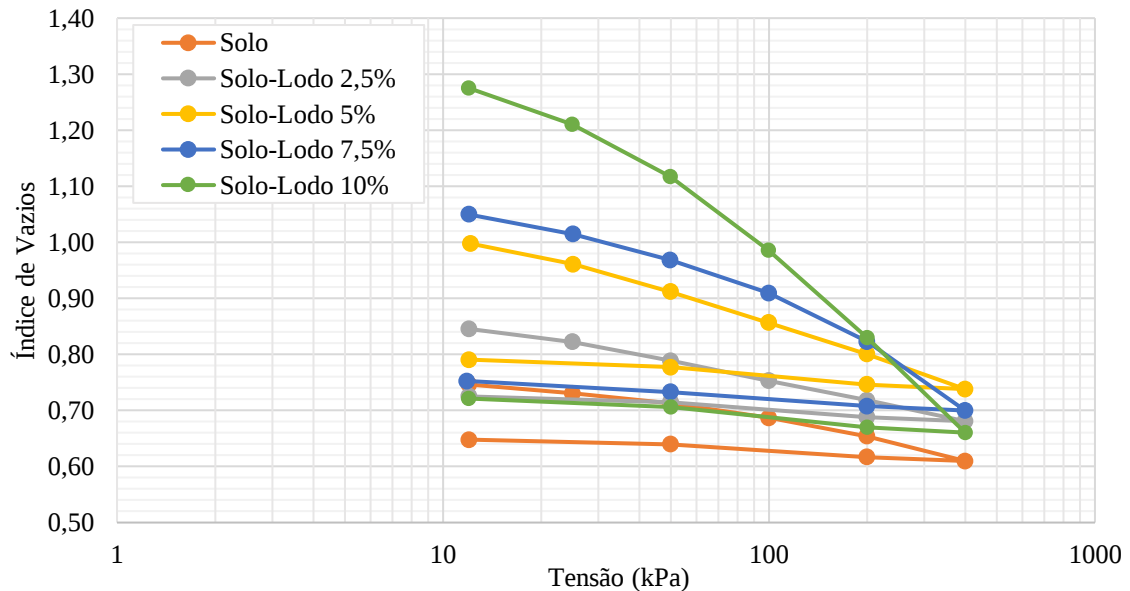
Gráfico 5 – Valores de índice de vazios e porosidade em função da incorporação de lodo de ETA



4.2.3 Ensaio de Compressão Confinada

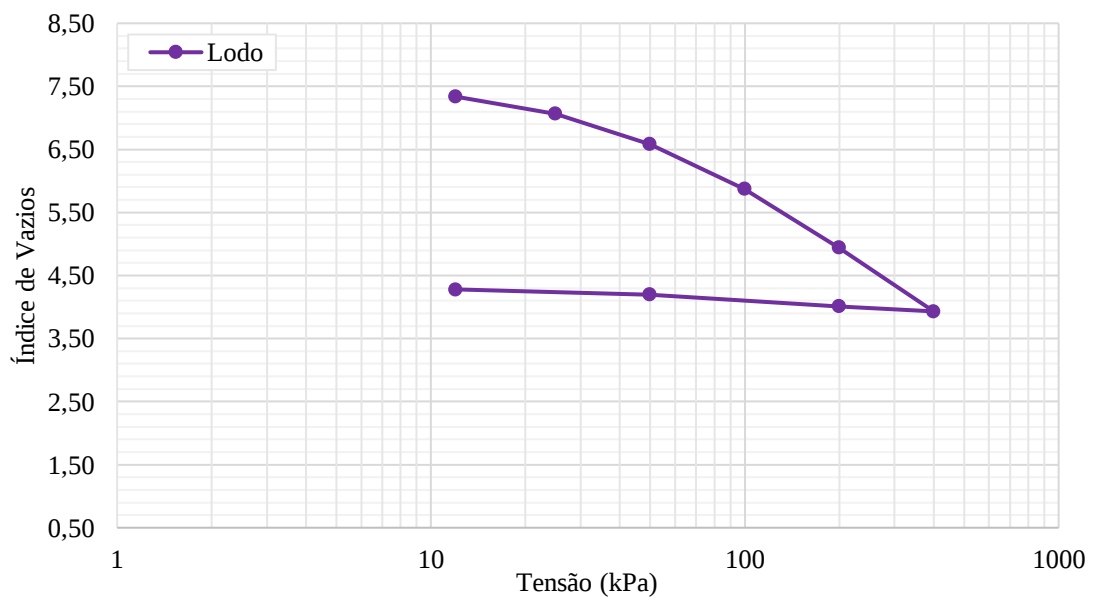
Após realizada as etapas de compactação e determinação do coeficiente de condutividade hidráulica, foi realizado o ensaio de adensamento unidimensional e as curvas de adensamento do solo, do lodo e das amostras solo-lodo podem ser observados nos Gráfico 6 e Gráfico 7.

Gráfico 6 – Curvas de compressibilidade do solo e das misturas solo-lodo



Fonte: Almeida *et al.*, 2024.

Gráfico 7 – Curvas de compressibilidade do lodo



Fonte: Almeida *et al.*, 2024.

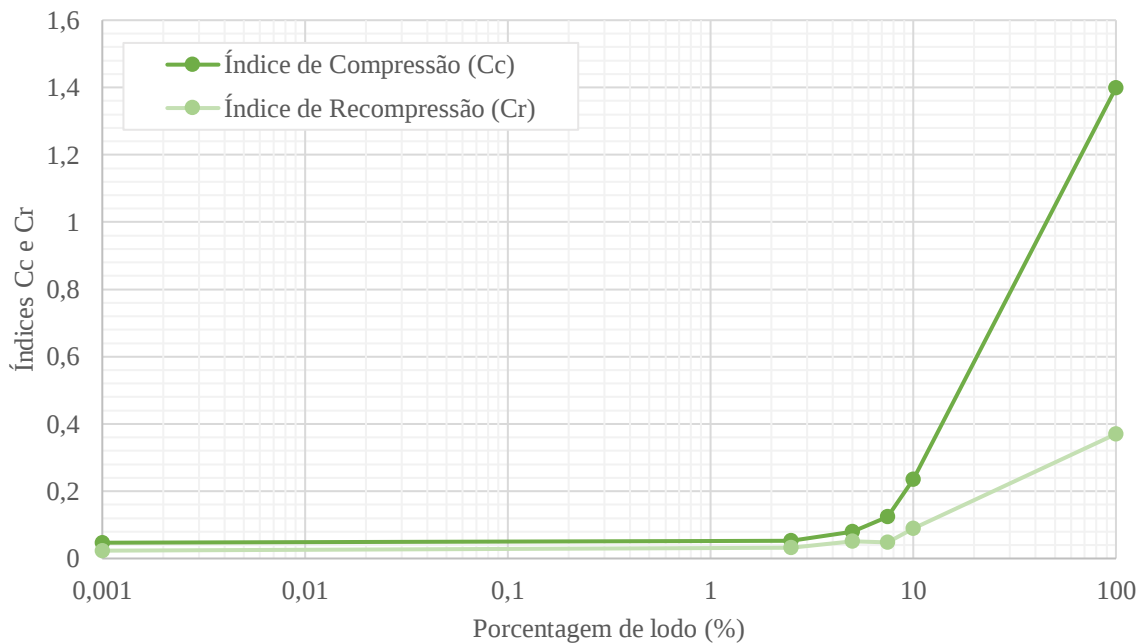
A partir das curvas de compressibilidade foi possível determinar os resultados de índice de compressão (C_c) e o índice de recompressão (C_r) das amostras, assim como possível observar na Tabela 16. Também é observado no Gráfico 8 a tendência de crescimento dos índices conforme aumentou a porcentagem de incorporação de lodo nas misturas.

Tabela 16 – Índice de compressão e recompressão das amostras de solo, lodo e solo-lodo

Amostra	Índice de Compressão (C_c)	Índice de Recompressão (C_r)
Solo	0,05	0,02
Solo-Lodo 2,5%	0,05	0,03
Solo-Lodo 5%	0,08	0,05
Solo-Lodo 7,5%	0,12	0,05
Solo-Lodo 10%	0,23	0,09
Lodo	1,40	0,37

Fonte: Almeida *et al.*, 2024 – modificado.

Gráfico 8 – Comparativo de C_c e C_r do solo e das misturas solo-lodo



Fonte: A autora, 2024.

Em relação ao Gráfico 8, devido à natureza da escala logarítmica, os resultados de C_c e C_r para a amostra de solo foram indicados no ponto de 0,001% de adição de lodo apenas para que estivesse explícito no gráfico, não pretendendo ser uma indicação de uma possível adição de lodo na amostra de solo. Como os resultados da amostra de solo se apresentaram muito próximos da amostra de solo-lodo 2,5%, entendeu-se como indiferente o local da indicação do resultado do solo.

Quando analisados os resultados da Tabela 16 e no Gráfico 8, observa-se que a incorporação de lodo de ETA influenciou nos valores de C_c das misturas solo-lodo, tendência

essa já observada por Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021), onde os autores concluíram que o lodo pode ocasionar no aumento da compressibilidade da amostra.

Além disso, a amostra de lodo em si apresentou um valor de C_c aproximadamente 30 vezes maior que o valor do solo. Essa característica pode ser considerada indesejada quando se trata de aplicação em camadas de aterros sanitários que precisam conservar suas espessuras iniciais. A necessidade de manter a geometria é considerada importante para a preservação de outras características geotécnicas como a estanqueidade e a resistência, quando submetidas a sobrecargas progressivas causadas por alteamentos em aterros sanitários.

No Gráfico 8, tanto o C_c quanto o C_r aumentaram progressivamente à medida que a porcentagem de lodo aumenta, com a diferença entre os valores de C_c e C_r aumento conforme mais se aproximou da amostra de lodo *in natura*. A possibilidade de visualizar esse comportamento corrobora a interpretação de que com maior adição de lodo, maior a compressibilidade e maior a tendência a se comprimir após o alívio de tensão. Além desse ponto, o lodo apresentou um resultado de C_r aproximadamente 15 vezes maior que o solo residual, sendo essa tendência considerada coerente quando comparado ao C_c , visto que a recompressão irá apresentar uma variação menor de índice de vazios considerando a natureza elástica da curva de compressibilidade.

A elevada compressibilidade da amostra de lodo *in natura* se justifica por sua composição e seu índice de vazios, assim como devido à impossibilidade de compactação do mesmo no anel de adensamento por causa de sua consistência. O valor encontrado de C_c de 1,399 é considerado compatível com os valores encontrados por O'Kelly (2016).

As misturas solo-lodo exibiram valores de C_c e C_r mais próximos do valor do solo, mesmo identificando a tendência citada anteriormente de aumento dos coeficientes conforme aumentava a porcentagem de lodo da mistura. Os maiores valores de C_c e C_r não ultrapassaram 5 vezes o obtido no solo puro.

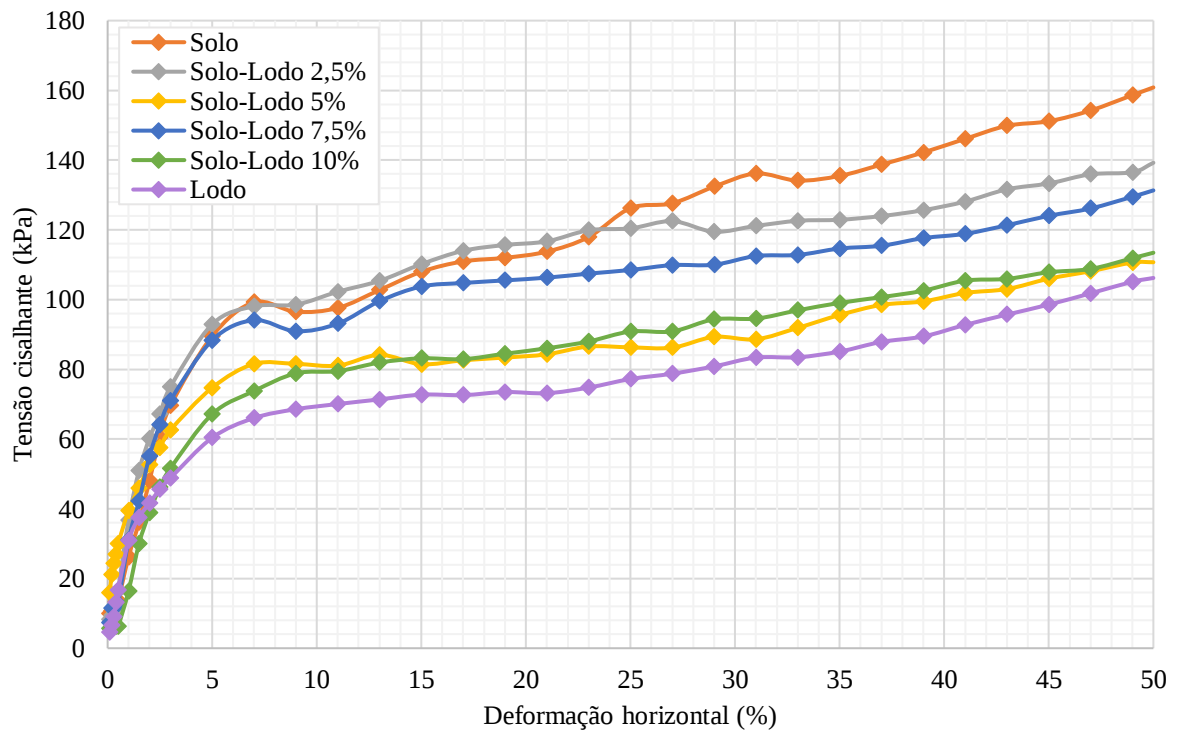
Os resultados de índice de compressão foram inferiores aos obtidos por Montalvan (2016) em sua pesquisa com incorporação de 16,7%, 20% e 25% de lodo a um solo do tipo arenoso. Esse resultado indica que, em misturas com baixo percentual de adição de lodo de ETA, as características do solo são mais dominantes.

4.2.4 Ensaio de Cisalhamento Direto

4.2.4.1 Amostras sem geossintético

Em relação aos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto realizados com as amostras sem a presença de algum geossintético, pode-se observar nos Gráfico 9, Gráfico 10 e Gráfico 11 o comportamento cisalhante para tensões de pré-adensamento de 50 kPa, 200 kPa e 350 kPa, respectivamente.

Gráfico 9 - Tensão x Deformação – 50 kPa – Sem geossintético



Fonte: A autora, 2024.

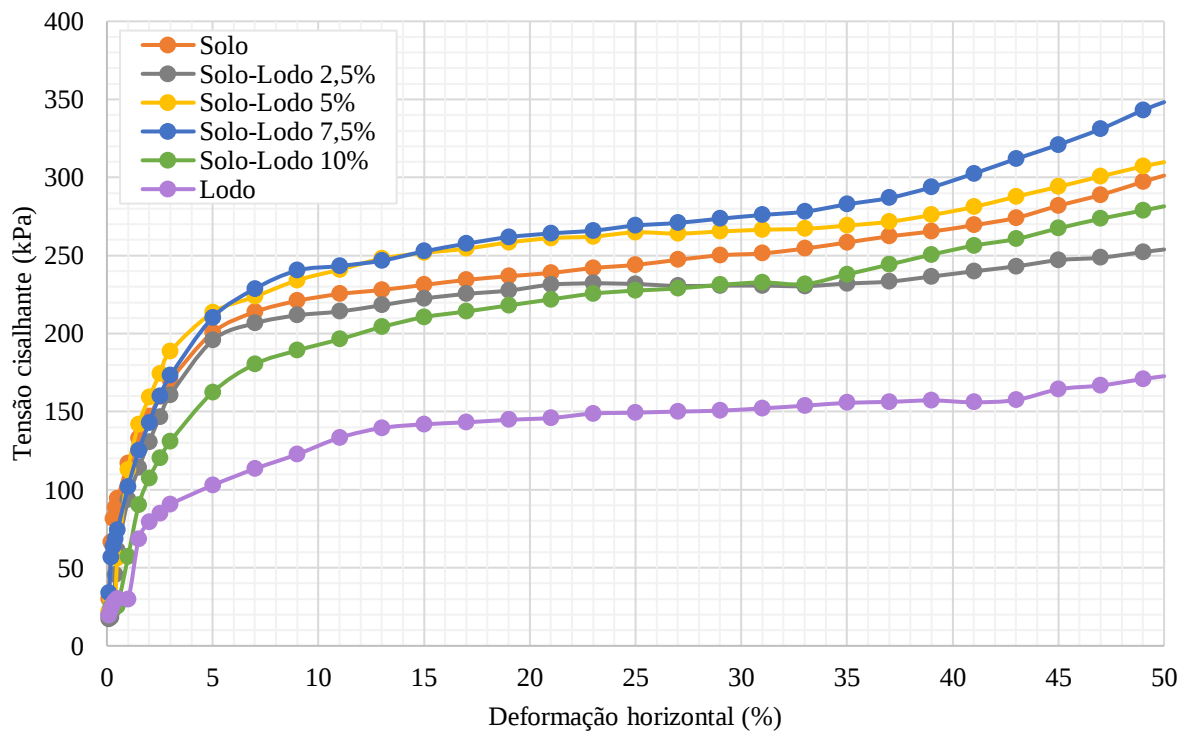
Observou-se que, no nível de tensão de confinamento de 50 kPa, a amostra de solo apresentou valores mais elevados de tensão cisalhamento para os mesmos valores de deformações quando comparado com o restante das amostras. Esse comportamento indica que o solo laterítico utilizado na pesquisa apresentou maior valor de resistência ao cisalhamento nesse nível de tensão.

Os valores de tensão cisalhante observados para o solo são superiores aos encontrados por Bloinski *et al.* (2020) em estudos anteriores com o mesmo solo do CEEG-PG. No estudo citado, para uma tensão de vertical semelhante, os autores obtiveram aproximadamente o valor de 40 kPa de resistência ao cisalhamento de pico. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que os autores utilizaram amostras indeformadas de solo na profundidade de 2 metros,

enquanto o solo empregado no presente estudo, embora de mesma origem, não consistia em uma amostra indeformada.

Além disso, foi observada uma tendência de separação em dois grupos de resistência, com o segundo grupo incluindo a amostra de lodo, que apresentou a menor tensão cisalhante entre todas. Nota-se uma redução da resistência ao cisalhamento à medida que a porcentagem de lodo incorporado ao solo aumentou.

Gráfico 10 - Tensão x Deformação – 200 kPa – Sem geossintético

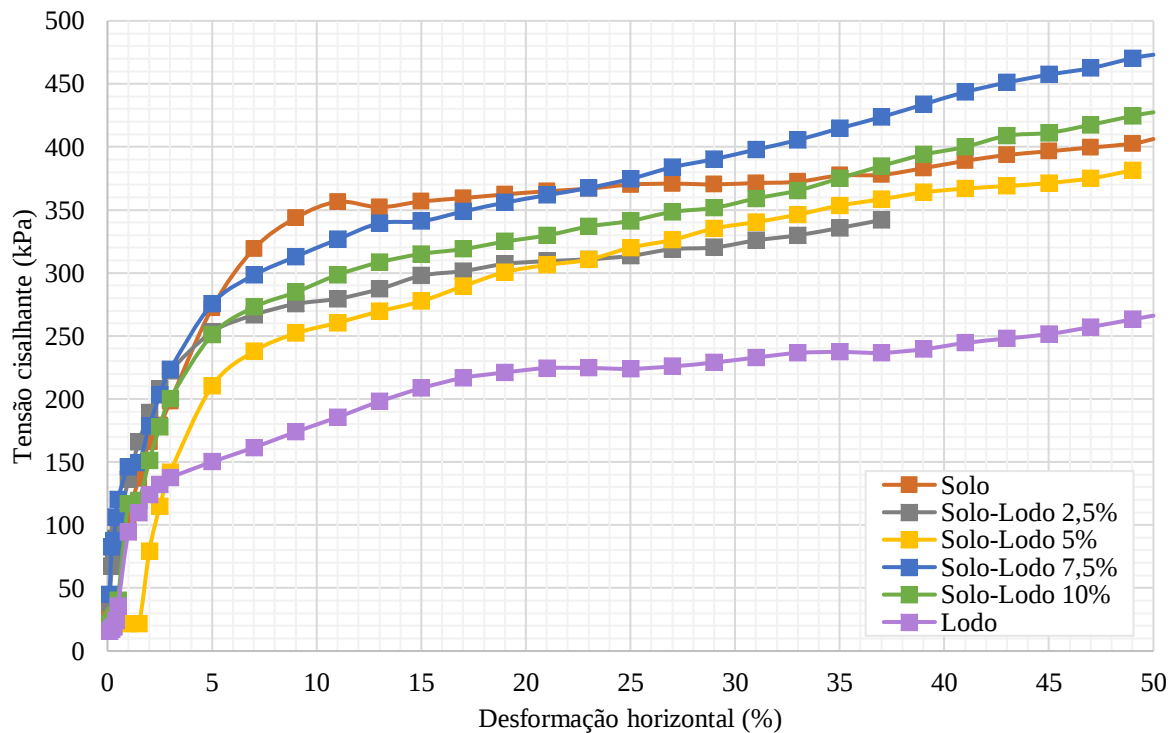


Fonte: A autora, 2024.

Em relação ao comportamento das amostras sob uma tensão de consolidação de 200 kPa, ocorreu uma variação nas resistências ao cisalhamento, indicando que as amostras de solo com 5% e 7,5% de lodo apresentaram uma resistência maior do que a amostra de solo. A repetição dos ensaios para ambas as amostras confirmou a tendência. Por essa razão, os resultados foram considerados válidos, embora sejam recomendados mais repetições e outros ensaios para fundamentar o comportamento.

Destaca-se para a amostra de lodo distintamente se afastando do restante das amostras de solo e das misturas solo-lodo em relação à tensão cisalhante. A diferença média de tensão cisalhante entre o lodo e a amostra mais próxima a ele — solo-lodo 10% — chega a 85 kPa. Esse comportamento, quando comparado aos resultados obtidos para uma tensão de vertical menor, como a de 50 kPa, indica a diminuição da resistência ao cisalhamento do lodo conforme aumenta a tensão de vertical aplicada.

Gráfico 11 - Tensão x Deformação – 350 kPa – Sem geossintético

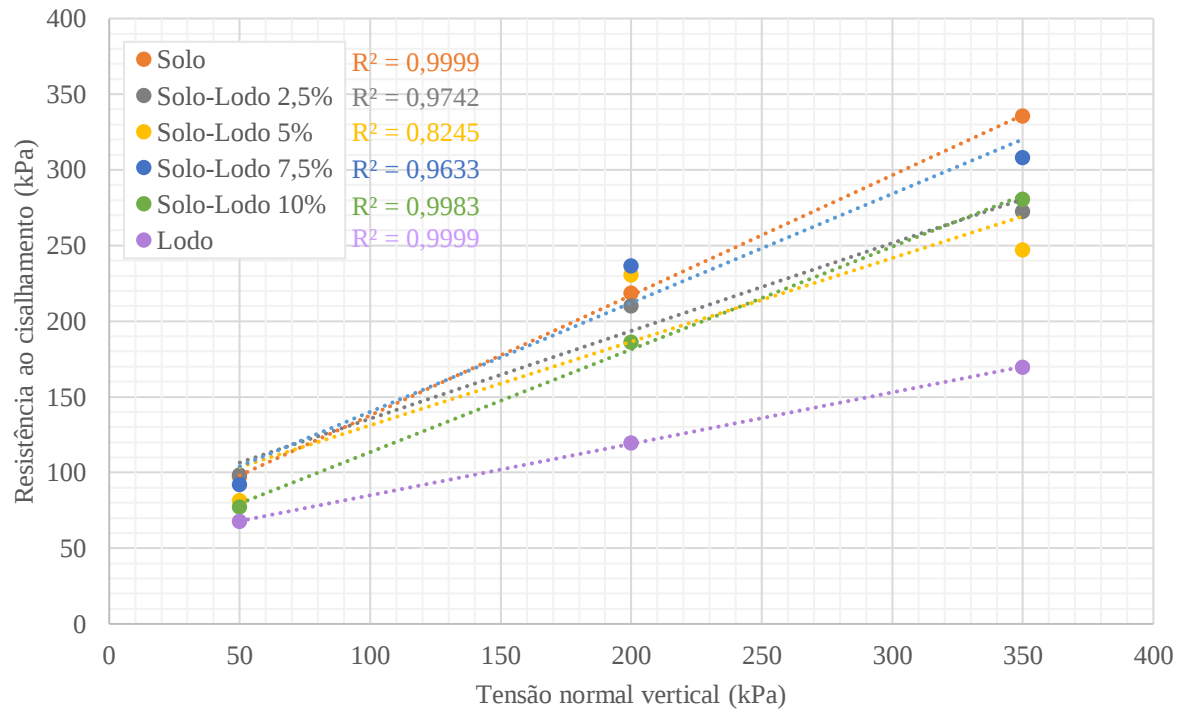


Fonte: A autora, 2024.

Por fim, na última tensão vertical adotada, o comportamento de baixa tensão do lodo se manteve, quando comparado ao restante das amostras. A diferença de tensão cisalhante entre o lodo e a amostra mais próxima (solo-lodo 5%) chega à faixa de 101 kPa. Em relação à uma análise em deformações de até 15%, o solo se apresentou como a amostra com maior resistência ao cisalhamento. Conforme a deformação aumentou, a amostra de solo-lodo 7,5% apresentou maior tensão cisalhante necessária para ocorrer a deformação.

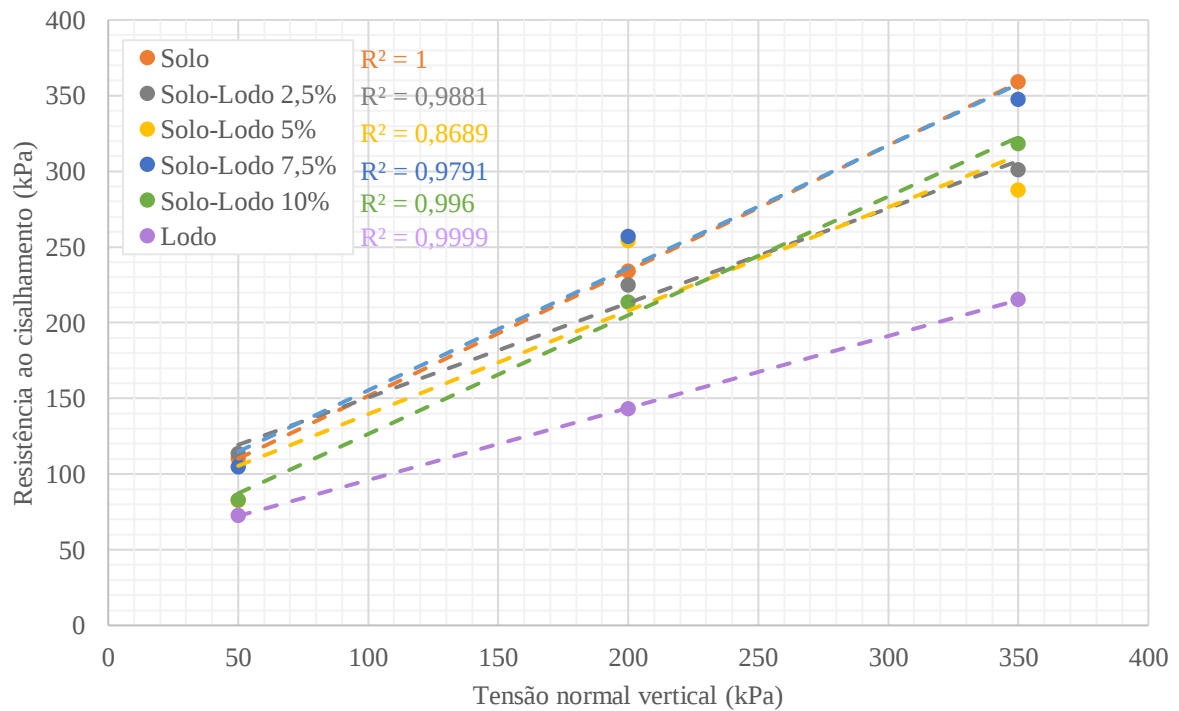
Em relação à envoltória de ruptura utilizando o modelo de Mohr-Coulomb, a questão de comparação, foram obtidas envoltórias para diferentes critérios de estado limite, vinculado a diferentes níveis de deformação horizontal, para poder determinar o critério que mais se adequa ao comportamento das amostras em estudo. Inicialmente foram analisados os resultados para critérios limites de 8,33%, 16,67% e 25% de deformação horizontal, ou seja, 5 mm, 10 mm e 15 mm de deslocamento cisalhante máximo, respectivamente. Dessa forma, aplicando as metodologias citadas, observa-se nos Gráfico 12, Gráfico 13 e Gráfico 14 os resultados obtidos.

Gráfico 12 – Sem geossintético - Envoltória de ruptura 8,33% de deformação horizontal



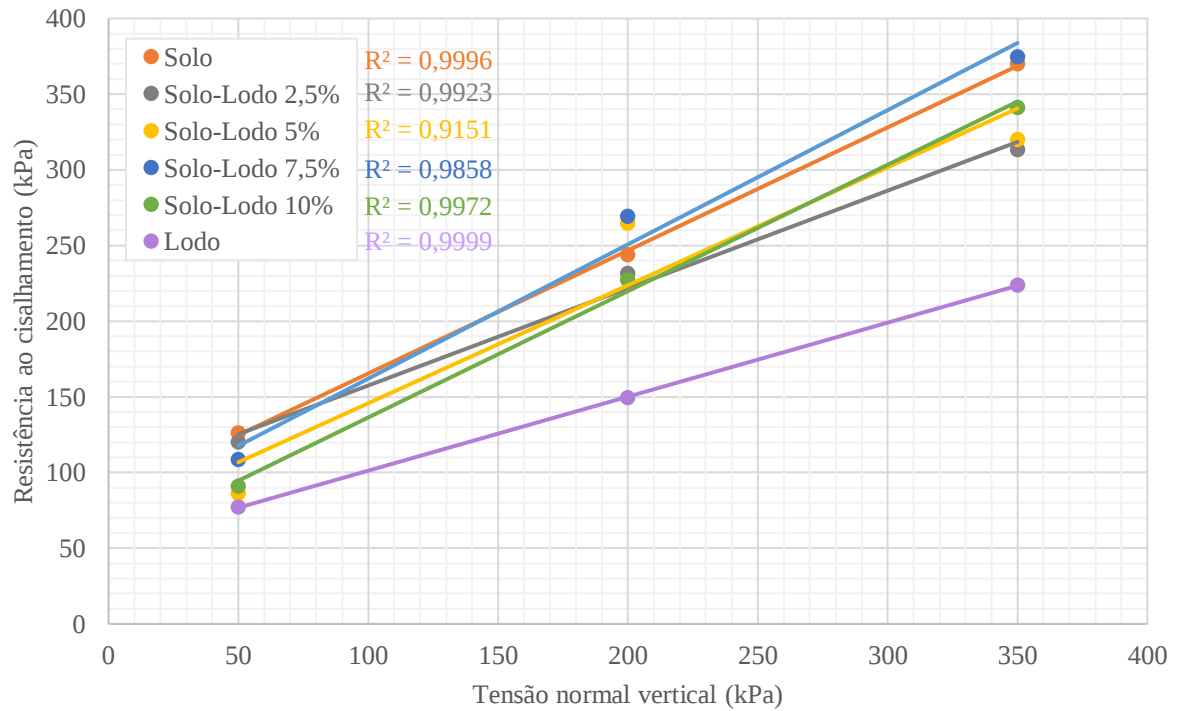
Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 13 – Sem geossintético - Envoltória de ruptura 16,67% de deformação horizontal



Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 14 – Sem geossintético - Envoltória de ruptura 25% de deformação horizontal

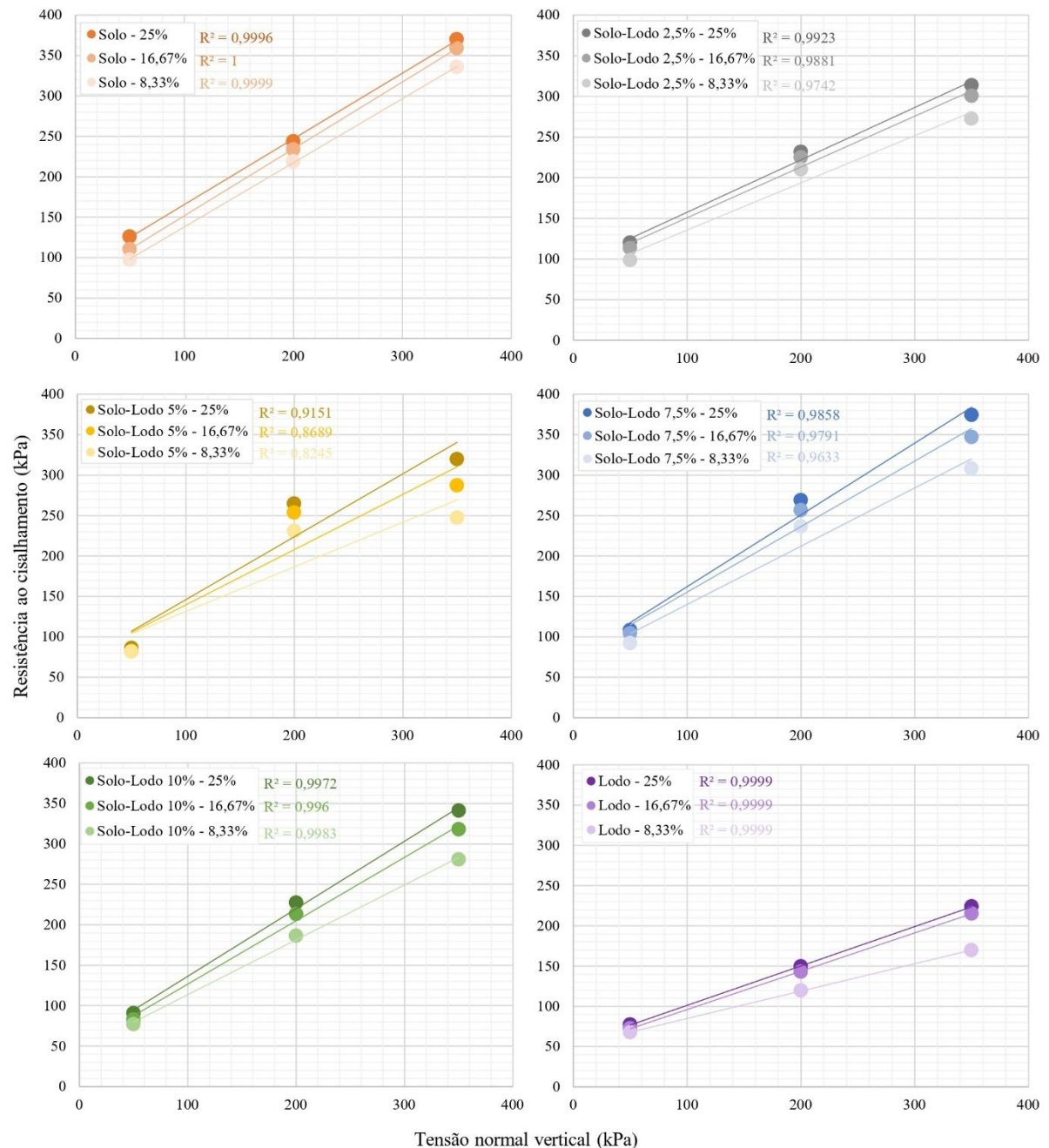


Fonte: A autora, 2024.

Quando se analisa visualmente os gráficos das envoltórias, percebe-se que as envoltórias apresentaram três faixas de comportamento. A primeira faixa, com maiores valores de resistência ao cisalhamento, comporta os resultados das amostras de solo e solo-lodo 7,5%. A segunda faixa é a intermediária e nela estão as envoltórias do solo-lodo 2,5%, 5% e 10%, as quais variam de posicionamento conforme o critério. A terceira faixa consiste somente na envoltória de ruptura do lodo, evidentemente a parte do restante das amostras. A adição do lodo de ETA ocasionou na redução da resistência ao cisalhamento da maioria das misturas solo-lodo, assim como foi observado no trabalho de Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021).

Em relação à definição do critério de ruptura para análise final e comparação com os resultados obtidos para amostras com geotêxtil e com barreira geossintética, realizou-se uma comparação entre as envoltórias de ruptura para os diferentes critérios e os gráficos podem ser observados na Figura 26.

Figura 26 – Comparação entre critérios de ruptura – Sem geossintético



Fonte: A autora, 2024.

Observa-se que o solo, sendo ele a matriz, apresenta envoltórias de ruptura distintas com a variação do critério de ruptura. Porém, conforme aumentou a incorporação de lodo *in natura* nas misturas, as envoltórias apresentaram tendência de alinhamento na faixa de 50 kPa de tensão de confinamento. Analisando as envoltórias de cada amostra individualmente, esse alinhamento causa a diminuição do ângulo de atrito conforme alterou-se o critério de ruptura.

Esse comportamento indica que, quando submetida a amostra a menores tensões de confinamento, a resistência ao cisalhamento da amostra é mais afetada pela porcentagem de

lodo que é incorporado do que pelo critério de ruptura selecionado. A partir da Tabela 17, observa-se essa variação expressa em valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito considerando a diferença entre cada critério selecionado. Reforça-se que os altos parâmetros de resistência são referentes ao material compactado, e não a uma amostra indeformada.

Tabela 17 – Resultados de intercepto coesivo e ângulo de atrito – Amostras sem geossintético

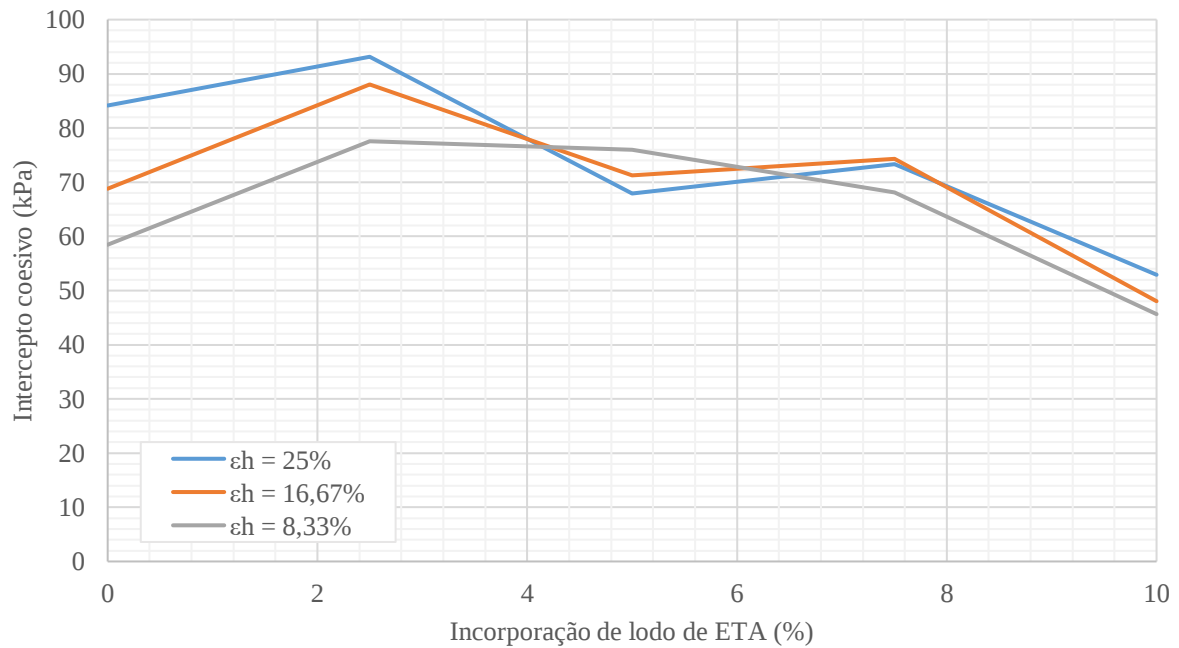
Amostra	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	R ²
Deformação horizontal - 8,33%			
Solo	58	38	0,9999
Solo-Lodo 2,5%	78	30	0,9742
Solo-Lodo 5%	76	29	0,8245
Solo-Lodo 7,5%	68	36	0,9633
Solo-Lodo 10%	46	34	0,9983
Lodo	51	19	0,9999
Deformação horizontal - 16,67%			
Solo	69	40	1,000
Solo-Lodo 2,5%	88	32	0,9881
Solo-Lodo 5%	71	34	0,8689
Solo-Lodo 7,5%	74	39	0,9791
Solo-Lodo 10%	48	38	0,9960
Lodo	49	26	0,9999
Deformação horizontal - 25,00%			
Solo	84	39	0,9996
Solo-Lodo 2,5%	93	33	0,9923
Solo-Lodo 5%	68	38	0,9151
Solo-Lodo 7,5%	73	42	0,9858
Solo-Lodo 10%	53	40	0,9972
Lodo	52	26	0,9999

Fonte: A autora, 2024.

A amostra de solo apresentou maior variação dos valores de intercepto coesivo dependendo do método, apresentando um desvio padrão de 12,96 kPa entre eles. A tendência citada anteriormente de diminuição do ângulo de atrito conforme ocorreu a variação do critério é expressa na Tabela 17.

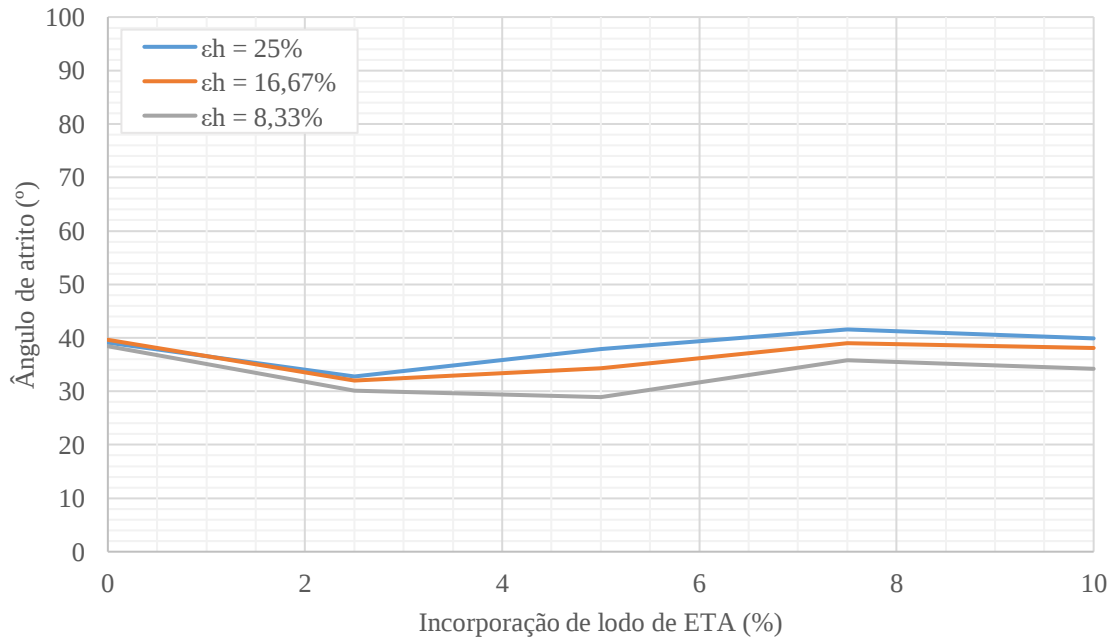
A amostra de solo-lodo 7,5% pode ser utilizada como exemplo, onde seu valor de ângulo de atrito iniciou com 41,48° para o critério de 25% de deformação, diminuindo para 38,99° (16,67% de deformação) e finalizando em 35,76° (8,33% de deformação). Para uma melhor visualização da tendência de diminuição do intercepto coesivo e do ângulo de atrito, foram adaptados os valores obtidos nos Gráfico 15 e Gráfico 16.

Gráfico 15 – Variação da intercepto coesivo de acordo com o critério de ruptura



Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 16 – Variação do ângulo de atrito de acordo com o critério de ruptura



Fonte: A autora, 2024.

De forma geral, para o critério de 25% de deformação horizontal, ocorreu uma diminuição do intercepto coesivo conforme incorporou maiores teores de lodo além da marca de 2,5%. Apesar de ter ocorrido a diminuição, esse decréscimo não é considerado linear por causa do aumento de intercepto coesivo da amostra solo-lodo 7,5% em relação à de 5%.

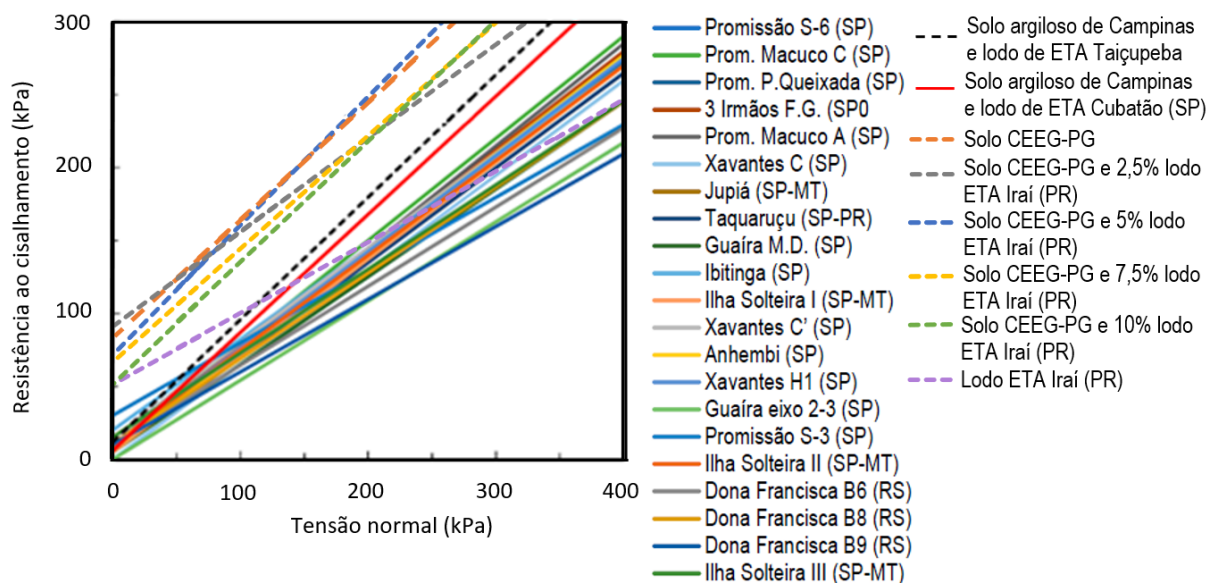
Sobre os valores de ângulo de atrito encontrados, eles apresentaram um pouco mais de linearidade entre os diferentes níveis de deformação horizontal adotados para avaliação do critério de ruptura para a mesma amostra. A maior variação encontrada foi de aproximadamente 4,5° para a amostra solo-lodo 5%, e em todos os percentuais de adição de lodo se observou ligeiro aumento do valor de ângulo de atrito pelo critério de Mohr-Coulomb com o aumento da deformação horizontal limite adotada.

Em relação à influência do lodo no comportamento do ângulo de atrito, as amostras apresentaram valores variados, podendo até exibir valores maiores que a amostra de solo, sendo isso considerado positivo quando se analisa a possível aplicação das misturas em camadas de aterros sanitários.

Portanto, a partir dos pontos levantados, optou-se por adotar como critério de ruptura o limite de deformação horizontal de 25% para as amostras de solo, de lodo e de misturas solo-lodo sem a presença de geossintético.

Considerando então a envoltória de ruptura para 25% de deformação horizontal, pode-se comparar os resultados obtidos àqueles apresentados por Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021) no Gráfico 17. Neste gráfico estão apresentados os resultados obtidos da presente pesquisa bem como os valores de uma base de dados de solos brasileiros e os resultados encontrados por Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021) das misturas de solo de Campinas – SP com lodo de ETA de Taícupeba - SP e lodo de ETA de Cubatão – SP.

Gráfico 17 – Comparação de resistência ao cisalhamento de amostras solo-lodo em condição drenada



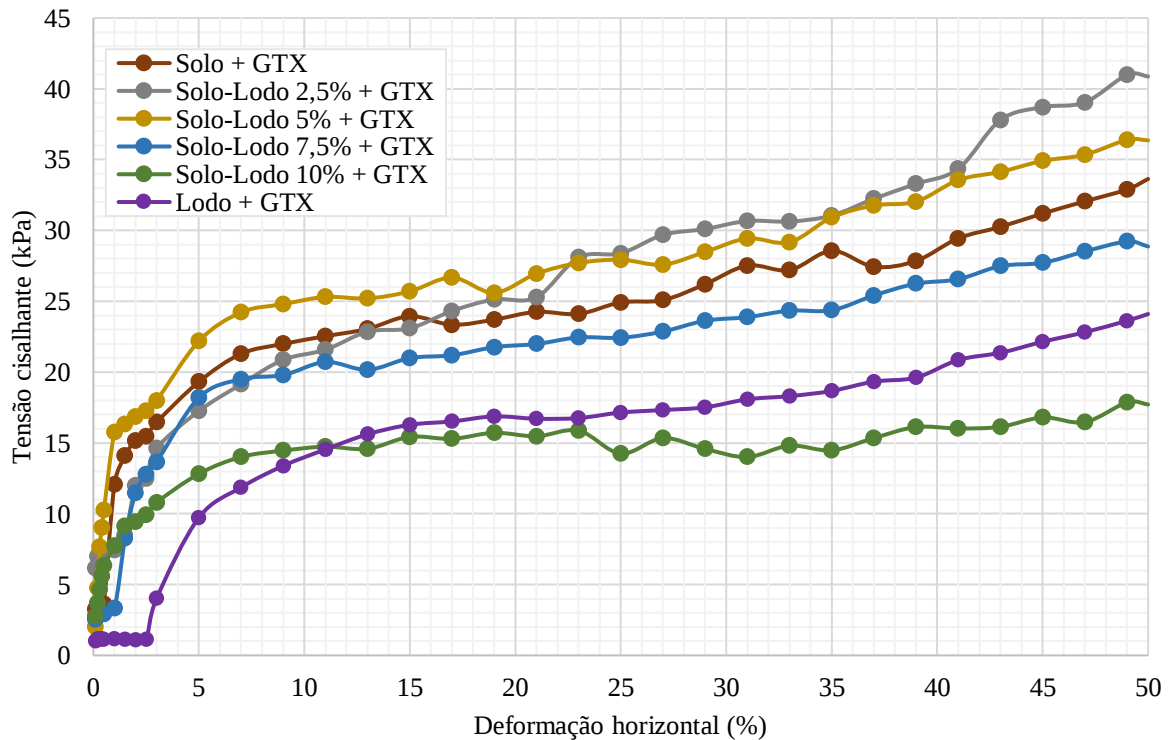
Fonte: Adaptado de Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021), com dados adicionais deste estudo.

Analisando o Gráfico 17, observa-se que a amostra de lodo *in natura* apresentou comportamento similar aos solos da base de dados a partir de tensões de confinamento de 150 kPa. As amostras solo-lodo obtidas pela presente pesquisa, bem como a amostra de solo, apresentaram resistência ao cisalhamento maior que aquelas analisadas pelos autores citados. A amostra de solo e de solo-lodo 10% apresentaram a maior similaridade em quesito de ângulo de atrito com as misturas de solo argiloso de Campinas com lodo de ETA Cubatão.

4.2.4.2 Amostras com geossintético

As amostras de solo, de lodo e de misturas solo-lodo com a presença de geotêxtil apresentaram resultados de resistência ao cisalhamento que podem ser observados nos Gráfico 18, Gráfico 19, Gráfico 20 e Gráfico 21 para tensões vertical de 10 kPa, 50 kPa, 200 kPa e 350 kPa, respectivamente. Justifica-se a adição dos ensaios com a tensão confinante de 10 kPa para compreender melhor o comportamento das misturas em baixas tensões, considerando a variabilidade da resistência ao cisalhamento em baixas tensões de confinamento observadas para as amostras sem geossintético.

Gráfico 18 – Tensão x Deformação – 10 kPa – Geotêxtil

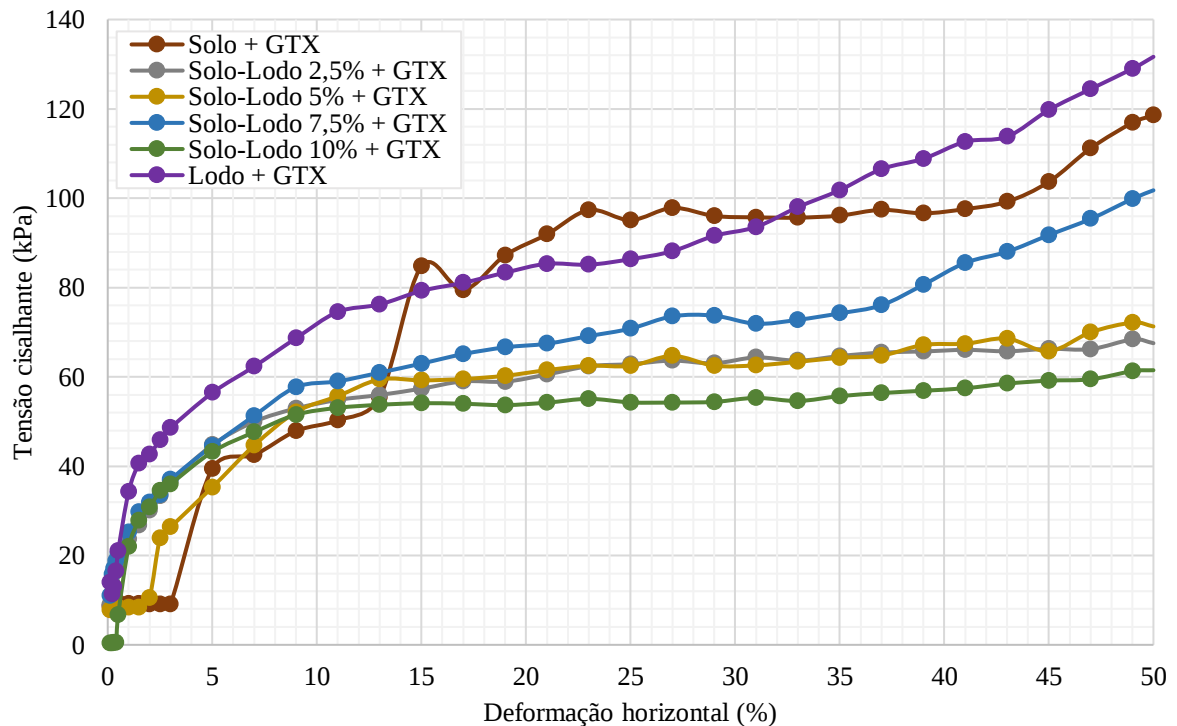


Fonte: A autora, 2024.

Sob a tensão confinante de 10 kPa, o solo apresentou maior resistência ao cisalhamento nos deslocamentos mais baixos em comparação com deformações na faixa de 45% onde a

amostra de solo-lodo 2,5% + GTX apresentou uma elevação e ultrapassou o solo. Destaca-se para a tendência da amostra de lodo e de solo-lodo 10% de se apresentarem em uma faixa de tensões mais abaixo à das outras amostras, indicando que, em baixas tensões, a mistura com maior percentual de lodo apresentou o comportamento próximo do ensaio com lodo + geotêxtil.

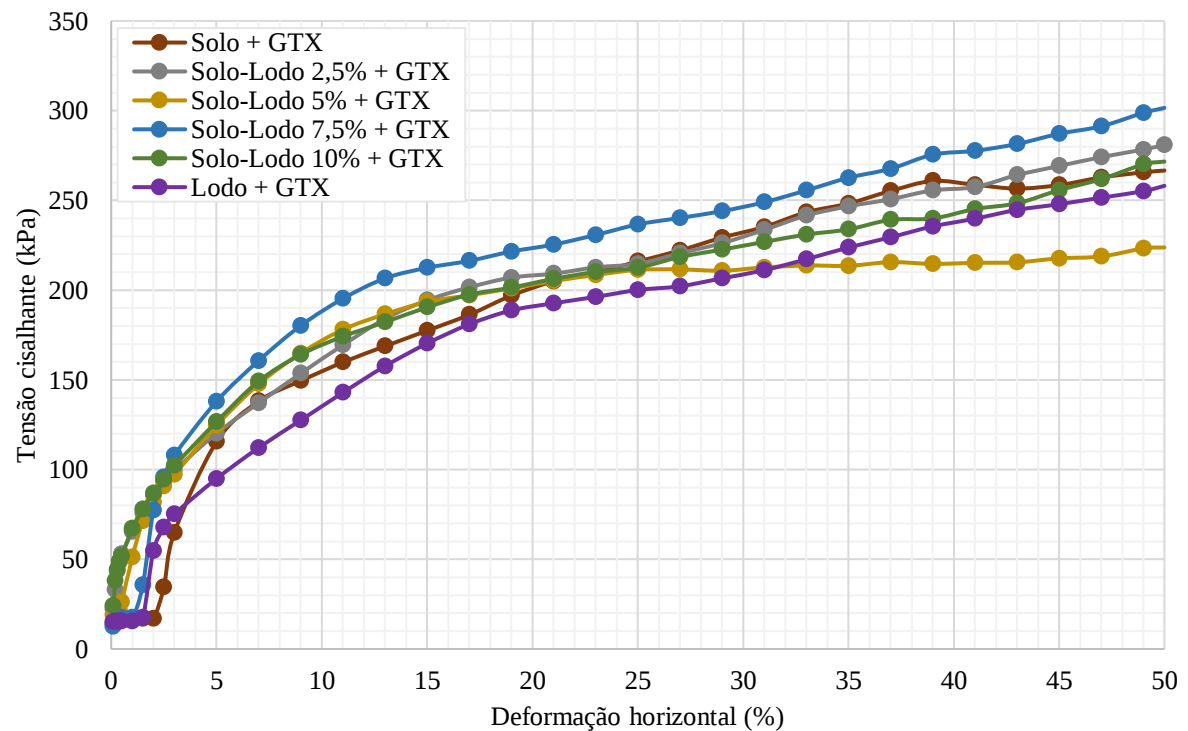
Gráfico 19 – Tensão x Deformação – 50 kPa – Geotêxtil



Fonte: A autora, 2024.

Em relação à tensão de 50 kPa ocorreu uma diferença considerável de resistência entre a amostra de solo com a amostra de lodo, porém esse comportamento pode ser considerado afetado pelos valores iniciais de deformação horizontal que ocorreram sem o aumento da tensão cisalhante. A amostra de solo + GTX pode ter sofrido deslizamento sem apresentar atrito entre o geotêxtil e a amostra e por isso gerou nos resultados de resistência mínima observados na faixa de 0 a 5% de deformação horizontal, como possível de visualizar no Gráfico 19. Por esse motivo, a análise do deslocamento inicial acabou prejudicada quando comparada as outras amostras. Apesar dessa variação, o restante das amostras apresentou comportamento similar ao gráfico de tensão confinante de 10 kPa, o que inclui a baixa resistência ao cisalhamento da amostra de solo-lodo 10% + GTX.

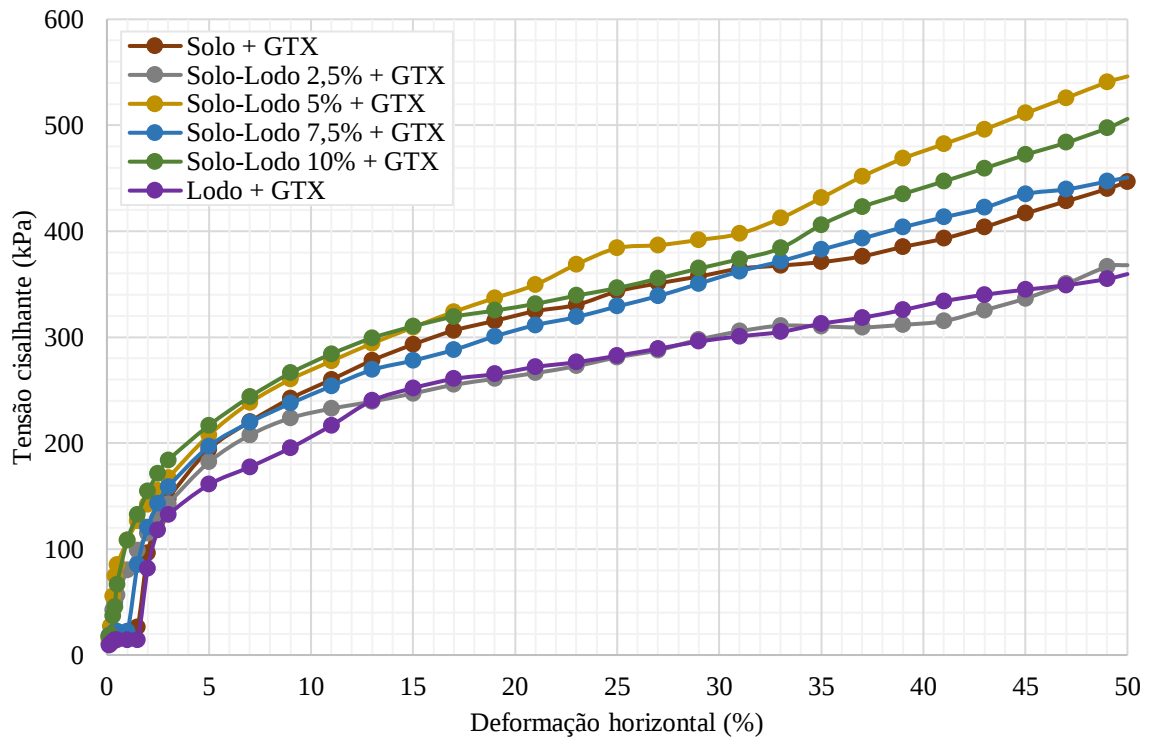
Gráfico 20 – Tensão x Deformação – 200 kPa – Geotêxtil



Fonte: A autora, 2024.

No Gráfico 20 pode-se observar o comportamento das amostras em uma tensão confinante de 200 kPa onde, nesse nível de tensão, todas as amostras analisadas apresentaram tendência de comportamento muito próximos entre si, possuindo pouca variação. Destaca-se a amostra solo-lodo 7,5% + GTX que apresentou ligeiro aumento de resistência ao cisalhamento em relação às outras amostras. Esse ponto indica um possível ganho de resistência das amostras com lodo quando em conjunto com o geotêxtil e submetidas a maiores estados de tensão.

Gráfico 21 – Tensão x Deformação – 350 kPa – Geotêxtil

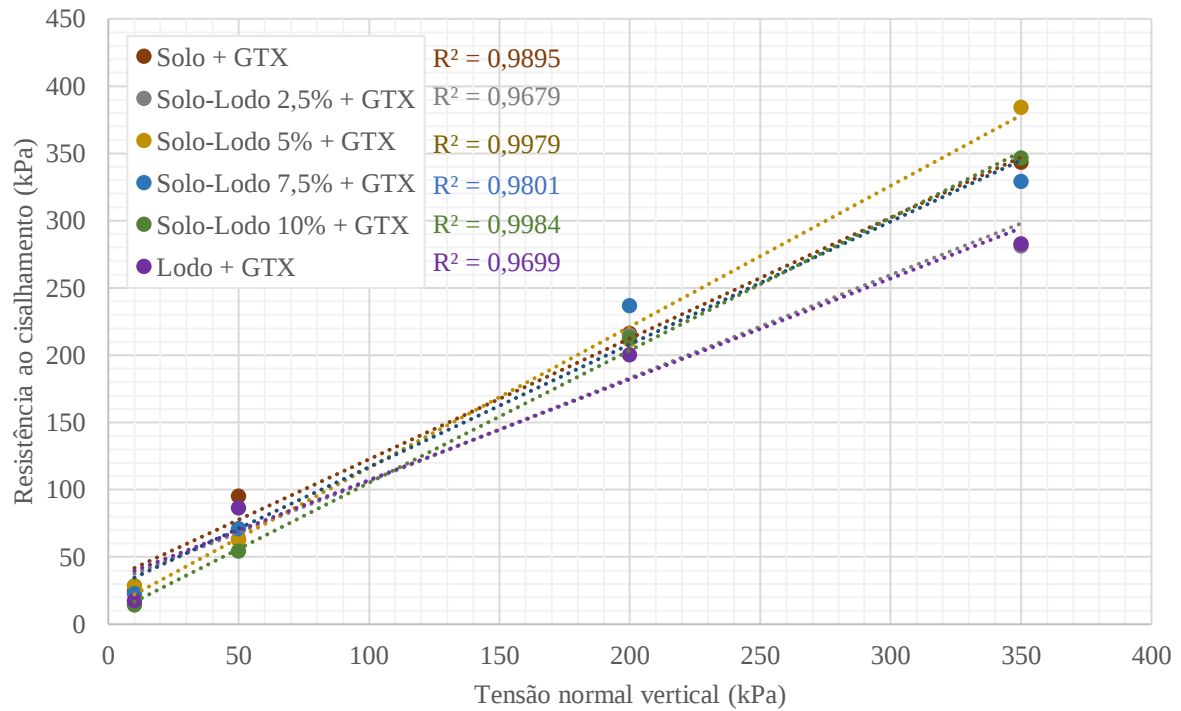


Fonte: A autora, 2024.

Quando submetidos a maior tensão ensaiada, de 350 kPa, as amostras continuaram a apresentar comportamento parecido com o observado na tensão vertical de 200 kPa. Nessa visualização, as amostras de lodo + GTX e solo-lodo 2,5% + GTX apresentaram tendência de diminuir sua resistência quando comparado às outras amostras.

Aplicando as metodologias citadas para as amostras sem geossintético e a partir da análise dos gráficos tensão-deformação apresentados acima, foi adotado a faixa de 25% de deformação como critério de ruptura para determinação da envoltória de ruptura, que pode ser observada no Gráfico 22 e os resultados de intercepto coesivo e ângulo de atrito estão na Tabela 18.

Gráfico 22 – Geotêxtil - Envoltória de ruptura 25% de deformação horizontal



Fonte: A autora, 2024.

Tabela 18 – Resultados de intercepto coesivo e ângulo de atrito – Amostras geotêxtil

Deformação horizontal - 25,00%			
Amostra	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	R ²
Solo + GTX	32,81	41,93	0,9895
Solo-Lodo 2,5% + GTX	29,93	37,44	0,9679
Solo-Lodo 5% + GTX	11,67	46,33	0,9979
Solo-Lodo 7,5% + GTX	25,55	42,38	0,9801
Solo-Lodo 10% + GTX	6,83	44,53	0,9984
Lodo + GTX	32,26	36,84	0,9699

Fonte: A autora, 2024.

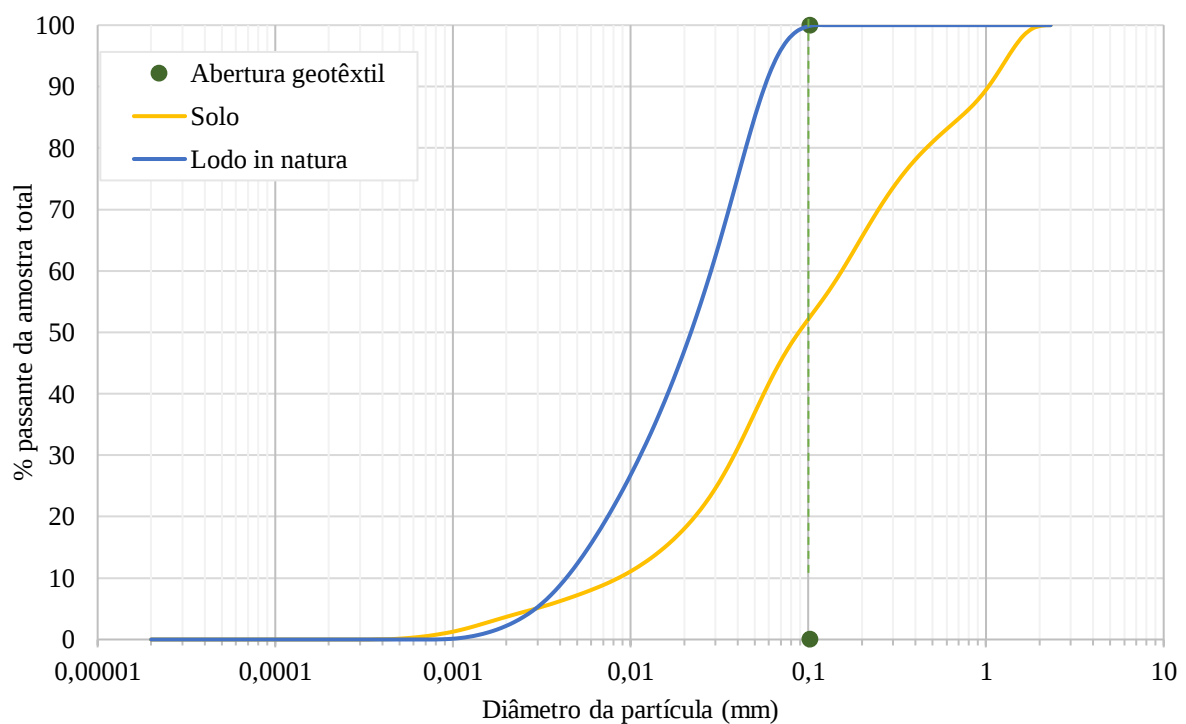
Assim como nas amostras sem a presença de geossintéticos, identificou-se variação não linear entre os resultados obtidos para o intercepto coesivo e o ângulo de atrito, não sendo possível determinar uma tendência entre o aumento de incorporação de lodo com os valores de intercepto coesivo ou de ângulo de atrito nas amostras com o geotêxtil.

Os valores de intercepto coesivo para as amostras de solo + GTX e de lodo + GTX apresentaram valores muito próximos, deixando evidente a discrepância de comportamento entre as duas combinações através da diferença do ângulo de atrito. O intercepto coesivo diminuiu com a adição de porcentagens de lodo nas misturas, apesar da similaridade entre os valores encontrados para solo + GTX e lodo + GTX. Tal comportamento pode ser uma

indicação da necessidade de melhoramento das técnicas de incorporação do solo e do lodo para preparação de amostras.

Além disso, deve-se levar em consideração que foi realizada a análise da resistência ao cisalhamento das amostras + GTX visto que é um material usualmente utilizado como camada de proteção entre o resíduo sólido e a barreira mineral em um aterro sanitário usual. Com isso em mente, é levado em conta a necessidade de uma avaliação da abertura de filtração do geotêxtil utilizado como comparação as menores partículas do solo e do lodo para visualizar como o uso combinado do solo-lodo interferiria na parcela de grãos que pode ser incorporado ao geossintético. Essa avaliação pode ser observada no Gráfico 23.

Gráfico 23 – Comparativo entre abertura de filtração do geotêxtil e partículas das amostras



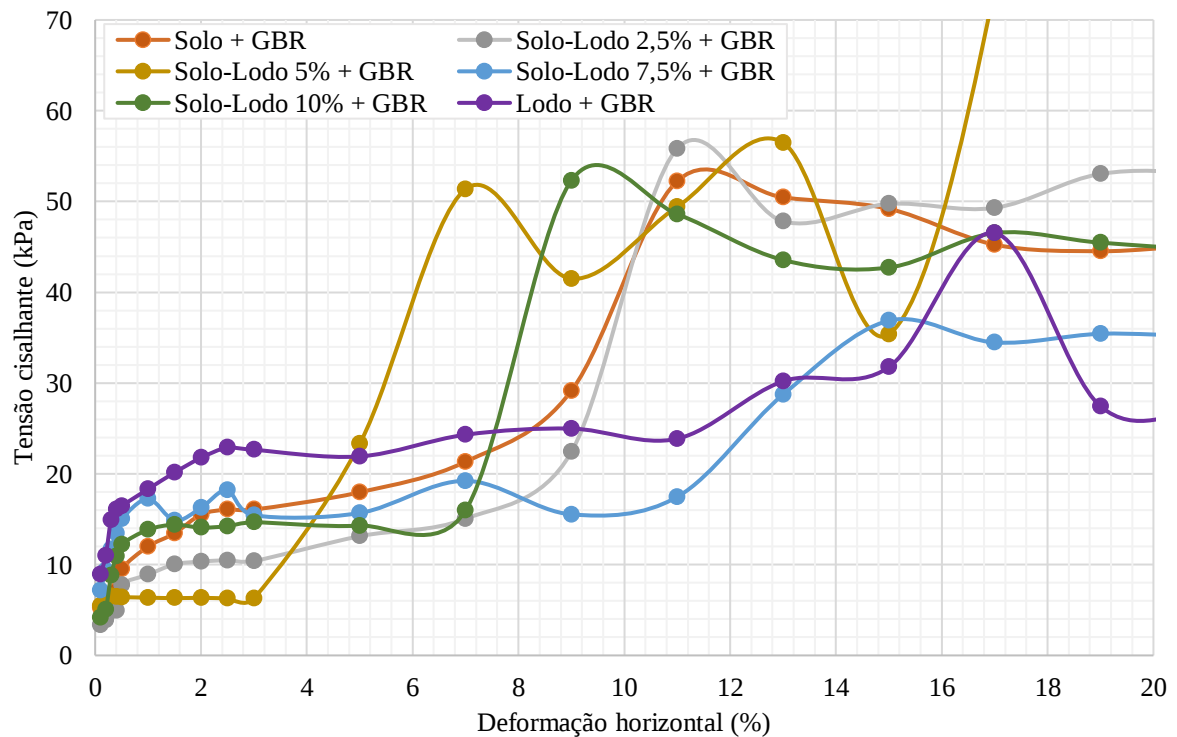
Fonte: A autora, 2024.

Como possível de observar no Gráfico 23, o solo apresentou apenas uma parcela de seu material anterior à linha verde que indica a abertura de filtração de 0,102 mm do geotêxtil. Já os grãos do lodo *in natura* se encontram, em sua maioria, anterior à linha verde de abertura do geotêxtil. O lodo, por ter finos demais e apresentar estrutura floculada, acaba por não penetrar sozinho no geotêxtil, deslizando mais facilmente sobre ele nos processos de cisalhamento. A combinação do lodo *in natura* com solo do CEEG-PG pode ter levado a uma boa configuração de interação com o GTX.

Em relação ao ângulo de atrito e a influência do lodo, assim como na análise sem geossintético, as amostras apresentaram resultados variando acima e abaixo dos valores de solo. Destaca-se que os valores obtidos para as amostras com geotêxtil apresentaram ângulo de atrito maior do que as amostras das mesmas porcentagens sem geossintético, em sua maioria. Esse comportamento é compreendido como causado pela adição de geotêxtil, geossintético conhecido pela sua função de reforço de obras geotécnicas, graças à sua maior capacidade de incorporação à matriz. Os grãos de solo-lodo integraram ao geotêxtil, gerando o efeito fibra do geotêxtil não tecido, e essa tendência auxiliou no aumento da resistência, assim como indicado pela análise de abertura de filtração O95.

Já em relação aos resultados com as amostras compostas com a barreira geossintética, nos Gráfico 24, Gráfico 25, Gráfico 26 e Gráfico 27 podem-se observar os comportamentos da tensão cisalhante obtida em função da deformação horizontal medida.

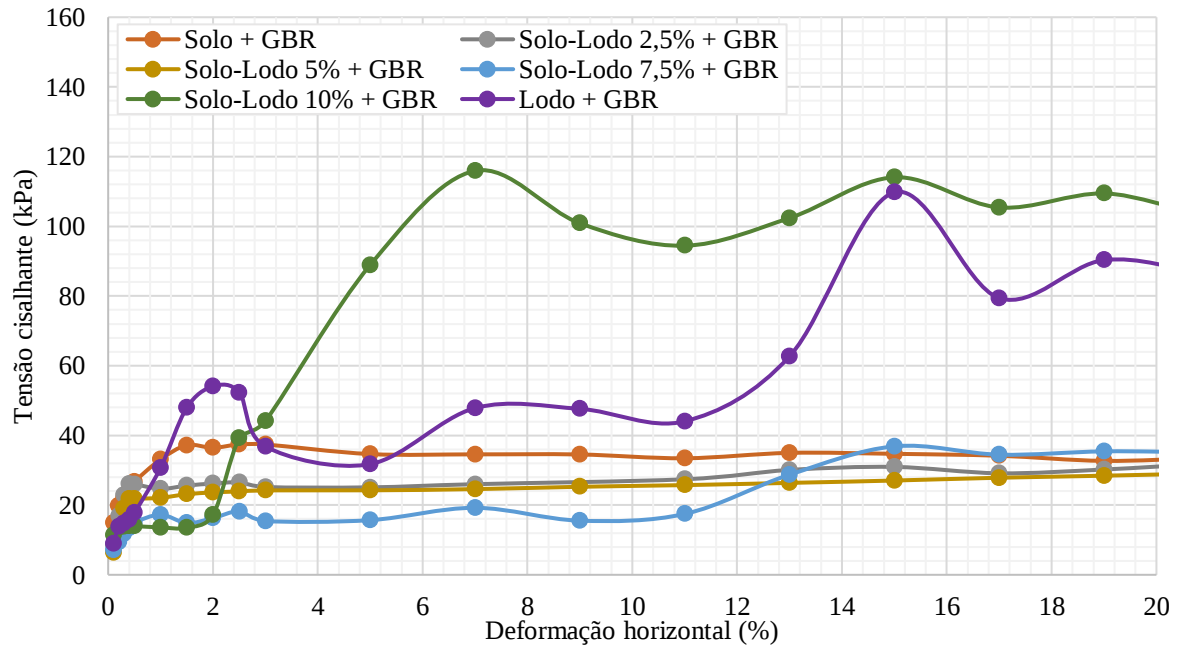
Gráfico 24 – Tensão x Deformação – 10 kPa – Barreira geossintética



Fonte: A autora, 2024.

Em relação aos resultados obtidos para a tensão de 10 kPa, é observado que os dados para a amostra de solo-lodo 5% + geomembrana apresentaram uma elevação drástica de resistência, se diferenciando em mais de 2,7 vezes do pico obtido pela amostra de 2,5%, que apresentou segunda maior tensão cisalhante.

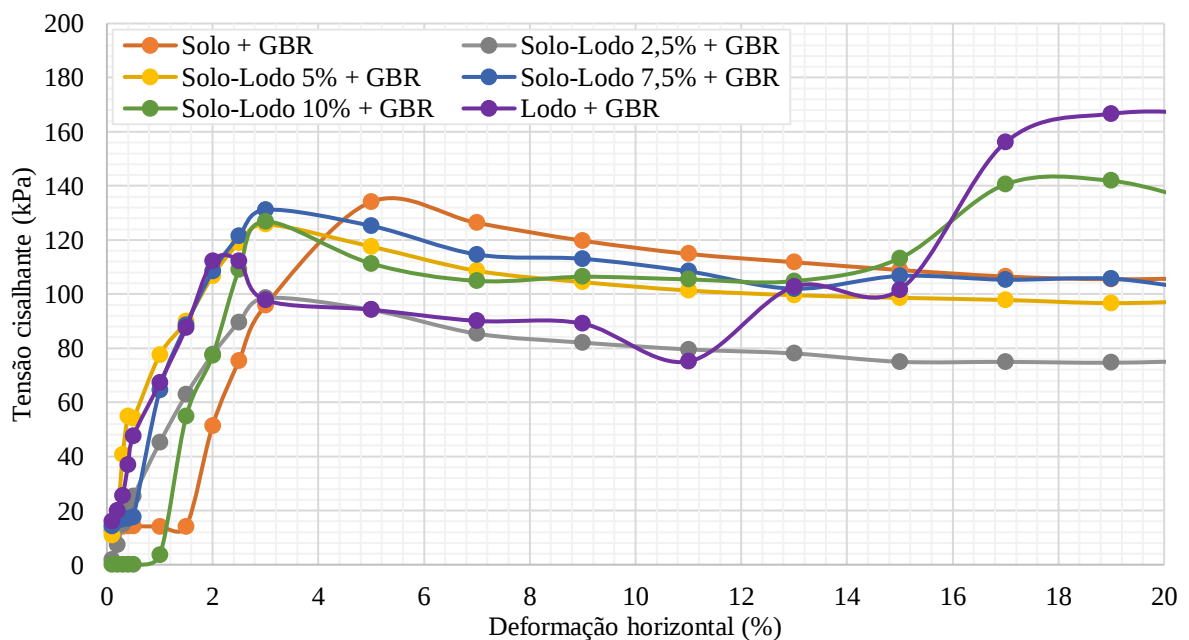
Gráfico 25 – Tensão x Deformação – 50 kPa – Barreira geossintética



Fonte: A autora, 2024.

Sob a tensão de 50 kPa as amostras de solo-lodo 10% + geomembrana e de lodo + geomembrana apresentaram o mesmo comportamento visto no Gráfico 25. As tendências observadas no Gráfico 24 e no Gráfico 25 poderiam ter sido ocasionadas por falhas na moldagem das amostras em conjunto com o fato de que é uma análise realizada em baixas tensões.

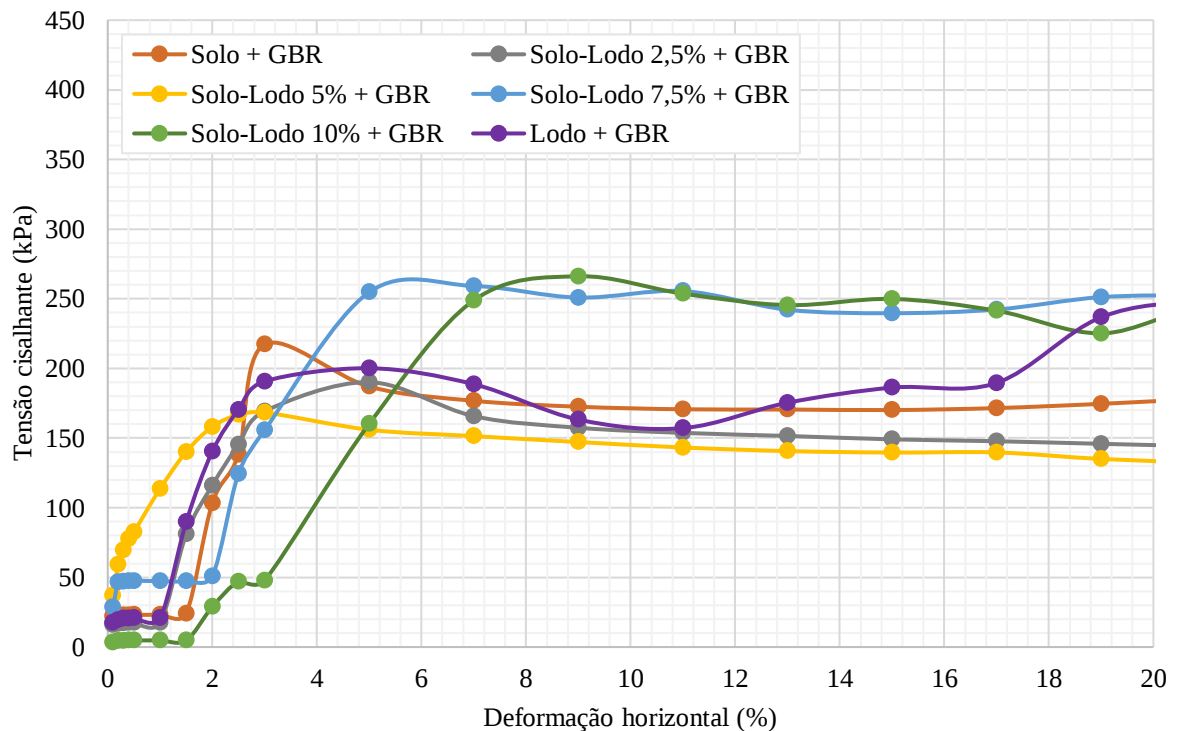
Gráfico 26 – Tensão x Deformação – 200 kPa – Barreira geossintética



Fonte: A autora, 2024.

Quando se elevam as tensões para 200 kPa, sendo essa a faixa de tensão intermediária, o comportamento das amostras acaba equilibrando e a diferença no comportamento inicial entre as amostras diminui, quando comparado às deformações iniciais das análises em outras tensões. A resistência ao cisalhamento analisada em deformações menores (2 a 4%) apresentou claros picos de resistência, tendência essa não observada anteriormente para as amostras sem geossintético e com geotêxtil não tecido.

Gráfico 27 – Tensão x Deformação – 350 kPa – Barreira geossintética



Fonte: A autora, 2024.

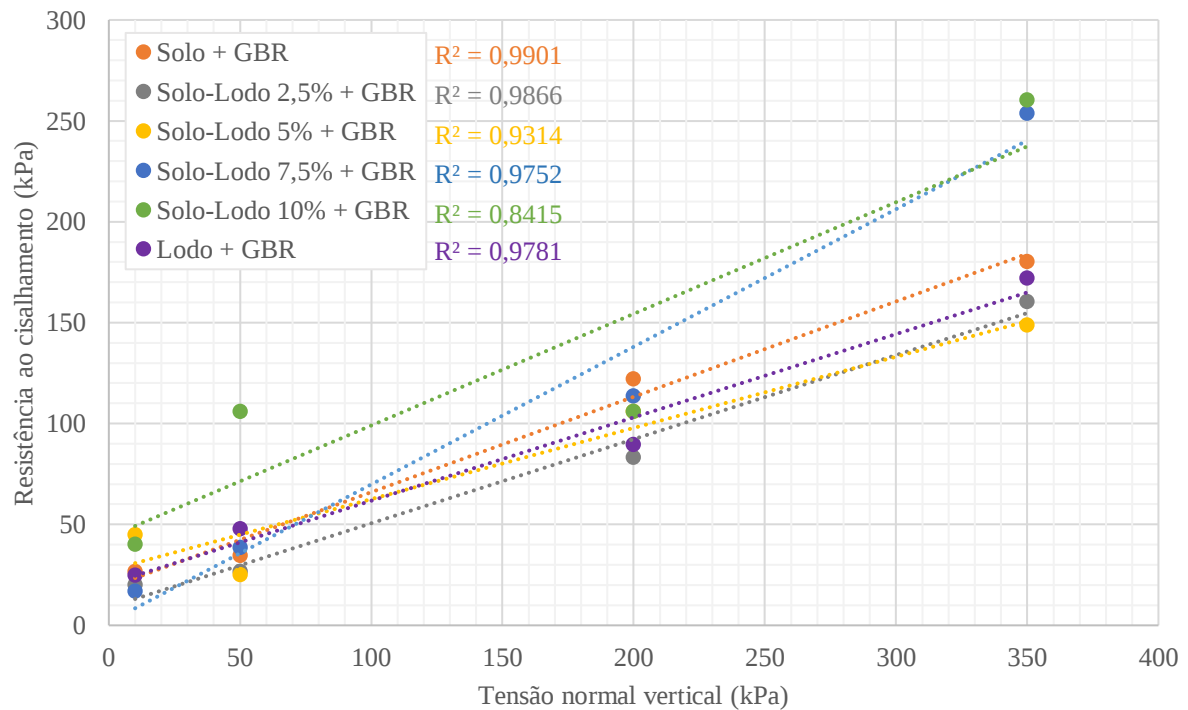
Na última tensão analisada no Gráfico 27, de 350 kPa, ainda foi observado o comportamento de pico como visto no Gráfico 26, sendo as amostras de solo-lodo 7,5% e 10% aquelas que apresentaram maior resistência de pico, na faixa de aproximadamente 250 kPa.

De forma generalizada, em todas as amostras foi observado um acréscimo elevado de resistência conforme aumentou a deformação horizontal. Porém, destaca-se para a amostra de lodo que apresentou uma elevação considerável quando comparado ao restante das amostras. Além desse ponto, todos os resultados obtidos apontaram para uma maior estabilidade dos resultados em menores deformações (na faixa de 0 a 6%).

Aplicando as metodologias citadas na análise de amostras sem geossintético para as amostras com barreiras geossintéticas, foram analisados os gráficos tensão-deformação e optou-se por adotar a faixa de 8,33% de deformação como critério de ruptura para determinação da envoltória, correspondente à 5 mm de deslocamento cisalhante. Esta limitação de deformação

foi assumida considerando a elevada dispersão dos resultados em maiores valores de deformação horizontal no ensaio de cisalhamento direto, os quais podem ter sido afetados pela presença da barreira geossintética em elevados níveis de deformação. As envoltórias de ruptura podem ser observadas no Gráfico 28 e a Tabela 19 apresenta um resumo dos resultados obtidos de intercepto coesivo e ângulo de atrito.

Gráfico 28 – Barreira geossintética - Envoltória de ruptura 8,33% de deformação horizontal



Fonte: A autora, 2024.

Tabela 19 – Resultados de intercepto coesivo e ângulo de atrito – Amostras barreira geossintética

Deformação horizontal - 8,33%			
Amostra	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	R²
Solo + GBR	18,74	25,29	0,9901
Solo-Lodo 2,5% + GBR	8,90	22,62	0,9866
Solo-Lodo 5% + GBR	27,28	19,43	0,9314
Solo-Lodo 7,5% + GBR	1,63	34,29	0,9752
Solo-Lodo 10% + GBR	43,71	28,95	0,8415
Lodo + GBR	20,45	22,44	0,9781

Fonte: A autora, 2024.

Assim como visto anteriormente nos resultados dos gráficos tensão-deformação, os resultados de intercepto coesivo e ângulo de atrito foram influenciados pelos valores de tensão cisalhante obtidos no ensaio quando submetidos a tensões vertical de 10 kPa e 50 kPa.

O intercepto coesivo apresentou uma variação crescente bem elevada quando se compara a amostra de solo + GBR, solo-lodo 5% + GBR e solo-lodo 10% + GBR. Como esse

comportamento é oposto do observado para a mesma amostra sem a presença de geossintético e como a barreira geossintética não apresenta a função conhecida de melhoramento do intercepto coesivo de amostras, entende-se como necessário repetir os ensaios para amostras com barreira geossintética para corroborar a tendência observada.

Em relação aos resultados de ângulo de atrito, a mesma tendência observada anteriormente para amostras sem geossintético e aquelas com a adição de geotêxtil se repetiu. As amostras com incorporação de lodo apresentaram valores variados de ângulo de atrito em relação ao solo + GBR, não possuindo uma tendência clara. Novamente, tal comportamento pode ter sido influenciado pelos resultados sob tensão de consolidação de 10 kPa.

Levando em consideração os resultados de envoltória de ruptura obtidos para os três tipos de amostras (sem geossintético, com geotêxtil e com barreira geossintética), pode-se realizar um comparativo de comportamento das envoltórias obtidas, como indicado na Figura 27. Destaca-se que, para realização do comparativo, foram adotadas as envoltórias de ruptura para uma deformação horizontal de 8,33%.

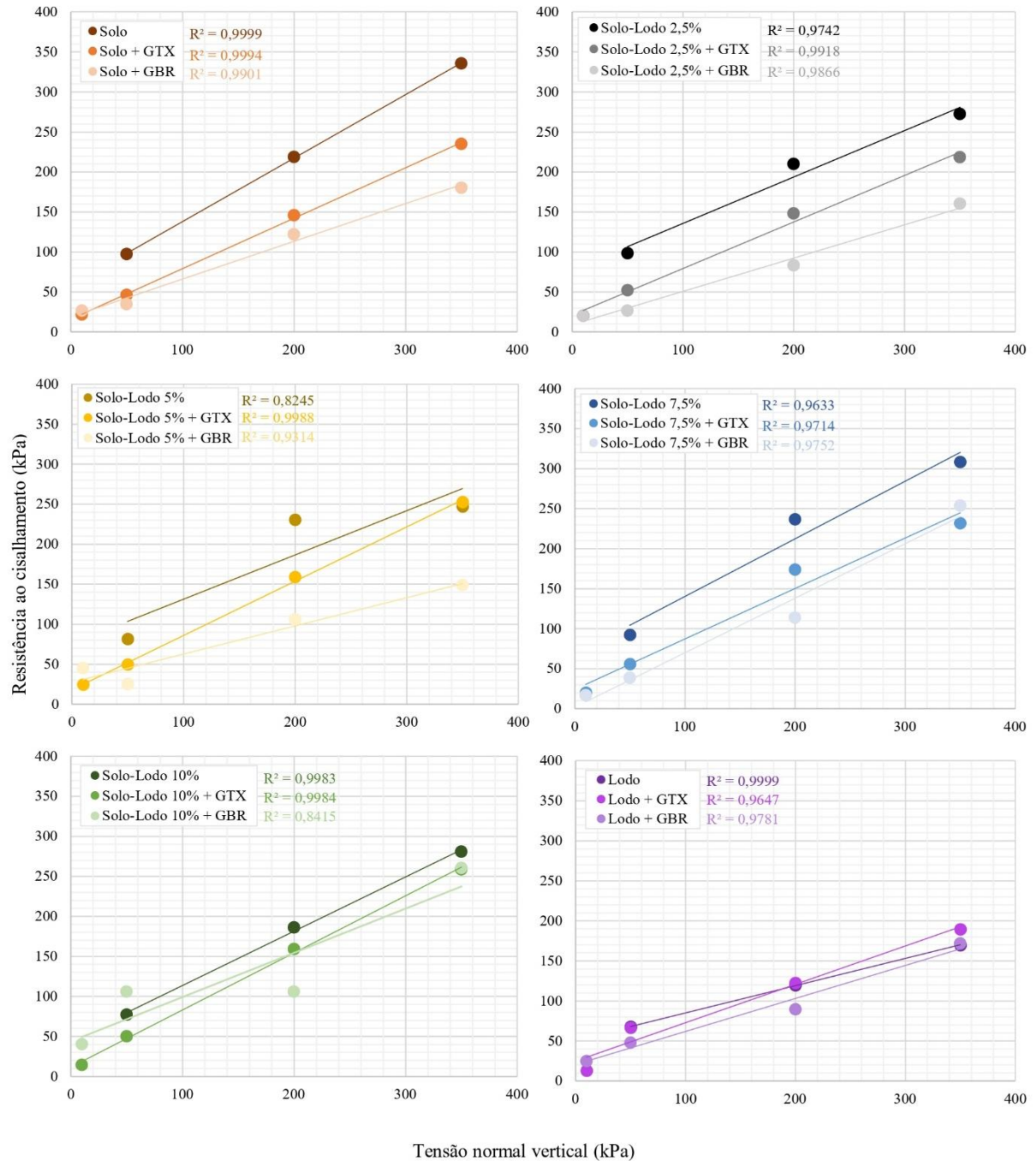
A partir do comparativo observou-se que as amostras com a barreira geossintética apresentaram valores menores de intercepto coesivo e ângulo de atrito quando comparados às amostras sem geossintético e com geotêxtil. A exceção seria a amostra de solo-lodo 10% onde sua versão com geotêxtil se apresentou abaixo da amostra com geomembrana. Esse comportamento pode ter ocorrido graças a ter sido utilizado na comparação os resultados para a deformação horizontal de 8,33% e não o de 25% que teria sido selecionado para as amostras com geotêxtil. Considerando a tendência das amostras com geotêxtil de aumento de resistência em grandes deformações, o critério de 8,33% para o GTX não corresponde a real capacidade de atuação, porém é relevante para ser comparável com as amostras GBR.

Destaca-se que, para esse critério de deslocamento horizontal, a amostra de lodo + GTX apresentou resistência ao cisalhamento maior do que a amostra sem geossintético em um estado de tensões maior. Esse comportamento pode se relacionar com a tendência de o material fino do lodo interligar com as aberturas do geotêxtil, criando uma maior resistência ao cisalhamento.

Analisando a Figura 27, percebe-se que, em todos os casos solo-lodo, tipicamente se observa a envoltória das amostras sem a presença de geossintético acima, seguido pela amostra GTX e a amostra GBR. O mesmo comportamento ocorre para o lodo *in natura*, porém quando compara todas as envoltórias na mesma escada, é visível que a variação de resistência ao cisalhamento para o lodo é menor do que para as outras amostras. Essa é uma indicação de que os parâmetros de comportamento do lodo são predominantes em relação à adição de algum

geossintético. Considerando a proximidade de comportamento da amostra solo-lodo 10%, confirma-se que, conforme aumenta a incorporação de lodo nas amostras de solo, maior é o impacto do lodo de ETA na matriz de solo.

Figura 27 – Comparativo entre envoltórias de ruptura – Sem geossintético, geotêxtil e barreira geossintética



Fonte: A autora, 2024.

Em relação à possível aplicação de misturas solo-lodo, com ou sem a presença de geossintéticos, em aterros sanitários, observou-se que os valores de intercepto coesivo para

resíduos sólidos urbanos (RSU) se apresentaram com alta variabilidade, como possível de apontar através da Tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento – RSU

Pesquisador	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Landva e Clark (1990)	19 a 22	24 a 39
Jessberger (1995)	41 a 51	42 a 49
Richardson e Reynolds (1991)	10	18 a 43
Gabr e Valero (1995)	0 a 27,5	20,5 a 39
Grecco e Oggeri (1993)	16	21
IPT (1991)	13,5	22
Pagotto e Rimoldi (1987)	29	22
Howland e Landva (1992)	17	33
Withiam <i>et al.</i> (1995)	10	30
Kavazanjian <i>et al.</i> (1995)	24	0
	0	33
Van Impe (1998)	22	0
	0	38
Carvalho (1999)	42 a 60	21 a 27
	13,5	22
Kaimoto e Cepollina (1996)	16	22
	16	28
Vilar <i>et al.</i> (2006)	20	22
Azevedo <i>et al.</i> (2006)	10	28
Suzuki (2012)	13,5	22
Ribeiro (2007)	10	28

Fonte: Boscov, 2008 – modificado.

Tabela 21 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento – Lodo de ETA

	Amostra	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Lodo <i>in natura</i>	Sem geossintético ($\varepsilon_h = 25\%$)	52,36	26,06
	Geotêxtil ($\varepsilon_h = 25\%$)	32,26	36,84
	Barreira geossintética ($\varepsilon_h = 8,33\%$)	20,45	22,44

Fonte: A autora, 2024.

A coesão pode variar entre 0 a 60 kPa e o ângulo de atrito entre 20,5 e 49° (Boscov, 2008). A partir da análise da Tabela 21, constata-se que as amostras de lodo sem geossintético, com geotêxtil e com barreira geossintética se encontram dentro da faixa de valores determinada pela Tabela 20.

Nesse contexto, pode-se considerar necessária a análise prévia do comportamento do lodo *in natura*, visto que, mesmo utilizando geossintéticos para melhoramento de características, o lodo não atenderia aos possíveis critérios. Por esse motivo, é relevante o aprofundamento dos estudos com mistura solo-lodo como opção de aplicação do resíduo, preservação de parcela de solo como recurso natural e mitigação do volume diário de rejeitos descartado em aterros.

5 CONCLUSÃO

A partir dos pontos levantados, pode-se considerar que o lodo de ETA possui grande potencial para ser integrado em misturas de solo destinadas a aplicações em aterros sanitários, principalmente quando em conjunto com geossintéticos.

A caracterização geotécnica do lodo determinou que o lodo da ETA Iraí apresenta altas porcentagens de alumínio e ferro em sua composição, proveniente dos coagulantes utilizados no processo de tratamento da água e do solo de origem da região. Além disso, o lodo pode ser classificado como uma argila orgânica (OH), a partir do SUCS, e sua incorporação em porcentagens de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% não influenciou os parâmetros de limites de Atterberg das misturas, porém influenciou, mesmo que minimamente, os valores de peso específico real dos grãos. Sua característica semissólida influenciou na realização de ensaios de compactação com as misturas solo-lodo e consequentemente a montagem dos ensaios de determinação do coeficiente de condutividade hidráulica.

A realização da pesquisa corroborou a análise de que o lodo, quando incorporado em quantidades moderadas (até 10%), contribui para a sustentabilidade de obras geotécnicas ao reutilizar um material frequentemente descartado de maneira inadequada no ambiente. Mesmo quando descartado corretamente em aterros sanitários, o lodo in natura pode possuir parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito desfavoráveis quando comparados com resíduos sólidos urbanos (RSU), o que pode ocasionar em prejuízo à estabilidade do aterro.

Nesse contexto, apesar de lodo de ETA, por si só, apresentar maior compressibilidade e menor resistência ao cisalhamento quando comparado à matriz de solo, a utilização do lodo em incorporação com o solo em camadas de base, cobertura e coberturas diárias, promove a economia de uso de recursos minerais naturais provenientes de jazidas, economiza espaço para o uso de RSU e não promove a piora de parâmetros de resistência médios do RSU lançado no aterro. Esse ponto se destaca especialmente para a incorporação de 7,5% de lodo, visto que foi a maior adição do resíduo onde os parâmetros de resistência apresentaram valores próximos do solo, ou seja, a influência de diminuição da resistência foi menor.

Apesar das limitações citadas, adicionar a presença de um terceiro elemento, o geossintético, pode minimizar essas desvantagens dependendo da forma de aplicação. A utilização de geossintéticos, especialmente geotêxteis, promove o aumento da resistência ao cisalhamento em estados de tensões elevadas, aumentando o campo de possibilidades de utilização do resíduo do tratamento de água bruta.

Os dados obtidos também indicam que a variabilidade nas propriedades do lodo de ETA, determinada por fatores como a origem e a qualidade da água bruta, requer uma caracterização geotécnica específica para cada aplicação, assegurando que as misturas solo-lodo atendam aos padrões desejados de qualidade e desempenho.

De modo geral, políticas e práticas de gerenciamento de resíduos podem se beneficiar da adoção de misturas de solo-lodo com reforço de geossintéticos, proporcionando uma solução prática para o aproveitamento do lodo de ETA, agregando valor ao resíduo sem a necessidade de manipulação prévia e promovendo a sustentabilidade ambiental em obras de infraestrutura.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos pontos levantados no presente trabalho e nas observações realizadas ao longo da pesquisa, pode-se obter sugestões de trabalhos futuros:

- Avaliação de comportamento mecânico e hidráulico de misturas com diferentes tipos de solo, lodo de ETA e geossintéticos;
- Realização de ensaios de cisalhamento direto com os mesmos teores de incorporação de lodo com moldes de corpo de provas com maiores dimensões;
- Avaliação do desempenho mecânico de misturas de solo e lodo de ETA com geossintéticos em aplicações de subleito e sub-base de pavimentos;
- Estudo do reforço de taludes em solo reforçado com lodo de ETA e geossintéticos;
- Modelagem numérica do comportamento mecânico de misturas de solo e lodo de ETA com geossintéticos em ensaios triaxiais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. M. *et al.* Caracterização geotécnica do lodo da estação de tratamento de água Iraí com aplicação de ensaios de laboratório e ensaio MEV. *In: XIII SIMPÓSIO DE PRÁTICAS DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL*, 2023, Ponta Grossa, PR. **Anais [...]**. Ponta Grossa, PR: ABMS, 2023. p. 520.
- ALMEIDA, M. M. *et al.* Influência da Adição de Lodo de ETA em Solo Laterítico na Resposta de Compactação e no Comportamento Hidráulico. *In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENG. GEOTÉCNICA, X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHEIROS GEOTÉCNICOS JOVENS*, 2024, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Balneário Camboriú: ABMS, 2024.
- ANIBELE, R. *et al.* Análise em modelo de laboratório da substituição de filtro de areia por geocomposto em barragens de terra. *In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 2022, Campinas. **Anais [...]**. ABMS p. 8, 2022.
- ARDILA, M. A. A. *et al.* Geotextile Tube Dewatering Performance Assessment: An Experimental Study of Sludge Dewatering Generated at a Water Treatment Plant. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 8129, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2008 a 2022**. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 14 maio 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 2016. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 2017. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia, Rio de Janeiro, 1995. 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, 2016. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 2018. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação, Rio de Janeiro, 2020. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 12770**: Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo, Rio de Janeiro, 2022. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 13600**: Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C, Rio de Janeiro, 2022. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, Rio de Janeiro, 2000. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 16853**: Solo – Ensaio de adensamento unidirecional, Rio de Janeiro, 2020. 22p.

ASTM. **ASTM D2435/D2435M-AA**: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011. Disponível em: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?D2435>. Acesso em: 22 jan. 2024.

AVANCINI, L. L. D. S.; MULLER, M.; VIDAL, D. D. M. Application of polyelectrolytes for improving the dewatering performance of drinking water treatment sludge using geotextiles. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s. l.], v. 16, n. 5, p. 1–14, 2021.

AYDILEK, A. H.; EDIL, T. B. Filtration Performance of Woven Geotextiles With Wastewater Treatment Sludge. **Geosynthetics International**, [s. l.], Disponível em: <https://www-icevirtuallibrary-com.ez82.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1680/gein.9.0210>. Acesso em: 12 jul. 2024.

BASIM, S. C. **Physical and geotechnical characterization of water treatment plant residuals**. 1999. 127 f. Doutorado - New Jersey Institute of Technology, EUA, 1999. Disponível em: <https://digitalcommons.njit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2032&context=dissertations>. Acesso em: 18 set. 2024.

BERGADO, D. *et al.* Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 24, n. 6, p. 371–393, 2006.

BIZARRETA-ORTEGA, J. C.; CAMPOS, T. M. P. Caracterização do lodo de uma estação de tratamento de chorume visando seu emprego em coberturas finais de aterros sanitários. 2011. Disponível em: <https://zenodo.org/record/3948902>. Acesso em: 10 jul. 2024.

BLOINSKI, M. *et al.* Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG): classificação do solo local e parâmetros de resistência ao cisalhamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2020, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: ABMS, 2020. p. 3845–3852. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0484.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2023.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo, SP, Brasil: Oficina de Textos, 2008.

BOSCOV, M. E. G.; TSUGAWA, J. K.; MONTALVAN, E. L. T. Beneficial Use of Water Treatment Sludge in Geotechnical Applications as a Sustainable Alternative to Preserve Natural Soils. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 17, p. 9848, 2021.

BRASIL. Lei Federal Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm> Acesso em 18 set 2024.

CANIANI, D. *et al.* Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications. **Waste Management**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 1461–1468, 2013.

CASTILHOS JUNIOR, A.; PRIM, E.; PIMENTEL, F. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 86–97, 2012.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: Avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. 337 f. - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CHIARELLO, G. P. **Interação de interfaces entre solo e geomembranas por meio de ensaios de cisalhamento direto**. 2022. 177 f. Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

CORDEIRO, J. S.; CAMPOS, J. R. O impacto ambiental provocado pela indústria da água de abastecimento [CD-ROM]. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, 1998, Lima. **Anais [...]**. Lima: AIDIS, 1998. p. 12. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/529138f2-eafa-4a3b-8232-19fc1d45075c/prod_001963_sysno_1012976. Acesso em: 18 set. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011. Brasília, DF: CONAMA, 2011.

COSTA, C. M. L. **Fluência de geotêxteis**. 1999. Mestrado em Geotecnia - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-09102006-085114/>. Acesso em: 14 maio 2024.

DANIEL, D. E. (org.). **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Boston, MA: Springer US, 1993. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-3070-1>. Acesso em: 10 jul. 2024.

DELGADO, J. V. C. **Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada**. 2016. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/389-msc-pt-2016/4674-jessica-vanessa-colmenares-delgado>. Acesso em: 18 set. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093: Solos – Determinação da densidade real, 1994. 4 p.

DUARTE, A. F. da S. **Aplicação de Geossintéticos na Impermeabilização e Selagem de Aterros.pdf**. 2009. 159 f. Dissertação - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

ELK, A. G. P. V.; CORRÊA, L. R.; RITTER, E. Análise de recalques em longo prazo no vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 24, p. 547–557, 2019.

FERREIRA, K. S. D. M. **Comportamento geotécnico de misturas de argila laterítica com lodo de estação de tratamento de água para uso em obras de terra**. 2020. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-03052021-103839/>. Acesso em: 1 jun. 2023.

FERREIRA, S. R. D. M. *et al.* Hydraulic conductivity and soil-sewage sludge interactions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 1569–1577, 2011.

FIEDLER, D. T. **Análise da incorporação do lodo de uma estação de tratamento de água (ETA) em solo para utilização em camadas impermeabilizantes de aterro sanitário**. 2023. 87 f. Dissertação - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2023.

GOMES, S. de C. *et al.* Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 145, p. 148–159, 2019.

GONÇALVES, F. *et al.* Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, [s. l.], v. 65, n. 205, p. 5–14, 2017.

GONÇALVES, A. D. M. D. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 1174–1184, 2013.

GREENWOOD, J. H.; SCHROEDER, H. F.; VOSKAMP, W. **Durability of Geosynthetics**. 243. ed. [S. l.: s. n.], 2012.

GUERRA, R. C. **Caracterização e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário**. 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/d50461a7-b44e-498b-a944-f87873e0447e/content>. Acesso em: 18 set. 2024.

HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria development for water treatment plant residual monofills**. EUA: American Water Works Association, 1997.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. [S. l.]: Cempre-Sp, 2010.

KNIERIM, L. da S.; DELONGUI, L.; BARBOSA PINHEIRO, R. J. Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico. **Revista DAE**, [s. l.], v. 71, n. 240, p. 51–64, 2023.

LAKE, C. B. *et al.* Aluminium migration through a geosynthetic clay liner. **Geosynthetics International**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 201–210, 2007.

LAVOIE, F. L.; BUENO, B. D. S.; LODI, P. C. EVALUATION OF STRESS CRACKING ON GEOMEMBRANES AFTER ACCELERATED TESTS. **DYNA**, [s. l.], v. 81, n. 183, p. 215, 2014.

LOCASTRO, J. K.; ANGELIS, B. L. D. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 200, 2016.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. **Waste Management**, [s. l.], v. 31, n. 5, p. 966–977, 2011.

MAZZUTTI, E.; KLAMT, R.; FARO, V. Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. **Soils and Rocks**, [s. l.], v. 46, n. 1, p. e2023011222, 2023.

MELLO, J. B.; LAVOIE, F. L.; LODI, P. C. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DANOS NA PERMEAÇÃO E DIFUSÃO DE GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS. **HOLOS**, [s. l.], v. 8, p. 1–19, 2021.

MONTALVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da Estação de Tratamento de Água Cubatão**. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-02122016-091816/>. Acesso em: 1 jun. 2023.

NORBERTO, A. de S. *et al.* Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 108–116, 2020.

O'KELLY, B. C. Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling. **Geotechnical Research**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 148–179, 2016.

OLIVEIRA, G. L. A. D.; VIDAL, D. D. M. Influence of sand addition in the early stage retention of fine sludge dewatering by geotextile. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 1, 2020.

OWNTEC Soluções em Engenharia Ltda. MS 102 – CISALHAMENTO AUTOMÁTICO. [Manual de instruções]. Santa Cruz do Sul: Owntec, 2023.

PALERMO, G. C.; GOMES, A. P. P. **Tratamento e gestão de resíduos**. [S. l.]: Uva, 2017.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PALMEIRA, E.; GARDONI, M. D. G.; ARAÚJO, G. L. Geossintéticos em Engenharia Geotécnica e Geoambiental: avanços e perspectivas. **Geotecnia**, [s. l.], n. 152, p. 337–368, 2021.

PIEIDADE JUNIOR, C. R. C. **Análise da potencialidade de alguns solos não lateríticos para utilização em barreiras impermeáveis**. 2003. Mestrado em Geotecnia - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-07052008-150323/>. Acesso em: 20 abr. 2024.

PIMENTEL, K. C. A.; PALMEIRA, E. M. Reabilitação de Barreiras Impermeabilizantes com Geossintéticos. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL E VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 2011, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2011.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PITANGA, H. N.; GOURC, J.-P.; VILAR, O. M. Resistência ao cisalhamento de interface entre geossintéticos de reforço e solo de cobertura de aterros sanitários. [s. l.], 2009.

PRIM, E. C. C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. 2011. 279 f. Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/103375>. Acesso em: 1 jun. 2023.

QASIM, S. R.; CHIANG, W. Sanitary Landfill Leachate - Generation, Control and Treatment. [s. l.], 1994.

ROCCA, A. C. C. *et al.* **Resíduos sólidos industriais**. São Paulo: CETESB, 1993.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Cerâmica**, [s. l.], v. 59, p. 551–556, 2013.

RODRIGUEZ, T. T. *et al.* Estudo da compactação de lodo de ETA para uso em aterros sanitários. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL E VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS REGEO/GEOSSITÉTICOS, 2011, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: [s. n.], 2011.

ROQUE, A.; MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da estação de tratamento de água Taiaçupeba. **Geotecnia**, [s. l.], n. 151, p. 33–52, 2021.

SANTIAGO JUNIOR, A. *et al.* Aterro sanitário: relevância e técnicas de impermeabilização do solo. **Diversa Revista Eletrônica Interdisciplinar**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 142–153, 2021.

SCAPIN, J. **Avaliação da utilização de solo e lodo de estação de tratamento de água como material de cobertura e de fundo em células experimentais de resíduos sólidos urbanos**. 2021. 197 f. Doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/22488>. Acesso em: 1 jun. 2023.

SILVA, A. R. D. **Comportamento geotécnico de misturas de areia argilosa laterítica e lodo da estação de tratamento de água Taiaçupeba, município de Suzano, São Paulo**. 2021. 190 f. Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-28092021-153915/>. Acesso em: 1 jun. 2023.

SOUZA, L. O. D. USO DE GEOTÊXTIL PARA A DESIDRATAÇÃO DE LODO DA ETE VILA DA BARCA-PA. [s. l.], 2016.

SUSIN, B. **Estudo de liners compostos por solo local e resíduos de construção e demolição reciclados para impermeabilização inferior de aterros sanitários.pdf**. 2020. 177 f. Dissertação - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.

TEIXEIRA, S. R. *et al.* The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 53, n. 4, p. 561–565, 2011.

VALENTIN, C. A. **Estudo da degradação de geomembrana de polietileno de alta densidade de 2,5 mm de espessura frente à gasolina, óleo diesel e álcool combustível**. 2008. Mestrado em Química Analítica - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75132/tde-24082009-172014/>. Acesso em: 13 maio 2024.

VANDERMEYDEN, C.; CORNWELL, D. A. **Nonmechanical Dewatering of Water Plant Residuals**. EUA: AWWA Research Foundation, 1998. Disponível em: Acesso em: 18 set. 2024.

VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. [S. l.]: Editora Edgard Blucher, 2022.

VIDAL, I. G. Atrito de interface & geomembranas de PEAD. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 2007, Recife, PE. **Anais [...]**. Recife, PE: [s. n.], 2007.

WANG, M. C. *et al.* Engineering Behavior of Water Treatment Sludge. **Journal of Environmental Engineering**, [s. l.], v. 118, n. 6, p. 848–864, 1992.

WATANABE, Y. *et al.* Batch Leaching Test Focusing on Clod Size of Drinking Water Sludge and Applicability to Long-Term Prediction Using Column Leaching Test. In: GEO-FRONTIERS 2011, 2011. **Anais [...]**. Geo-Frontiers 2011, 2011. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41165%28397%29110>. Acesso em: 18 set. 2024.

WORKMAN, J. P.; KEEBLE, R. L. Design and Construction of Liner Systems. **Sanitary Landfilling: Process, Technology and Enironmental Impact**, [s. l.], p. 8, 1989.

XIA, Z. **Geotechnical characterization of water treatment plant residuals**. 1993. 102 f. Dissertação (Mestrado) - New Jersey Institute of Technology, EUA, 1993. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/232277129.pdf>. Acesso em: 18 set. 2024.

ZHANG, H. Study on the Internal Force of Geomembrane of Landfill in Heavy Metal Contaminated Area. **Earth Sciences Research Journal**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 111–118, 2020.