

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Luciéle da Silva Knierim

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DO USO
DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM
MISTURAS COM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO**

Santa Maria, RS
2020

Luciéle da Silva Knierim

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DO USO DO LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM MISTURAS COM SOLO ARGILOSO
LATERÍTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Delongui

Santa Maria, RS
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Knierim, Luciéle da Silva
ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DO USO DO
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM MISTURAS COM
SOLO ARGILOSO LATERÍTICO / Luciéle da Silva Knierim.-
2020.
200 p.; 30 cm

Orientador: Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro
Coorientador: Lucas Delongui
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2020

1. Resíduos sólidos 2. Lodo de ETA 3. Camadas de aterro
sanitário 4. Resistência ao cisalhamento 5. Viabilidade
técnica I. Pinheiro, Rinaldo Jose Barbosa II. Delongui,
Lucas III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFEM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

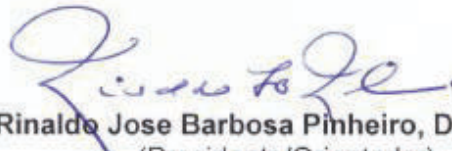
Declaro, LUCIÉLE DA SILVA KNIERIM, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Luciéle da Silva Knierim


**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DO USO DO LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM MISTURAS COM SOLO ARGILOSO
LATERÍTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovada em 17 de março de 2020:



Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Lucas Delongui, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



Magnos Baroni, Dr. (UFSM)



Jaelson Budny, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus que me deu sabedoria e paz de espírito. Aos meus pais, Valdir e Ana Claudia, pelo amor, companheirismo e dedicação de toda uma vida. À minha irmã, Sabrina, pelo apoio. Ao meu noivo Rodrigo, quem eu tanto amo e admiro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela oportunidade de vivenciar esta experiência.

Em especial aos meus orientadores Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro e Lucas Delongui pelo conhecimento, paciência e incentivo durante o decorrer deste trabalho.

Aos meus pais, pelo carinho, amor, incentivo e companheirismo, sem os quais esse trabalho não teria chegado ao fim.

Ao meu noivo Rodrigo André Klamt, por seu incentivo, paciência e companheirismo.

À minha irmã, Sabrina, pela torcida e apoio.

Aos meus colegas do GEOMA pelo auxílio e apoio prestados durante a realização desta pesquisa.

Ao professor Magnos Baroni pela participação na banca examinadora e sugestões em algumas etapas da pesquisa.

Ao professor Jaelson Budny pela disponibilidade em compartilhar ideias e realizar a avaliação como membro da banca examinadora.

Aos demais professores pelos ensinamentos passados ao longo do mestrado.

A unidade da CORSAN do município de Santa Maria/RS e a CRVR de Giruá/RS pelo fornecimento dos materiais utilizados nessa pesquisa.

A URI, campus de Frederico Westphalen/RS, por disponibilizar o Laboratório de Solos e Pavimentação para a realização de alguns ensaios.

Ao LACER da UFRGS por disponibilizar o ensaio de Granulometria a Laser sem custos. E ao LACHEM da UFSM por disponibilizar o ensaio de Fluorescência de Raio X, também sem custos.

Ao técnico do laboratório de geotecnia da UFRGS, Jair da Silva, pelos ensinamentos de montagem e operação do equipamento triaxial da Wille Geotecnik.

Aos técnicos do LMCC da UFSM, em especial ao Eduardo Druzian, pela ajuda na coleta dos materiais utilizados e disponibilidade sempre que necessário.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DO USO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM MISTURAS COM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO

AUTORA: Luciéle da Silva Knierim
ORIENTADOR: Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro
COORIENTADOR: Lucas Delongui

As águas provenientes dos mananciais são de extrema importância para o abastecimento da população. No entanto, o resíduo que acumula no processo de sedimentação, chamado de lodo de estação de tratamento de água (LETA), necessita de adequada disposição. O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico e hídrico do uso de lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico, para aplicação em camadas de aterros sanitários. A metodologia aplicada neste estudo consistiu em ensaios de caracterização física e mecânica, análise química, obtenção das curvas característica dos materiais, ensaio de permeabilidade, ensaios mecânicos de resistência à compressão simples, de cisalhamento direto e de compressão triaxial. Para isso, nesta pesquisa foram avaliadas misturas com a substituição parcial de solo por LETA nas proporções de 15%, 30% e 50%. Com relação a classificação dos materiais verificou-se que o solo é argiloso e que conforme se aumenta a substituição do solo por LETA há redução nas frações de silte e argila e aumento na fração arenosa. Na classificação MCT, o solo e as misturas solo+LETA apresentaram comportamento de materiais lateríticos. A caracterização química indicou a predominância do argilomineral caulinita, em todos materiais estudados. No ensaio de permeabilidade, o material mais impermeável foi a mistura 85% Solo + 15% LETA, com k igual a $7,82E-10$ m/s. A resistência à compressão simples das misturas de solo+LETA apresentaram melhoria se comparado ao solo, com melhor desempenho apresentado pela mistura 70% Solo + 30% LETA, com resistência 28,73% superior ao solo. Com relação à resistência ao cisalhamento, o ângulo de atrito aumentou conforme aumentou-se a porcentagem de LETA no solo, reduzindo, assim, a coesão dos materiais. O solo apresentou maior valor de coesão efetiva (27,69 kPa) e menor ângulo de atrito efetivo ($24,06^\circ$), enquanto a mistura 50% Solo + 50% LETA apresentou melhor desempenho na resistência por atrito ($42,03^\circ$) e pior desempenho na coesão (16,30 kPa). Do solo para mistura 50% Solo + 50% LETA houve uma redução na coesão efetiva de 41,13% e um aumento no ângulo de atrito efetivo de 74,68%. Em termos gerais definiu-se a mistura composta de 85% Solo + 15% LETA como a melhor para aplicação em camadas de base e cobertura de aterros. No entanto, ressalta-se que a utilização das misturas, em especial a 50% Solo + 50% LETA, em camadas diárias de aterros sanitários seria uma alternativa ambientalmente benéfica. Essas aplicações trariam vantagens na destinação do resíduo e redução de consumo de recursos naturais.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos. Lodo de ETA. Camadas de Aterro Sanitário. Resistência ao Cisalhamento. Viabilidade Técnica.

ABSTRACT

STUDY OF THE MECHANICAL AND HYDRIC BEHAVIOR OF THE USE OF WATER TREATMENT STATION SLUDGE IN MIXTURES WITH LATERITIC CLAY SOIL

AUTHOR: Luciéle da Silva Knierim
ADVISOR: Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro
CO-ADVISOR: Lucas Delongui

The waters coming from the springs are extremely important for the supply of the population. However, the residue that accumulates in the sedimentation process, called water treatment station sludge (WTSS), needs an adequate disposal. The main objective of this work is to evaluate the mechanical and hydric behavior of the use of water treatment station sludge in mixtures with lateritic clay soil, for application in landfill layers. The methodology applied in this study consisted of physical and mechanical characterization tests, chemical analysis, obtaining the characteristic curves of the materials, permeability test, mechanical tests of resistance to simple compression, direct shear and triaxial compression. For this, in this research, mixtures were evaluated with partial replacement of soil by WTSS in the proportions of 15%, 30% and 50%. Regarding the classification of materials, it was found that the soil is clayey and that as the substitution of the soil for WTSS increases, there is a reduction in the fractions of silt and clay besides an increase in the sandy fraction. In the MCT classification, the soil and the mixtures of soil + WTSS showed behavior of lateritic materials. The chemical characterization indicated the predominance of clay mineral kaolinite, in all studied materials. In the permeability test, the most impermeable material was the mixture 85% soil + 15% WTSS, with k equal to $7.82E-10$ m/s. The resistance to simple compression of soil + WTSS mixtures showed improvement compared to soil, with better performance presented by the mixture 70% soil + 30% WTSS, with resistance 28.73% higher than the soil. Regarding to shear resistance, the friction angle increased as the percentage of WTSS in the soil increased, thus reducing the cohesion of materials. The soil showed higher effective cohesion value (27.69 kPa) and lower effective friction angle (24.06°), while the 50% soil + 50% WTSS mixture showed better performance in friction resistance (42.03°) and worse performance in cohesion (16.30 kPa). From soil to mixture 50% soil + 50% WTSS there was a reduction in effective cohesion of 41.13% and an increase in the effective friction angle of 74.68%. In general terms, the mixture composed of 85% soil + 15% WTSS was defined as the best for application in base layers and landfill cover. However, it is noteworthy that the use of mixtures, especially 50% soil + 50% WTSS, in daily layers of landfills would be an environmentally beneficial alternative. These applications would bring advantages in the destination of the waste and reduction of consumption of natural resources.

Keywords: Solid Waste. WTP Sludge. Landfill Layers. Shear strength. Technical viability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – ETA de ciclo completo.....	21
Figura 2 - Curvas granulométricas de lodos de ETAs dos EUA que utilizam diferentes coagulantes.	32
Figura 3 - Curvas de compactação em função do teor de sólidos de LETAs dos EUA com secagem prévia.	35
Figura 4 – Esquema de composição de um aterro sanitário.	38
Figura 5 – Representação de camada homogênea de argila compactada e os caminhos de preferência de água.	39
Figura 6 – Cobertura evapotranspirativa monolítica.....	41
Figura 7 – Cobertura evapotranspirativa por barreira capilar.	41
Figura 8 - Sistemas de camada de base para aterros sanitários segundo recomendações de alguns países.	47
Figura 9 - Fluxograma da pesquisa.....	56
Figura 10 - Localização da cidade de Giruá/RS.	58
Figura 11 - Local de coleta do solo – CRVR – Unidade de Giruá/RS.	58
Figura 12 – (a) Ponto de coleta do solo na CRVR; (b) solo armazenado em sacos no laboratório.	60
Figura 13 – (a) LETA na bombona plástica; (b) armazenamento do LETA em laboratório.	60
Figura 14 – (a) Solo peneirado; (b) LETA peneirado.....	61
Figura 15 – (a) Equipamento de compactação miniatura; (b) amostras em imersão.....	67
Figura 16 – Penetrômetro e pastilhas utilizadas no método das pastilhas para classificação MCT.	67
Figura 17 – (a) Montagem da amostra no permeâmetro; (b) ensaio pela NBR 14545 em andamento; (c) ensaio pela metodologia MCT em andamento.	70
Figura 18 – (a) Moldagem das amostras; (b) as amostras em imersão.	72
Figura 19 – Amostras no dessecador.....	72
Figura 20 – (a) Coluna de areia; (b) amostras dentro da coluna de areia.	74
Figura 21 – Aparelho extrator de Richards.....	74
Figura 22 – (a) Corpos de prova após moldagem; (b) ensaio de RCS em andamento.	76
Figura 23 - Equipamento para realização do ensaio de cisalhamento direto.	78
Figura 24 - Equipamento de ensaio de compressão triaxial.....	80
Figura 25 – (a) Moldagem do CP; (b) CP antes da ruptura; (c) ensaio de compressão triaxial em andamento; (d) CP após ruptura.....	82
Figura 26 – Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – Solo.....	87
Figura 27 – Peso específico real dos grãos <i>versus</i> porcentagem de LETA.	89
Figura 28 – Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – 85% Solo + 15% LETA.	90
Figura 29 – Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – 70% Solo + 30% LETA.	91
Figura 30 – Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – 50% Solo + 50% LETA.	91
Figura 31 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – Solo.	97
Figura 32 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – LETA.....	98

Figura 33 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – 85% Solo + 15% LETA.....	98
Figura 34 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – 70% Solo + 30% LETA.....	99
Figura 35 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – 50% Solo + 50% LETA.....	99
Figura 36 – Ábaco de classificação MCT pelo método de perda de massa por imersão para o solo e misturas solo+LETA.....	103
Figura 37 – Ábaco de classificação MCT pelo método das pastilhas para o solo e misturas solo+LETA.....	104
Figura 38 – Curvas de compactação média na energia Proctor Intermediária para as misturas em estudo.....	114
Figura 39 – Curvas características do solo e misturas solo+LETA.....	120
Figura 40 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento e variação volumétrica x deslocamento do solo (a) natural e (b) inundada.....	125
Figura 41 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento e variação volumétrica x deslocamento da mistura 85% Solo + 15% LETA (a) natural e (b) inundada.....	126
Figura 42 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento e variação volumétrica x deslocamento da mistura 70% Solo + 30% LETA (a) natural e (b) inundada.....	127
Figura 43 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento e variação volumétrica x deslocamento da mistura 50% Solo + 50% LETA (a) natural e (b) inundada.....	128
Figura 44 – Coesão <i>versus</i> porcentagem de LETA para o ensaio de cisalhamento direto das misturas em estudo.....	130
Figura 45 – Ângulo de atrito <i>versus</i> porcentagem de LETA para o ensaio de cisalhamento direto das misturas em estudo.....	130
Figura 46 – Envoltória de ruptura de cisalhamento, pelo ensaio de cisalhamento direto, para (a) o solo, misturas (b) 85% Solo + 15% LETA, (c) 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA.....	132
Figura 47 – Curvas tensão-deformação das misturas (a) 100% solo, (b) 85% Solo + 15% LETA, (c) e (d) 70% Solo + 30% LETA, (e) e (f) 50% Solo + 50% LETA.....	134
Figura 48 – Curvas tensão-deformação normalizadas das misturas (a) 100% solo, (b) 85% Solo + 15% LETA, (c) e (d) 70% Solo + 30% LETA, (e) e (f) 50% Solo + 50% LETA.....	135
Figura 49 – (a) Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ e (b) diagrama tensão normal x tensão cisalhante e envoltória de ruptura para o solo.....	138
Figura 50 – (a) Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ e (b) diagrama tensão normal x tensão cisalhante e envoltória de ruptura para a mistura 85% Solo + 15% LETA.....	138
Figura 51 – (a) e (c) Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ e (b) e (d) diagrama tensão normal x tensão cisalhante e envoltória de ruptura para a mistura 70% Solo + 30% LETA.....	139
Figura 52 – (a) e (c) Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ e (b) e (d) diagrama tensão normal x tensão cisalhante e envoltória de ruptura para a mistura 50% Solo + 50% LETA.....	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Coagulantes utilizados em ETAs.....	24
Quadro 2 - Estimativa da produção de LETA de acordo com o manancial de captação.	27
Quadro 3 - Composição mineralógica de LETAs de diferentes países.	29
Quadro 4 - Composição química de diferentes LETAs do Brasil.....	30
Quadro 5 - Características físicas de lodos de ETAs dos EUA com sulfato de alumínio como coagulante.	30
Quadro 6 - Características físicas de lodos de ETAs dos EUA com cloreto de polialumínio como coagulante.	31
Quadro 7 - Características físicas de um LETA do Japão.....	31
Quadro 8 - Limites de consistência de diferentes LETAs dos EUA.....	33
Quadro 9 – Características químicas de cinza de LETA de Santa Maria/RS, de um LETA de Belo Horizonte/MG e um LETA de Rabat/Marrocos.	34
Quadro 10 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento na condição natural de LETAs dos EUA.	36
Quadro 11 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento não drenado de diferentes LETAs dos EUA, Portugal e Irlanda.	37
Quadro 12 – Requisitos para coberturas de aterros sanitários.	43
Quadro 13 – Projetos de cobertura padrão para aterros de classe I, II e III na Alemanha.	44
Quadro 14 – Sistema de cobertura final mínimo exigido no EUA.....	45
Quadro 15 – Resumo de resultados de ensaios de misturas solo+LETA e do LETA da cidade de Santa Maria/RS.....	50
Quadro 16 – Parâmetros de compactação, ISC e expansão para as misturas do estudo de Vaz Coelho.	51
Quadro 17 - Parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas do estudo de Montalvan.	53
Quadro 18 – Misturas.	61
Quadro 19 – Número de curvas de compactação.	65
Quadro 20 – Número de ensaios de permeabilidade.	70
Quadro 21 – Número de ensaios de RCS.	75
Quadro 22 – Número de ensaios de cisalhamento direto e tensões normais.	77
Quadro 23 – Número de ensaios de compressão triaxial e tensões confinantes.	81
Quadro 24 – Verificação dos materiais em estudo para aplicação em camadas de aterros sanitários.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos ensaios de caracterização e classificação do solo.	85
Tabela 2 – Resultados do ensaio de peso específico real dos grãos para o solo, LETA e mistura solo+LETA.	89
Tabela 3 – Resumo dos ensaios de caracterização e classificação do solo e das misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA.	92
Tabela 4 – Resumo dos ensaios de limites de Atterberg do solo, LETA e misturas solo+LETA.	95
Tabela 5 – Resumo do ensaio de granulometria a laser para o solo, LETA e misturas solo+LETA.	100
Tabela 6 – Índices para classificação MCT pelo método de perda de massa por imersão para o solo e misturas solo+LETA.	102
Tabela 7 – Índices para classificação MCT pelo método das pastilhas para o solo e misturas solo+LETA.	104
Tabela 8 – Resumo dos resultados de análise química para o solo, o LETA e misturas solo+LETA.	105
Tabela 9 – Resultados de teor de matéria orgânica pelo ensaio de perda por ignição.	107
Tabela 10 – Resumo dos resultados de fluorescência de raio X para o solo, o LETA e misturas solo+LETA.	109
Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor Intermediário.	113
Tabela 12 – Peso específico aparente seco, umidade natural e índice de vazios de amostras do solo na condição indeformada.	115
Tabela 13 – Coeficientes de permeabilidade das misturas em estudo.	116
Tabela 14 – Resultados do ensaio de sucção – curva característica.	119
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples em amostras não saturadas.	121
Tabela 16 – Parâmetros de compactação para os ensaios de cisalhamento direto para as misturas em estudo.	124
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas em estudo.	129
Tabela 18 – Parâmetros de compactação para os ensaios de compressão triaxial para as misturas em estudo.	133
Tabela 19 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensão efetiva para as misturas em estudo.	141

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

σ'_1	Tensão principal maior efetiva
σ'_3	Tensão principal menor efetiva
σ_d	Tensão desvio
Φ	Ângulo de atrito total
Φ'	Ângulo de atrito efetivo
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_s	Peso específico real dos grãos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Alum	Sulfato de alumínio
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
c	Coesão total
c'	Coesão efetiva
CD	Ensaio consolidado drenado
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CP	Corpo de prova
CRVR	Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos
CTC	Capacidade de troca catiônica
CU	Ensaio consolidado não drenado
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
IP	Índice de plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISC	Índice de suporte califórnia
ET	Camada vapotranspirativa
ETA	Estação de tratamento de água
kPa	Quilopascal
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LACHEM	Laboratório de Análises Químicas
LETA	Lodo de estação de tratamento de água
LETE	Lodo de estação de tratamento de esgoto
LL	Limite de liquidez
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LP	Limite de plasticidade
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
MCT	Miniatura, Compactação, Tropical
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
NP	Não plástico
PAC	Policloreto de alumínio
PACL	Cloreto de polialumínio

pH	Potencial hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPI	Perda de matéria orgânica por ignição
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
RCS	Resistência à Compressão Simples
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
URI	Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
Wót	Umidade ótima

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	OBJETIVOS	18
1.1.1.	Objetivo Geral	18
1.1.2.	Objetivos Específicos	18
1.2.	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1.	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	20
2.1.1.	Tipos de coagulantes utilizados	23
2.1.2.	Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA)	24
2.1.2.1.	<i>Composição química, física e mineralógica</i>	28
2.1.2.2.	<i>Propriedades geotécnicas</i>	34
2.2.	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) E OS ATERROS SANITÁRIOS	37
2.2.1.	Composição de um aterro sanitário	37
2.2.2.	Camadas de cobertura de aterros	38
2.2.2.1.	<i>Características geotécnicas de coberturas de aterros</i>	42
2.2.3.	Camada de base de aterros	45
2.3.	APLICAÇÕES DE SOLO-LETA NA ENGENHARIA CIVIL	48
3.	METODOLOGIA	56
3.1.	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	56
3.2.	MATERIAIS UTILIZADOS	57
3.3.	MÉTODOS	59
3.3.1.	Coleta e preparo dos materiais	59
3.3.2.	Dosagem e mistura	60
3.3.3.	Ensaio de caracterização	61
3.3.4.	Análise química	63
3.3.5.	Teor de matéria orgânica – perdas por ignição	63
3.3.6.	Ensaio de compactação	64
3.3.7.	Classificações geotécnicas	65
3.3.8.	Ensaio de permeabilidade	68
3.3.9.	Determinação da curva característica (sucção)	71
3.3.10.	Ensaio de resistência à compressão simples	74

3.3.11. Ensaio de cisalhamento direto	76
3.3.12. Ensaio de compressão triaxial	78
3.3.13. Análise dos Resultados	83
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	84
4.2. CLASSIFICAÇÃO MCT.....	101
4.3. ANÁLISE QUÍMICA.....	105
4.4. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	112
4.5. PERMEABILIDADE.....	115
4.6. CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	118
4.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	121
4.8. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	123
4.8.1. Ensaio de cisalhamento direto	123
4.8.2. Ensaio de compressão triaxial – CD (Consolidado Drenado)	132
4.9. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DAS MISTURAS EM CAMADAS DE ATERRO SANITÁRIO.....	144
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
5.1. CONCLUSÕES.....	148
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL (EQUIPAMENTO WILLE GEOTECHNIK DO LMCC DA UFSM)	162

1. INTRODUÇÃO

As águas provenientes de mananciais subterrâneos ou superficiais são de extrema importância para o abastecimento da população. No entanto, a água *in natura* precisa ser tratada a fim de que possa ser consumida pelos humanos, passando pelas estações de tratamento de águas (ETAs) e por diversos processos físicos, biológicos e químicos.

No início do tratamento de água são adicionados produtos químicos a fim de separar as impurezas existentes, sendo que nessa separação as partículas ficam dispersas em meio líquido, onde, posteriormente, se aglomeram e formam flocos, que pela ação da gravidade sedimentam. O resíduo que acumula no processo de sedimentação é chamado de lodo de estação de tratamento de água (LETA), obtido a partir da lavagem dos decantadores, sendo que inicialmente o lodo apresenta consistência líquida e grande volume, necessitando tratamento e disposição adequada.

Este resíduo, o lodo de estação de tratamento de água, é constituído de resíduos sólidos de natureza orgânica e inorgânica, os quais são provenientes da água *in natura* onde, de acordo com Richter (2001), esta pode conter algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, coloides, areias, argilas, siltes, cálcio, magnésio, ferro e manganês. Mas, além dos elementos contidos na água *in natura*, ainda podem estar presentes no lodo os floculantes, hidróxidos de alumínio e ferro e polímeros utilizados no processo de potabilização da água.

Portanto, dependendo das características, os resíduos das ETAs aumentam o grau de poluição e contaminação dos corpos receptores, contribuindo para o aumento da degradação do meio ambiente e, em consequência, perda da qualidade de vida das populações existentes a jusante dos lançamentos.

O LETA inicialmente era depositado em corpos d'água, sem nenhum tratamento adequado, propiciando aspectos negativos à qualidade da água e ocasionando assoreamento dos rios. No entanto, essa prática foi abolida pela resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) n° 357 (2005), a qual classifica esse material como poluente, exigindo adequada disposição. Além disso, a NBR 10004 (ABNT, 2004) caracteriza o LETA como um resíduo sólido, logo, o mesmo não pode ser disposto em corpos d'água.

O destino final que se dá ao LETA, portanto, é uma atividade bastante importante e complexa, pois normalmente a capacidade das estações de tratamento e dos aterros é extrapolada. Logo, há necessidade de alternativas para destinação final do resíduo, que é de responsabilidade dos produtores dos rejeitos. Deste modo, alguns órgãos ambientais têm exigido detalhes da disposição final no processo de licenciamento das ETAs, representando um avanço na gestão ambiental no país. O material tem sido utilizado na fabricação de agregados leves e aglomerantes hidráulicos, em argamassas, em misturas asfálticas, em camadas de pavimento e em camadas de aterros sanitários.

O emprego do lodo em camadas de aterro sanitário nos Estados Unidos, Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália e África do Sul tem sido uma atividade recorrente (LeBLANC; MATTHEWS; RICHARD, 2008; KIZINIEVIC et al., 2013; O'KELLY e QUILLE, 2010; CASTILHOS JÚNIOR; PRIM; PIMENTEL, 2011).

Nos países supracitados, 60% do lodo é destinado à agricultura, 15% para áreas urbanas, 15% em camadas de cobertura diária e 10% em camadas de cobertura final de aterros sanitários. Essa destinação apresenta diversas vantagens, onde destacam-se: a utilização do lodo como camada de cobertura diária melhora a qualidade dos lixiviados, acelera a decomposição dos resíduos e aumenta a produção de metano; também, em coberturas finais, o lodo melhora o aproveitamento dos nutrientes no crescimento da vegetação de cobertura, auxiliando no controle da erosão e na geração de lixiviado (GRANATO, 2010).

O reaproveitamento do lodo apresenta impacto econômico significativo. Por um lado, reduz custos da eliminação pelas empresas geradoras desses resíduos e, por outro lado, possibilita uma alternativa econômica para os sistemas de crescimento. Portanto, as pesquisas nessa área destacam-se por reduzir a quantidade de resíduos com restrições nacionais e minimizar a pressão sobre a extração de recursos naturais.

No Brasil, a execução de coberturas de aterros sanitários depende da exploração das jazidas de argilas, sendo extraídos do próprio local de execução ou da jazida mais próxima ao aterro. Em muitas situações, o custo do transporte desses solos é superior a própria extração, não apresentando viabilidade econômica. Além disso, Mahler e Huse (2015) e Izzo, Mahler e Rose (2013) afirmam que muitas vezes os solos disponíveis na localidade não atingem uma impermeabilização eficiente para camadas de aterro, havendo necessidade de mistura com outro material.

Sabe-se que as camadas de base e cobertura são um dos principais elementos dos aterros sanitários, portanto, necessitam de atenção especial. A falta de cuidados com esses revestimentos oferece riscos à biodiversidade e à saúde humana, pois o lixiviado pode afetar negativamente a qualidade do solo, dos aquíferos e corpos hídricos superficiais (GUNEY et al., 2014; REGADÍO et al., 2015; KAWAI et al., 2012; LOCASTRO e DE ANGELIS, 2016).

A utilização do Lodo de Estação de Tratamento de Água em conjunto com o solo local pode apresentar viabilidade técnica e econômica para camadas de aterros sanitários, além das vantagens ambientais que essas misturas podem apresentar. Em vista disso, nesta pesquisa o foco será a utilização de LETA em misturas – nas porcentagens de 15%, 30% e 50% - com um solo argiloso laterítico, a fim de verificar a melhoria das características e propriedades mecânicas e hídricas para aplicação em camadas de base e de cobertura de aterros sanitários.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar o comportamento mecânico e hídrico do uso de lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico.

1.1.2. Objetivos Específicos

A referida pesquisa tem as seguintes especificidades:

- Caracterizar o solo e o lodo de estação de tratamento de água em estudo;
- Verificar a possibilidade de utilização das misturas solo+LETA, compactadas na energia intermediária, em camadas de base e topo de aterros sanitários (*liners* e *covers*);
- Verificar a possibilidade de utilização das misturas solo+LETA, compactadas na energia intermediária, em camadas evapotranspirativas para aterros sanitários;
- Avaliar as mudanças de propriedades de solo argiloso laterítico - permeabilidade, sucção, resistência à compressão simples e resistência ao cisalhamento (triaxial e cisalhamento direto) – quando adicionadas diferentes porcentagens de LETA ao solo para aplicação em camadas de aterro sanitário.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 – No primeiro capítulo é apresentada a introdução ao tema da pesquisa, define os objetivos gerais e específicos e justifica a realização do trabalho, além de expor a estrutura na qual o trabalho está organizado.

Capítulo 2 – No segundo capítulo contém a revisão de literatura acerca de aspectos relevantes da pesquisa, principalmente com relação a estudos realizados anteriormente por outros autores e particularidades da utilização de lodo de estação de tratamento de água em misturas com solos.

Capítulo 3 – No terceiro capítulo são apresentados os materiais utilizados e a descrição completa do programa experimental a ser realizado no desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 4 – No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados na pesquisa.

Capítulo 5 – No quinto capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será englobado uma descrição sobre a estação de tratamento de água, bem como o processo de produção do LETA e os coagulantes utilizados. Ainda, serão abordadas as características químicas, físicas, mineralógicas e as propriedades geotécnicas do lodo de estação de tratamento de água. Posteriormente, será descrita a composição de um aterro sanitário e as características das camadas de base e cobertura do mesmo. Por fim, serão apresentados diversos estudos com aplicações de solo-LETA na engenharia civil.

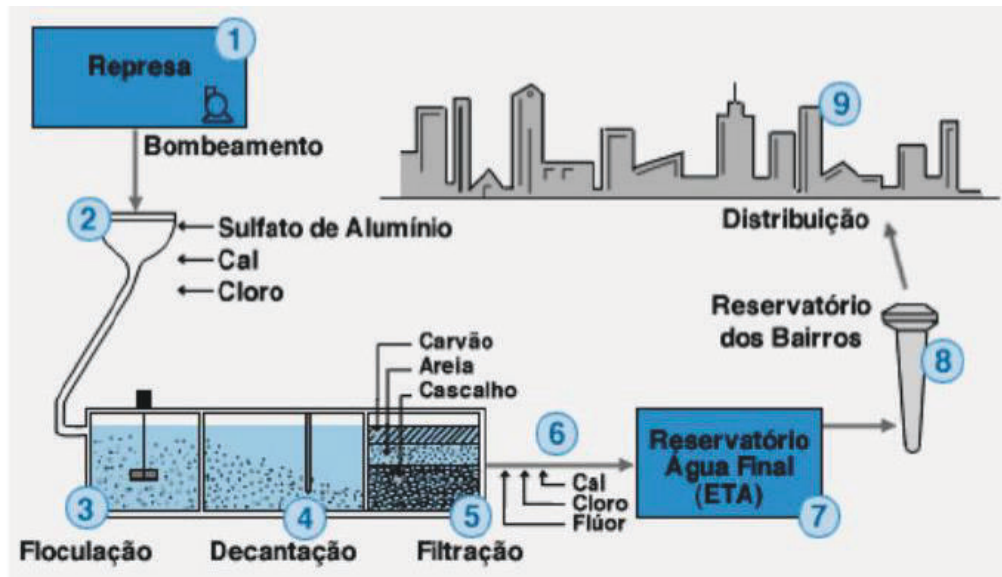
2.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

As estações de tratamento de água purificam a água captada nos mananciais, com a finalidade de torná-la potável ao consumo do ser humano. Uma ETA, segundo Kondageski, Carneiro e Andreoli (2013), é composta por vários processos e pode produzir impactos negativos em suas atividades, sendo a produção de resíduos – lodos de decantadores, água proveniente de lavagem de filtros e resíduos da casa de química – o principal problema para os gerentes destas unidades, uma vez que a água bruta, para ser tratada, recebe produtos químicos como o sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico, polieletrólito, cal, cloro e seus derivados.

Basicamente, o processo de tratamento da água envolve as seguintes fases: coagulação/floculação, decantação, filtração e fluoretação (DI BERNARDO, 2012). A Figura 1 apresenta o diagrama de uma ETA de ciclo completo, sendo que os processos serão detalhados a seguir.

O sistema tradicional, ou completo, realiza a remoção das partículas finas em suspensão e em solução presente na água. A aplicação de produtos químicos desestabiliza as partículas coloidais, formando flocos (hidróxidos metálicos) com tamanho suficiente para remoção nos decantadores. Uma parte dos flocos não sedimenta e, então, passam pelos filtros para clarificação final. Assim, a ETA produz água potável e gera resíduos na forma de lodos acumulados nos decantadores e água de lavagem dos filtros (BARROSO e CORDEIRO, 2001).

Figura 1 – ETA de ciclo completo.



Fonte: (RAMOS, 2008).

Nas unidades de floculação, uma homogeneização adequada garante um maior contato entre os sólidos, formando flocos de grandes dimensões. Depois, a água fica em repouso nos tanques de decantação, onde os flocos, pela ação da gravidade, se depositam no fundo, formando lodo. Esse material sedimentado fica retido de 30 a 60 dias, sendo, posteriormente, enviado para as unidades de filtração, onde se removem da água os flocos formados e partículas menores, por meio de camadas de areia, carvão, cascalho e por filtros de lavagem da própria ETA. A água separada passa por processo de desinfecção e fluoretação, sendo depois enviada para o consumo (SANEPAR, 2014).

De forma mais detalhada são descritos cada um dos procedimentos:

- A etapa de coagulação, de acordo com Di Bernardo (2012), é realizada com sais de alumínio e ferro como coagulante primário e, de forma eventual, por polímeros. Este é um processo unitário que consiste na formação de coágulos, promovendo um estado de equilíbrio eletrostaticamente instável das partículas, no seio da massa líquida;

- A floculação promove a agregação das partículas formadas na unidade de mistura rápida. Deseja-se, nesta etapa, que as impurezas desestabilizadas na coagulação se agreguem formando partículas maiores (blocos) para serem encaminhadas para os decantadores, flotadores e filtros. Nas unidades que contém

os decantadores, a floculação tem por objetivo aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos, enquanto que as unidades que utilizam a filtração a finalidade é aumentar a filtrabilidade dos flocos (KONDAGESKI, CARNEIRO E ANDREOLI, 2013);

- No processo de decantação todas as matérias em suspensão na água bruta estão aglutinadas, constituindo flocos para que possam ser separados da água em tratamento. A decantação, ou sedimentação, é o processo onde os flocos suspensos são removidos da água, fazendo a separação das partículas com densidade superior à da água, sendo depositados em uma superfície de decantadores (SANEPAR, 2014);

- A flotação é o processo que a fase sólida, ao adquirir uma densidade menor que o líquido de suspensão, é separada, a fim de flutuar para superfície. As partículas sólidas são removidas da água fazendo flutuar por meio da redução da sua densidade, pela adesão de pequenas bolhas de ar. Através de uma bomba uma pequena quantidade de água clarificada é elevada a pressão de 4 a 5 atm. e conduzida ao tanque de saturação. Os flocos sobem e se acumulam na superfície do tanque, formando uma capa de lodo de espessura crescente (RICHTER, 2001);

- No processo de filtração se separa o sólido do líquido, por meio de fenômenos físico-químico-biológicos. Kondageski, Carneiro e Andreoli (2013) relatam que em uma estação convencional a filtração remove a água em tratamento das partículas de suspensão, que não foram detidas na decantação. Também, nesse processo, se removem os microrganismos;

- A desinfecção da água tem por finalidade eliminar os microrganismos patogênicos, com o objetivo de garantir a potabilidade da água. Diversas técnicas de desinfecção têm sido utilizadas no mundo inteiro: cloração (utilização de cloro molecular), utilização de compostos alternativos de cloro, ozonização, utilização de raios ultravioleta, radiação solar, dentre outras (RICHTER, 2001);

- Por fim, na fluoretação adicionam-se compostos de flúor às águas de abastecimento público, a fim de possuir o teor adequado de íon fluoreto. O objetivo é proporcionar aos dentes, principalmente em desenvolvimento, um esmalte mais resistente e de qualidade superior (RICHTER, 2001).

Em todo esse processo é gerado o lodo de estação de tratamento de água. Em termos volumétricos, a maior quantidade de lodo é proveniente da lavagem de filtros. Em termo de massa, a maior quantidade é gerada nos decantadores, por ser a

sedimentação o primeiro processo físico de separação sólido-líquido (DI BERNARDO, 2012). Ainda há de se destacar que, segundo Tavares (2003), o lodo formado nos decantadores tem a mesma composição química dos sedimentos carregados pelas águas dos mananciais de captação, acrescido dos cátions utilizados no processo de floculação.

2.1.1. Tipos de coagulantes utilizados

A escolha do tipo de coagulante para o tratamento de água é importante para um bom funcionamento do processo de coagulação, deixando o procedimento de floculação mais eficiente, além de melhorar a etapa de clarificação como um todo (JANUÁRIO, 2005).

Tradicionalmente, o tratamento de águas de abastecimento tem empregado sais de alumínio e ferro como coagulantes, sendo o sulfato de alumínio, sulfato férrico e cloreto férrico os comumente encontrados no mercado. A principal preocupação a respeito da operação das ETAs é a compatibilização do produto químico no processo de coagulação e a minimização da formação de resíduos oriundos da precipitação de sais metálicos na forma de hidróxidos de alumínio ou ferro (FERREIRA FILHO e WAELKENS, 2009).

No Quadro 1 são apresentados, de acordo com Di Bernardo (2012), os coagulantes utilizados em ETAs. Ainda, no mesmo Quadro (1) são apresentadas as dosagens usuais e a massa específica dos principais coagulantes utilizados, destacadas por Di Bernardo e Dantas (2005).

É fundamental a escolha do tipo de coagulante a ser utilizado, se considerar a quantidade e as características do lodo gerado, pois estas dependem das características da água bruta e do coagulante utilizado. A dosagem apropriada do coagulante depende da qualidade da água bruta, do custo dos produtos e dos parâmetros de cor e turbidez que deseja alcançar (LIBÂNIO, 2010). Esses fatores modificam as características do lodo produzido nas ETAs.

Quadro 1 – Coagulantes utilizados em ETAs.

Coagulantes	Dosagens usualmente aplicadas (mg/L)	Massa específica do material (kg/m ³)
Sulfato de alumínio – $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$	10 a 60	600 a 1400
Cloreto férrico – $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	5 a 40	1425
Sulfato ferroso clorado – $FeCl_3 \cdot Fe_2(SO_4)_3$	-	-
Sulfato férrico – $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	5 a 40	1530 a 1600
Hidróxido cloreto de alumínio – $Aln(OH)_m Cl_{3n-m}$	-	-
Polímeros sintéticos – catiônico, aniônico e não iônicos	-	-
Polímeros naturais – amido de mandioca, batata e ararute.	-	-

Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005) e Di Bernardo (2012).

Por fim, a Fundação Nacional da Saúde - FUNASA (2006) destaca que no Brasil o sulfato de alumínio é o produto mais utilizado tanto pelas suas propriedades como pelo seu menor custo. No estado do Rio Grande do Sul, onde o abastecimento de água em sua maior parte é realizado pela CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), também é preponderante a utilização de sulfato de alumínio como coagulante (CORSAN, 2011).

2.1.2. Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA)

O tratamento da água gera benefícios sociais e econômicos, no entanto, como todo processo industrial, em suas operações, podem gerar impactos negativos no meio ambiente. Neste contexto, Souza (2009) relata que os resíduos gerados nas ETAs representam um grande desafio no seu gerenciamento, tanto no sistema gerador quanto do ponto de vista da disposição adequada dos mesmos, a fim de atender as legislações vigentes.

Nas estações de tratamento de água, de acordo com *American Society of Civil Engineers* (ASCE, 1996), os resíduos podem ser divididos em quatro categorias:

- Lodo: gerado nas descargas dos decantadores, removidos em flotores, na lavagem de filtros, no abrandamento e na remoção de ferro e manganês na água bruta;

- Concentrado salino: resultante do tratamento de água por técnicas de membrana, osmose reversa, eletrodialise e troca iônica;
- Carvão ativado e resinas de troca iônica desgastada e material filtrante usado;
- Emissões gasosas de unidades de controle de odor ou de técnicas de *air stripping* (processo de transferência de componentes voláteis de um líquido para uma corrente de ar).

Dentre todo o processo, os resíduos gerados nas lavagens dos filtros e descarga de decantadores são os que têm mais representatividades nas ETAs (ASCE, 1996).

O lodo de estação de tratamento de água é constituído de resíduos sólidos de natureza orgânica e inorgânica, os quais são provenientes da água bruta. Grandin, Alem Sobrinho e Garcia Júnior (1993) afirmam que na água bruta podem conter diversos resíduos, tais como algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, coloides, areias, argilas, siltes, cálcio, magnésio, ferro e manganês. Mas, além dos elementos contidos na água bruta, ainda podem estar presentes no lodo os floculantes, hidróxidos de alumínio e ferro e polímeros utilizados no processo de potabilização da água.

No entanto, conforme Carneiro et al. (2013), a quantidade e a composição do resíduo dependem diretamente da qualidade da água bruta, bem como da concentração e tipo de produto químico utilizado na coagulação, do tipo de decantadores, da forma de limpeza dos filtros, dos polímeros empregados no desaguamento, entre outros.

Portanto, dependendo das características, os resíduos das ETAs aumentam o grau de poluição e contaminação dos corpos receptores, contribuindo para o aumento da degradação do meio ambiente e, em consequência, perda da qualidade de vida das populações existentes a jusante dos lançamentos. Devido ao fato da variabilidade nas características dos lodos gerados nas ETAs, Cordeiro (1999) menciona a necessidade de equacionar de forma individualizada o problema dos lodos gerados em cada ETA.

A caracterização dos lodos é de grande importância para ter uma noção do impacto ambiental que pode ser causado no despejo, permitindo também fazer uma escolha do melhor método de desidratação e disposição final.

A fim de classificar os resíduos, Cordeiro, no ano de 2001, apresentou uma forma de classificação do lodo em função da sua importância e de quesitos ambientais e geotécnicos:

- Com relação às questões ambientais o autor ressaltou a disposição dos resíduos, destacando a importância do conhecimento dos principais parâmetros para análise do resíduo: pH, sólidos, metais, DBO, biodegradabilidade, toxicidade, pesticidas e fertilizantes e compostos voláteis e orgânicos;

- Já, com relação aos aspectos geotécnicos, o autor evidenciou possíveis formas de remoção da água e de futuras utilizações para este resíduo, sendo que os principais parâmetros para análise são: a granulometria das partículas, limite de plasticidade, limite de liquidez, resistência específica, respostas ao aquecimento e resfriamento, e sedimentabilidade.

No Brasil, a NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e saúde pública, possibilitando um gerenciamento adequado, incluindo definições associadas ao termo, aos processos de classificação e aos métodos de ensaio. Esta normativa define os resíduos em estado sólido ou semissólido como os que resultam de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Nesta definição da norma inclui-se o LETA, ou seja, aqueles resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades que tornam inviável seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água.

É importante destacar que a NBR 10004 (ABNT, 2004) apresenta a classificação dos resíduos sólidos pelo processo ou atividade que lhes deu origem, pelos seus constituintes e características, além de comparar estes constituintes com uma listagem de resíduos e substâncias para quais os impactos ambientais são conhecidos. Em vista disso, a normativa divide os resíduos sólidos em dois grupos, descritos a seguir:

- Classe I: resíduos perigosos;
- Classe II: resíduos não perigosos, os quais podem ser subdivididos em Classe II-A (resíduos não inertes) e Classe II-B (resíduos inertes).

De acordo com pesquisas já realizadas, das quais se pode citar a de Pontes, Carvalho e Maziero (2012), o lodo de estação de tratamento de água é classificado como um resíduo Classe II-A, ou seja, um resíduo não inerte e não perigoso, mas mesmo assim representa um problema para as instituições responsáveis por estes sistemas, pois estes resíduos devem ser dispostos de forma adequada no meio ambiente.

Em vista da quantidade de lodo de estação de tratamento de água algumas pesquisas apresentam dados importantes. Richter (2001) definiu que a produção de LETA varia entre 0,2% a 5,0% do volume total de água tratada. Já, Luciano et al. (1998) afirmam que este valor representa, em volume, entre 0,3% a 1,0% da água tratada. Para complementar, Silva e Isaac (2002) apontaram que a quantidade de LETA originária dos decantadores representa de 60 a 95% do lodo gerado, enquanto o restante é oriundo do processo de filtração.

Ainda, Reali (1999) indicou que é possível estimar a produção de resíduo de LETA utilizando-se a vazão da água a ser tratada, em função também da qualidade do reservatório (corpo d'água) de captação. Os dados apresentados pelo autor estão mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Estimativa da produção de LETA de acordo com o manancial de captação.

Tipo de manancial	Faixa de produção de resíduos (g de sólidos secos por m³ de água tratada)
Água de reservatório com boa qualidade	12 – 18
Água de reservatório com média qualidade	18 – 30
Água de rios com média qualidade	24 – 36
Água de reservatório com qualidade ruim	30 – 42
Água de rios com qualidade ruim	42 – 54

Fonte: Adaptado de Reali (1999).

Portanto, pelos dados apresentados por Reali (1999), no Quadro 2, relata-se também a importância da qualidade da água do manancial na geração de resíduos, aumentando a geração dos mesmos quanto pior a qualidade do manancial.

O abastecimento público no estado do Rio Grande do Sul é majoritariamente operado pela CORSAN, que presta serviço de abastecimento de água a mais de seis

milhões de gaúchos, ou seja, em torno de terços da população do estado, distribuídos em 316 municípios (CORSAN, 2017).

Segundo dados da CORSAN (2017), no ano de 2016, a empresa atendeu a 2.584.006 economias no estado, disponibilizando um volume de água de 530.880.225 m³. Portanto, considerando que a geração de LETA pode chegar até 5% do volume total de água tratada, somente no ano de 2016, pode-se ter gerado um volume aproximado de 28.000.000 m³ de lodo.

Os fatos supracitados retomam a importância em uma destinação adequada ao LETA, a fim de evitar passivos ambientais gerados por esse resíduo, além de atuar de forma sustentável, minimizando a utilização de recursos naturais em obras de engenharia.

2.1.2.1. Composição química, física e mineralógica

Como anteriormente citado, os lodos de ETA são compostos por vários tipos de produtos químicos, matéria orgânica e partículas de solo. Em geral, pelo fato das partículas de solo serem transportadas a partir de um corpo d'água elas compõem maior porcentagem dentro do lodo, portanto, o quartzo vem a ser o mineral presente na maioria dos casos. No entanto, em algumas ETAs podem-se ter diferentes minerais, que caracterizam de forma diferente cada lodo. Para fins de conhecimento no Quadro 3 é apresentada a composição mineralógica de lodos de várias ETAs, de diferentes países, obtida pela difratometria de raios X, os quais utilizam diferentes coagulantes.

Pelo Quadro 3 percebe-se uma diferença entre as propriedades e características dos lodos gerados em distintas ETAs, indicando a necessidade de tratar os lodos de cada ETA de maneira individual.

Quadro 3 - Composição mineralógica de LETAs de diferentes países.

Mineral	LETA					
	Alum (1) EUA	Alum (1) EUA	Alum (1) EUA	Alum (2) Portugal	PAC (3) Brasil	PACL (4) Japão
Quartzo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Grafita	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Alumina	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não
Ringwoodita	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Rodocrosita	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Calcita	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Hercinita	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Caulinita	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
Feldspato	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Goethita	Não	Não	Não	Não	Sim	Não
Ilita	Não	Não	Não	Não	Sim	Não
Magnesita	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Gesso	Não	Não	Não	Sim	Não	Não

Alum = Sulfato de alumínio; PAC = Policloreto de alumínio; PACL = Cloreto de polialumínio.

Fonte: Adaptado de Basim (1999), Roque e Carvalho (2006), Teixeira et al. (2011) e Watanabe et al. (2011).

Além da caracterização mineralógica, outra característica importante, relacionada à avaliação ambiental do lodo, é a físico-química. As principais características físicas e químicas dos lodos de ETAs são o teor de sólidos, orgânico ou inorgânico, pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e a própria caracterização química. O Quadro 4 mostra os resultados de análise química de LETAs do Brasil em estudos realizados por diversos autores.

Já, relacionado também com a composição mineralógica dos grãos, a massa específica dos grãos vai depender justamente dos argilominerais presentes no lodo. Geralmente, no lodo de ETA, a massa específica dos grãos é menor que a do solo. Para exemplificar isso são apresentados os Quadros 5 e 6 que apresentam a massa específica dos grãos de diferentes ETAs dos Estados Unidos com diferentes coagulantes. Novamente, percebe-se uma variação considerável nos resultados a depender do lodo de ETA em análise.

Quadro 4 - Composição química de diferentes LETAs do Brasil.

Composto Químico	Composição de lodos de ETAs (% em peso seco)			
	ETA São Leopoldo (RS)	ETA Campos dos Goytacazes (RJ)	ETA Passaúna (PR)	ETA Tamanduá (PR)
SiO ₂	34,80	35,92	15,55	24,10
Al ₂ O ₃	22,30	31,71	13,07	31,60
Fe ₂ O ₃	6,60	12,79	4,15	18,60
TiO ₂	0,94	1,10	0,19	2,20
MnO	0,17	0,09	0,22	-
MgO	0,69	0,37	0,15	-
CaO	0,40	0,10	0,43	-
K ₂ O	0,57	0,58	0,06	0,30
Na ₂ O	0,23	0,06	0,04	-
P ₂ O ₅	-	0,35	0,26	-
SO ₃	-	-	-	2,80
FeO	2,90	-	-	-
Perda ao fogo	27,99	16,93	49,79	20,40
Outros voláteis	-	-	15,09	-

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2000), Oliveira, Machado e Holanda (2004), Hoppen et al. (2005) e Tartari, Díaz-Mora e Mondénes (2011).

Quadro 5 - Características físicas de lodos de ETAs dos EUA com sulfato de alumínio como coagulante.

ETA	Características físicas			
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Massa específica dos grãos (g/cm ³)
Harwood's Mill	40,00	45,00	15,00	2,94
Main Street	23,20	59,90	16,90	2,51
Lake Chaplin	26,00	48,10	25,90	2,53
Ipswich	33,20	39,00	27,80	2,16
Tar River	19,80	8,50	71,70	2,26
Port Wentworth	19,30	56,90	23,80	2,25
Lake Kilby	14,40	35,90	49,70	2,21
E. M. Johnson	12,50	54,40	33,10	2,07
York	18,50	50,60	30,90	2,18
Lake Gaillard	3,00	86,00	11,00	2,05

Fonte: (VANDERMEYDEN e CORNWELL, 1998).

Quadro 6 - Características físicas de lodos de ETAs dos EUA com cloreto de polialumínio como coagulante.

ETA	Características físicas			
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Massa específica dos grãos (g/cm ³)
St. Bernard Parish	9,00	76,60	14,40	2,53
Frostburg	31,30	55,00	13,70	2,22
Roxboro	0,70	45,50	53,80	2,26
Blacks-Christiansburg	7,00	88,00	5,00	2,08
Albany	14,50	61,50	24,00	2,56

Fonte: (VANDERMEYDEN e CORNWELL, 1998).

Além disso, um importante estudo, apresentado por Watanabe et al. (2011), mostrou que o lodo de uma ETA de Hitachi no Japão, onde é utilizado como coagulante o cloreto de polialumínio, apresenta características físicas que variam ao longo do tempo, de acordo com as condições climáticas. As variações dos valores apresentados no Quadro 7 são devidas à grande variabilidade da qualidade da água bruta tratada, afirmam os autores.

Quadro 7 - Características físicas de um LETA do Japão.

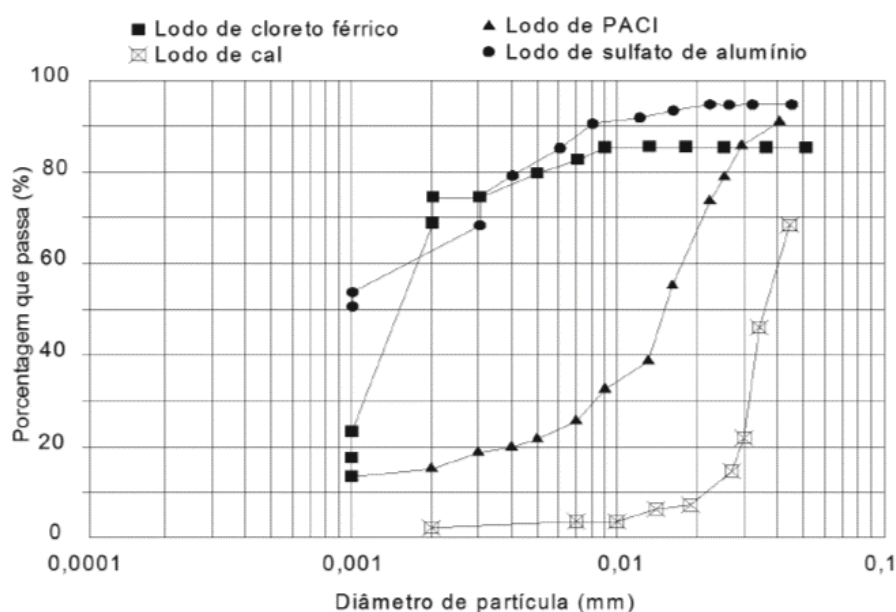
Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Mês/ano	fev/06	abr/06	nov/06	jun/07	set/07	nov/07	nov/07	dez/07	jun/08	nov/08
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,48	2,51	2,60	2,40	2,61	2,45	2,51	2,45	2,58	2,58
Limite de Liquidez (%)	330	275	420	248	178	116	221	511	83	224
Limite de Plasticidade (%)	167	140	166	165	104	69	145	186	60	145
Índice de Plasticidade (%)	163	135	254	83	74	47	76	325	23	79
Perda ao fogo (%)	25,9	26,1	25,8	18,2	17,2	12,4	18,2	17,0	9,0	22,3

Fonte: (WATANABE et al., 2011).

Nesta análise ao longo do tempo os autores (WATANABE et al., 2011) relataram uma variação da massa específica dos grãos de 2,41 a 2,60 g/cm³, na perda de massa ao fogo de 9,0 a 26,1%, e no limite de liquidez de 83 a 511%.

A mesma tendência acontece com a distribuição granulométrica dos lodos de estação de tratamento de água, onde depende de uma série de fatores, como por exemplo, a estação climática, o coagulante utilizado na ETA e a umidade inicial da amostra. Na Figura 2 são mostradas as curvas granulométricas de lodos dos Estados Unidos que utilizam coagulantes diferentes, onde é perceptível a diferença entre os casos apresentados.

Figura 2 - Curvas granulométricas de lodos de ETAs dos EUA que utilizam diferentes coagulantes.



Fonte: (VANDERMEYDEN e CORNWELL, 1998).

Com relação aos limites de consistência, Basim (1999) determinou os valores para vários LETAs do Estados Unidos, em diferentes condições de umidade (uma amostra *in natura* e outra com secagem prévia). Os resultados encontrados pelo autor são apresentados no Quadro 8. O autor observou uma tendência de redução da plasticidade após a secagem prévia, que se dá pelo fato de que lodos altamente plásticos *in natura* se transformam em não plásticos com secagem prévia, pela perda da camada dupla e pela cimentação das partículas, que leva à formação de partículas maiores e de comportamento granular.

Quadro 8 - Limites de consistência de diferentes LETAs dos EUA.

Tipo de lodo	Limite de Liquidez (%)		Limite de Plasticidade (%)		Índice de Plasticidade (%)	
	<i>In natura</i>	Secagem prévia	<i>In natura</i>	Secagem prévia	<i>In natura</i>	Secagem prévia
Alumínio	371	107	228	NP	143	NP
Cal	329	37	200	NP	129	NP
Ferro	690	151	20	NP	670	NP
Cal	330	125	212	43	118	82
Polímero	161	55	57	49	104	6
Alumínio	206	118	115	NP	91	NP

NP = Não Plástico

Fonte: (BASIM, 1999).

Outros trabalhos podem também ser destacados, como o de Gastaldini et al. (2015), no qual os autores realizaram misturas de concreto de cimento Portland com a utilização de cinzas de lodo de estação de tratamento de água da CORSAN do município de Santa Maria/RS. O LETA foi primeiramente seco em um forno a 110 °C por 24 horas, sendo, posteriormente, homogeneizado e calcinado em um forno mufla às temperaturas de 400, 500, 600 e 700°C. Após a calcinação, as cinzas foram trituradas para utilização.

Wolff, Schwabe e Conceição (2015) estudaram a utilização do LETA de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, em cerâmica estrutural. Ainda, destaca-se o estudo de Mohammed et al. (2017) onde foi realizada a caracterização do cimento Portland em lodo de estação de tratamento de água potável, da cidade de Rabat, em Marrocos

Os resultados de caracterização química dos estudos de Gastaldini et al. (2015), Wolff, Schwabe e Conceição (2015) e Mohammed et al. (2017) são apresentados no Quadro 9.

Além da análise química, Gastaldini et al. (2015) encontraram o peso específico para cinza de LETA de Santa Maria igual a 2,56 g/cm³. Os autores - Wolff, Schwabe e Conceição (2015) - encontraram para o LETA de Belo Horizonte a composição de 36% de fração argilosa, LL igual a 73%, LP igual a 61% e, em consequência, IP igual a 12%. A perda de massa por ignição, ou matéria orgânica, corresponde a 20,4% da amostra. A massa específica aparente seca do material foi de, aproximadamente, 1,23 g/cm³.

Quadro 9 – Características químicas de cinza de LETA de Santa Maria/RS, de um LETA de Belo Horizonte/MG e um LETA de Rabat/Marrocos.

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
	(%)											
Cinza de LETA de Santa Maria (RS)	66,20	17,70	8,76	0,57	0,96	-	0,32	1,16	0,13	0,86	0,33	3,37
LETA de Belo Horizonte (MG)	37,50	30,10	12,30	0,20	0,40	-	0,20	0,90	0,30	1,00	-	17,10
LETA de Rabat (Marrocos)	33,08	48,94	4,46	4,67	0,70	0,17	0,00	2,53	0,24	0,36	0,21	4,45

Fonte: Adaptado de Gastaldini et al. (2015), Wolff, Schwabe e Conceição (2015) e Mohammed et al. (2017).

Já Mohammed et al. (2017) identificaram também, pelos ensaios de difratometria de raio X, que o LETA de Rabat é composto, em suas fases cristalinas, por mica, quartzo, ilita e traços de caulinita.

Lin, Wu e Ho (2005) estudaram a recuperação de um lodo de estação de tratamento de água para utilização em pavimentos permeáveis, em Taiwan. Para o referido LETA os autores encontraram 11,9% de perda de massa por ignição, portanto, identificando essa quantidade de matéria orgânica do material. Ainda, os autores obtiveram as composições elementares para o material, que é composto, na maior parte, de 20,9% de Al₂O₃, 53,6% de SiO₂, 6,6% Fe₂O₃, 1,9% de MgO e 0,3% de CaO.

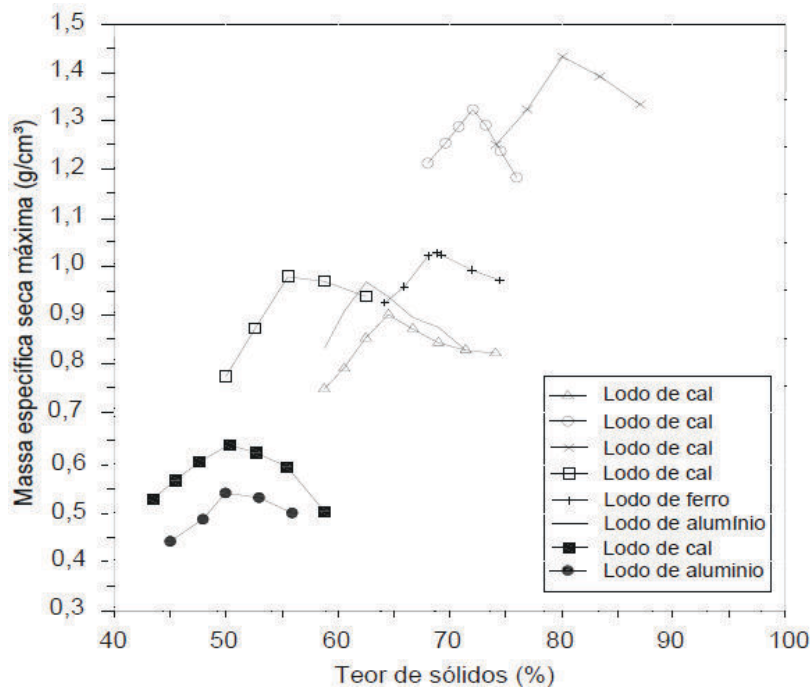
2.1.2.2. Propriedades geotécnicas

Xia, no ano de 1994, estudou os parâmetros de compactação, na energia normal, para 11 diferentes LETAs dos Estados Unidos, analisando duas amostras, uma com e outra sem secagem prévia. As curvas de compactação em função do teor de sólidos para as amostras com secagem prévia (8 amostras) são mostradas na Figura 3.

O autor, Xia (1994), relata que as curvas tiveram comportamento parabólico, semelhante as curvas de compactação dos solos. Os valores de massa específica seca máxima e do teor de sólidos variaram em um intervalo de 0,540 a 1,454 g/cm³ e

50 a 80%, respectivamente. Os LETAs ensaiados mostraram um comportamento de solo granular.

Figura 3 - Curvas de compactação em função do teor de sólidos de LETAs dos EUA com secagem prévia.



Fonte: Adaptado de Xia (1994).

Com relação ao comportamento mecânico dos LETAs, a resistência ao cisalhamento é uma das propriedades mais importante dos solos, pois os parâmetros de resistência influenciam a estabilidade de taludes e a capacidade de suporte. Essas propriedades também são aplicáveis aos LETAs empregados em obras geotécnicas.

Sabe-se que os parâmetros de resistência podem ser determinados por meio de ensaios de cisalhamento direto e de ensaios triaxiais, sendo o mais empregado o ensaio de compressão triaxial. Hsieh e Raghu (1997) determinaram os parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito e coesão) de 11 diferentes lodos dos Estados Unidos com características distintas, por meio do ensaio de cisalhamento direto na condição natural, onde os resultados, em termos de tensão total, estão apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento na condição natural de LETAs dos EUA.

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

Fonte: (HSIEH e RAGHU, 1997).

Pelo Quadro 10 é possível verificar que os autores (HSIEH e RAGHU, 1997) encontraram para alguns lodos com teor de umidade entre 33,9 e 89% valores de coesão entre 3,1 e 45,1 kPa. Já, no caso de lodos com teores de umidade de 150,6 até 549,4% os valores de coesão ficaram na ordem de 2,4 a 11,4 kPa. Os valores de ângulo de atrito variaram entre 3 a 26°, com os maiores valores relacionados aos maiores teores de sólidos.

O Quadro 11 apresenta os parâmetros de resistência de diferentes lodos de ETA realizados por meio do ensaio triaxial tipo CU (consolidado não drenado), nos Estados Unidos, Portugal e Irlanda. Pelo Quadro 11 pode-se observar o comportamento não coesivo do lodo, constatado também pelos valores de ângulo de atrito efetivo entre 39 a 44°. Esses valores de ângulo de atrito são consideravelmente altos, pois apresentam-se normalmente em solos granulares e não plásticos. As argilas, com índice de plasticidade acima de 50%, tendem apresentar valores de ângulo de atrito inferiores à 25°. Segundo O'Kelly (2008) não é incomum que alguns resíduos sólidos muito plásticos tenham elevados valores de ângulo de atrito efetivo.

Quadro 11 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento não drenado de diferentes LETAs dos EUA, Portugal e Irlanda.

Autor	Coesão efetiva - c' (kPa)	Ângulo de atrito efetivo – ϕ' (°)
Wang et al. (1992) [EUA]	8,3	43
Wang et al. (1992) [EUA]	6,9	42
Wang et al. (1992) [EUA]	8,3	44
Roque e Carvalho (2006) [Portugal]	77,0	44
O'Kelly e Quille (2008) [Irlanda]	0,0	39
O'Kelly e Quille (2010) [Irlanda]	0,0	42
O'Kelly e Quille (2010) [Irlanda]	0,0	42
O'Kelly e Quille (2010) [Irlanda]	0,0	40
O'Kelly e Quille (2010) [Irlanda]	0,0	44

Fonte: Adaptado de Wang et al. (1992), Roque e Carvalho (2006), O'Kelly e Quille (2008) e O'Kelly e Quille (2010).

2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) E OS ATERROS SANITÁRIOS

Neste capítulo serão abordados requisitos geotécnicos para utilização de materiais em camadas de base e cobertura de aterros sanitários, sendo esta uma das principais aplicações do estudo.

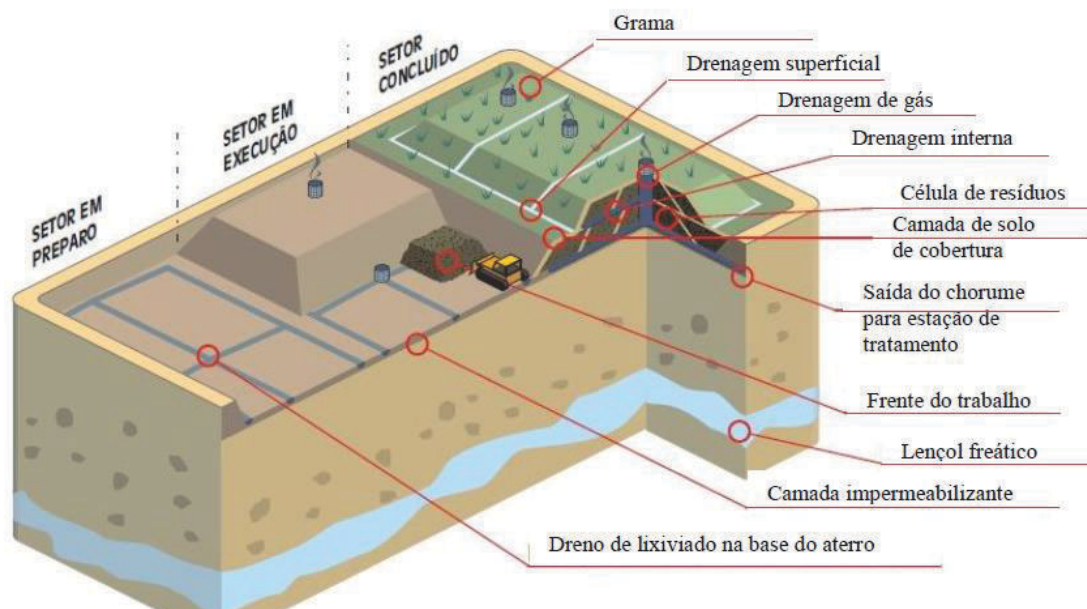
2.2.1. Composição de um aterro sanitário

A nível mundial, o processo de disposição dos RSU passou por várias fases até a atualidade, através das agências de proteção ambiental e dos governos que definiram diretrizes para que o gerenciamento desses resíduos se tornasse eminente (MELARE et al., 2017).

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2000) os aterros sanitários, com esquema de composição mostrado na Figura 4, são obras de engenharia que permitem o confinamento de RSU de forma segura com o objetivo de garantir o controle de poluição ambiental e proteger a saúde pública e, em consequência, minimizar os impactos ambientais. Kawai et al. (2012) relata que as transformações físico-químicas e biológicas que ocorrem no processo de

decomposição da matéria orgânica presente nos RSU produzem o lixiviado e o biogás, os quais precisam ser coletados e tratados.

Figura 4 – Esquema de composição de um aterro sanitário.



Fonte: Adaptado de IPT (2000).

Principalmente o lixiviado, um líquido de alto DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), precisa ser coletado por drenos no interior das células e conduzido ao tratamento. Para atender essa situação, e também com o intuito de minimizar diversos possíveis impactos ao ambiente, há alguns elementos típicos de aterros sanitários: divisão em células; compactação dos resíduos; camada de cobertura; sistema de impermeabilização de base (*liner*); sistemas de drenagem e tratamento para líquidos e gases; monitoramento geotécnico e ambiental; entre outros. Todas essas medidas visam minimizar os impactos ambientais e proteger o ambiente onde será implantado o aterro. A fim de um detalhamento mais aprofundado, cada uma das camadas do aterro sanitário será discutida ao decorrer deste capítulo.

2.2.2. Camadas de cobertura de aterros

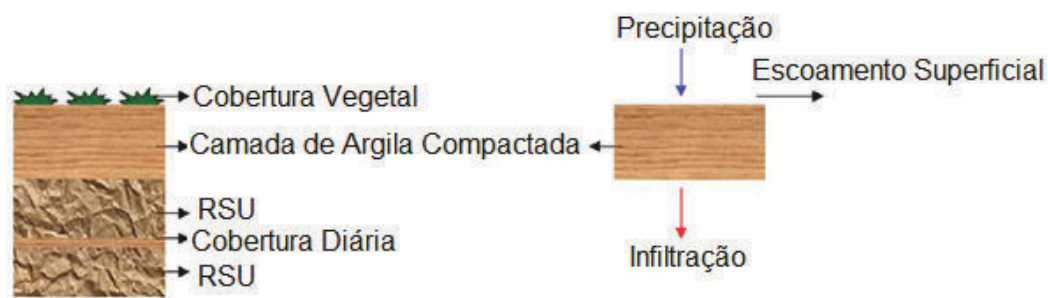
As camadas convencionais de cobertura de aterros são constituídas por apenas camada de solo natural argiloso ou intercalada com geossintéticos, visando a

impermeabilização do topo das células do aterro (MARIANO, 2008). No entanto, embora apresentem baixo custo inicial de construção, diversos estudos demonstram que este tipo de camada apresenta diversas desvantagens, principalmente devido aos ciclos de secagem e umedecimento (USEPA, 2003). Este sistema é suscetível a falhas pelo surgimento de fissuras e conseqüente aumento da permeabilidade de água e gases, diminuindo o desempenho da camada.

Em climas úmidos temperados, Fourie e Moonsammy (2002) afirmam que este tipo de cobertura tende a ser satisfatório, visto que o excesso de precipitação sobre a evaporação tende a manter saturada a cobertura mais próxima a superfície. Já, locais de clima árido, semiárido e locais com longos períodos de seca, problemas de fissuras por secagem podem aumentar a permeabilidade do solo, tornando a barreira ineficiente. A Figura 5 apresenta uma camada de cobertura com argila compactada e os caminhos preferenciais de água na massa dos RSU.

De acordo com Catapreta (2008) as coberturas de aterros no Brasil são confeccionadas com uma barreira de solo com espessura de aproximadamente 0,60 m, constituída de materiais de baixa permeabilidade (10^{-7} m/s ou menos) e acima dessa camada de solo em torno de 15 cm de cobertura vegetal.

Figura 5 – Representação de camada homogênea de argila compactada e os caminhos de preferência de água.



Fonte: Adaptado de Mariano (2008).

Outra maneira de executar a camada de cobertura é pelo sistema evapotranspirativo. A camada evapotranspirativa (ET), também conhecida como monolítica, consiste em uma espessa camada de solo de textura fina (areias finas, siltes e siltes argilosos), com capacidade de armazenamento de água e para suporte da vegetação (USEPA, 2004).

Segundo Sun, Yuen e Fourie (2010) e Zhang e Sun (2014) a camada evapotranspirativa se baseia no princípio do balanço hídrico, onde a percolação para o interior do maciço pode ser minimizada por meio do armazenamento de água na cobertura, principalmente nos períodos de chuva. Essa água é removida por evapotranspiração através da vegetação ou por evaporação da superfície do solo.

Neste tipo de cobertura os solos ideais são os siltes e argilas de baixa plasticidade, pois estes têm maior capacidade de armazenamento de água e menor probabilidade de rachaduras e trincas devido ao ressecamento (ZORNBERG; LAFOUTAIN; CALDWEL, 2003).

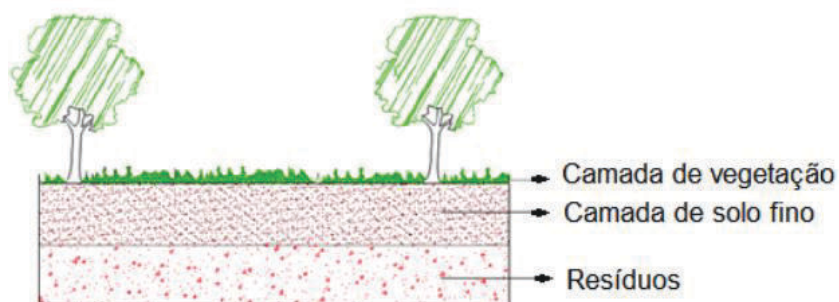
Ainda, nos projetos dessas camadas, quanto maior a capacidade de armazenamento de água no solo e suas propriedades evapotranspirativas, menor o potencial de percolação através do sistema de cobertura. Essa redução de entrada de água para o interior do maciço faz com que sejam minimizadas as interferências na degradação dos resíduos, diminuindo a produção de lixiviado e os efeitos da poropressão de água atuantes na estabilidade dos RSU (COSTA, 2015).

A USEPA (2004) recomenda a utilização desse tipo de cobertura em regiões áridas e semiáridas, com baixo volume de precipitação e elevados percentuais de evaporação, com vegetação de gramíneas. As espessuras indicadas dessas camadas variam entre 0,90 m e 2,00 m. A USEPA (2004) ainda destaca alguns itens importantes na composição da camada evapotranspirativa:

- Solo fino, como siltes e siltes argilosos, que têm relativamente alta capacidade de armazenamento de água;
- Vegetação nativa para aumentar a evapotranspiração;
- Disponibilidade local de solos para construção, o que proporciona a redução de custos.

Catapreta (2008) e Abichou, Langoni e Tawfic (2003) afirmam que para um bom desempenho do sistema de cobertura evapotranspirativa usa-se uma ou mais camadas de solo para reter água até que esta é transpirada pela vegetação ou evapotranspirada pela superfície do solo. Um tipo de cobertura pode ser composto por uma camada monolítica, que é composta por uma camada de solo fino que precisa ter baixa condutividade hidráulica e alta capacidade de armazenamento de água. Um esquema da cobertura evapotranspirativa monolítica é mostrado na Figura 6.

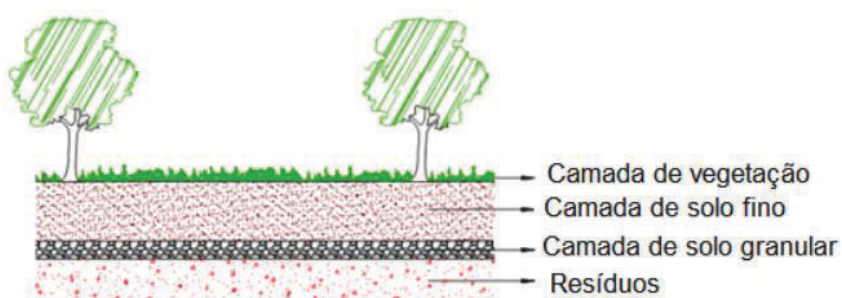
Figura 6 – Cobertura evapotranspirativa monolítica.



Fonte: Adaptado de Catapreta (2008).

Outra forma de compor a camada evapotranspirativa é por meio de barreiras capilares. Segundo Vieira (2005), Oliveira e Marinho (2007) e Catapreta (2008) esse sistema é constituído por uma camada de solo fino onde a água da chuva que infiltra fica armazenada e uma segunda camada de material granular que impede a passagem da água infiltrada para o depósito do RSU. O esquema do sistema é mostrado na Figura 7. Pela diferença de umidade volumétrica e da permeabilidade das duas camadas, a primeira camada funciona como uma esponja que retém parte da água da chuva e é posteriormente liberada para atmosfera por evaporação.

Figura 7 – Cobertura evapotranspirativa por barreira capilar.



Fonte: Adaptado de Catapreta (2008).

A USEPA (2004) relata que no sistema de barreira capilar a camada de solo fino tem a mesma função de uma camada de solo monolítico, que é de armazenar água até que a mesma seja removida do solo pelos mecanismos de evaporação de evapotranspiração. Já, a camada de solo granular forma uma espécie de franja capilar

entre as duas camadas, permitindo o solo fino reter mais água que o sistema de cobertura monolítica de igual espessura.

2.2.2.1. Características geotécnicas de coberturas de aterros

No Brasil, as normativas referentes a projeto, implantação e operação de aterros sanitários não apresentam nenhuma especificação técnica a respeito das propriedades geotécnicas das camadas de cobertura. As únicas recomendações técnicas, segundo a NBR 13896 (ABNT, 1997) são: a execução de aterros em áreas onde o subsolo tenha coeficiente de permeabilidade inferior a 5×10^{-5} cm/s, mas considera desejável a existência de um depósito natural de material com permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s.

Conforme já citado, a argila compactada é muito empregada em aterros sanitários como camada de cobertura. No entanto, Rocca, Iacovone e Barrotti (1993) afirmam que para um solo argiloso ser considerado adequado como impermeabilização de aterros – em camadas de cobertura – devem atender aos seguintes quesitos:

- Ser classificado no sistema unificado de classificação de solos como CL, CH, SC ou OH;
- Apresentar porcentagem maior que 30% das partículas passantes na peneira n° 200 (abertura 0,075 mm);
- Limite de Liquidez maior que 30% e Índice de Plasticidade maior ou igual a 15%;
- pH maior ou igual a 7,0;
- Coeficiente de permeabilidade (k) inferior a 10^{-7} cm/s, quando compactado.

O principal fator a ser analisado nas coberturas finais é a permeabilidade do material, visto que quanto menor a permeabilidade, onde geralmente os solos argilosos são menos permeáveis, reduz-se a possibilidade de contaminação do aquífero. Ainda, outro parâmetro importante na análise das camadas de aterros é a resistência ao cisalhamento, em função das solicitações, das mudanças de temperatura e do peso dos resíduos, que podem ocasionar o aparecimento de potencial superfície de ruptura ou deslizamento.

Além dos critérios anteriormente citados por Rocca, Iacovone e Barrotti (1993), o Quadro 12 apresenta outros parâmetros geotécnicos definidos pelas principais referências consultadas.

Quadro 12 – Requisitos para coberturas de aterros sanitários.

Característica	Referências				
	ROCCA, IACOVONE e BARROTTI (1993)	USEPA (1998)	QASIN e CHIANG (1994)	NBR 13896 (ABNT, 1997)	QIAN, KOERNER e GRAY (2002)
Coefficiente de permeabilidade (m/s)	$< 10^{-9}$	$< 10^{-7}$	$< 10^{-9}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 10^{-9}$
Classificação SUCS	CL, CH, SC ou OH	-	-	-	SC
% passante na # 200 (0,075 mm)	> 30	> 30	> 40	-	-
Limite de Liquidez (%)	> 30	> 30	> 25	-	-
Índice de Plasticidade (%)	> 15	-	> 10	-	< 50

Fonte: Adaptado de Rocca, Iacovone e Barrotti (1993), USEPA (1998), Qasin e Chiang (1994), NBR 13896 (ABNT, 1997) e Qian, Koerner e Gray (2002).

No Brasil há apenas recomendações para camadas de cobertura de aterro, não havendo regulamentação ou norma específica para isso. Mas, no entanto, algumas instituições apresentam características para execução de aterros, como é o exemplo do Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM, 2001). Este instituto recomenda que para aterro industrial de Classe I a camada de impermeabilização superior é obrigatória, não havendo uma regulamentação para espessura ou permeabilidade da camada. Em aterros industriais de Classe II não há obrigatoriedade de camada superior de impermeabilização. No entanto, quando existir, a mesma deve ser de manta plástica – de 0,8 a 1,2 mm de espessura – ou de argila com coeficiente de permeabilidade de 10^{-6} cm/s e espessura maior que 50 cm.

A norma Alemã – TA Siedlunsabfall (1993) traz uma série de requisitos para o tipo de cobertura do aterro, que depende da classificação do mesmo. O sistema de cobertura para os aterros de Classe II e III é formado por geomembranas plásticas (com espessura mínima de 2,5 mm) em contato direto com a argila compactada (que deve ter umidade superior a ótima do ensaio de compactação do Proctor e

condutividade hidráulica menor ou igual à 5×10^{-10} m/s). São necessárias no mínimo duas camadas de 25 cm de argila. Já, para a cobertura de aterros de Classe I pode ser composta apenas por argila compactada e deve ter as mesmas características de compactação e condutividade hidráulicas citadas anteriormente. No Quadro 13 são apresentadas as características das camadas do sistema de cobertura de acordo com a classe do aterro na Alemanha.

Quadro 13 – Projetos de cobertura padrão para aterros de classe I, II e III na Alemanha.

Componente	Aterro Classe I	Aterro Classes II e III
Vegetação	Necessário	Necessário
Solo de cobertura	> 1 m	> 1 m
Camada de drenagem	$d \geq 0,3$ mm; $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s	$d \geq 0,3$ mm; $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s
Camada de proteção	Não é necessário	Não é necessário
Geomembrana	Não é necessário	$d \geq 2,5$ mm
Camada de argila compactada	$d \geq 0,5$ mm; $k \leq 5 \times 10^{-10}$ m/s	$d \geq 0,5$ mm; $k \leq 5 \times 10^{-10}$ m/s
Camada permeável a gás	Não é necessário	Necessário

d: espessura da geomembrana plástica; k: coeficiente de permeabilidade.

Fonte: Adaptado de Simon e Muller (2004).

Já, nos EUA, o sistema de cobertura pode ser projetado de várias maneiras, a fim de atender os requisitos necessários para o fechamento dos aterros. Nos EUA tem-se uma especificação de espessura mínima da camada e da condutividade hidráulica para cada tipo de cobertura, sendo esses requisitos mostrados no Quadro 14.

Quadro 14 – Sistema de cobertura final mínimo exigido no EUA.

Tipo de cobertura	Sistema de camadas recomendado (do topo para baixo)	Espessura (cm)	Condutividade hidráulica (m/s)
Camada dupla (<i>double liner</i>)	Camada de superfície	30	Sem restrição
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Geomembrana	0,07 (PVC)	-
		0,015 (HDPE)	
Argila	45	$\leq 1 \times 10^{-7}$	
Camada composta (<i>composite liner</i>)	Camada de superfície	30	Não é aplicável
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Geomembrana	0,07 (PVC)	-
		0,015 (HDPE)	
Argila	45	$\leq 1 \times 10^{-7}$	
Camada simples de argila (<i>single clay liner</i>)	Camada de superfície	30	Não é aplicável
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Argila	45	$\leq 1 \times 10^{-7}$
Camada simples de argila (<i>single clay liner</i>) em semiárido	Blocos rochosos	5 – 10	Não é aplicável
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Argila	45	$\leq 1 \times 10^{-7}$
Camada simples sintética (<i>single synthetic liner</i>)	Camada de superfície	30	Não é aplicável
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Geomembrana	0,07 (PVC)	-
		0,015 (HDPE)	
Argila	45	$\leq 1 \times 10^{-7}$	
Cobertura natural	Solo	60	Não mais permeável que o solo que serve de base

Fonte: Adaptado de USEPA (2003).

2.2.3. Camada de base de aterros

Um dos principais problemas a ser controlado na base do aterro é o lixiviado. Em vista disso, os aterros sanitários possuem camadas que isolam a massa de resíduos do terreno natural, sendo uma delas a camada de base.

É de extrema importância a adequada impermeabilização da camada de base de aterros sanitários devido a biodegradação dos resíduos do aterro que geram subprodutos, em especial os gases e o lixiviado. Esses, portanto, devem ser coletados

e tratados de forma correta, pois são de grande poder de agressividade ao meio ambiente (KAWAI et al., 2012).

Uma das maiores utilizações em camadas de aterros são os *liners* argilosos de solo compactado, que visam barrar o fluxo vertical de lixiviado da massa de resíduos. Esse tipo de barreira, citada por diversas pesquisas (KNOP, 2007; REBELO, 2003; LOCASTRO e DE ANGELIS, 2016) é constituída de solo compactado, mas podem ser combinadas com outros materiais como carvão, cinzas, cimento, cal, fibras, bentonita, entre outros. Daniel (1993) ainda ressalta que, além do poder impermeabilizante, esse tipo de proteção tem condutividade hidráulica adequada e são resistentes quimicamente a ação do percolado.

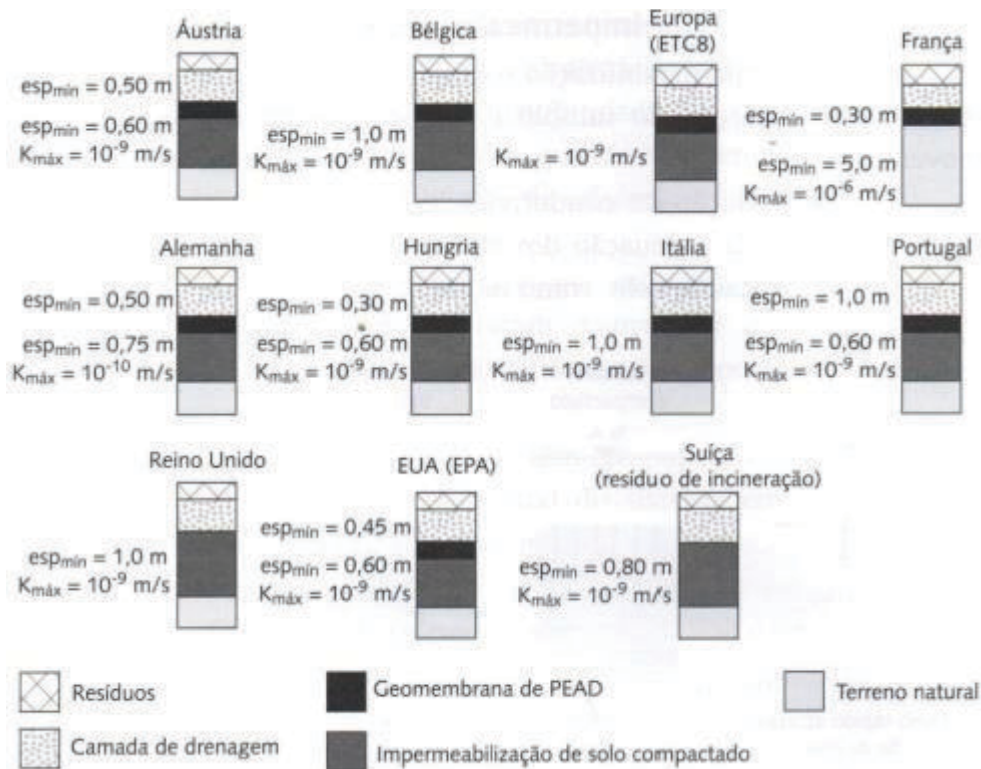
Além de uma camada de base adequada, Regadío et al. (2015) afirma a importância de uma drenagem eficiente que deve ser instalada no interior da célula, para que não haja acúmulo de lixiviado na camada da base. Essa drenagem é executada, geralmente, como material granular, georredes ou geocompostos drenantes, que perfazem um caminho preferencial de fluxo desse líquido para o local de tratamento.

Ferrari (2005) apresenta as exigências de configurações de camadas de base de aterro sanitário de alguns países, conforme Figura 8.

De acordo com a Figura 8 percebe-se que o Reino Unido e a Suíça são os únicos que não exigem a adoção de geossintéticos. A França, por exemplo, exige apenas uma camada de geomembrana. Os demais países citados na Figura (8) adotam o sistema de *liners* argilosos com geossintéticos.

Já a USEPA exige que as camadas de base devem ser constituídas de solo (com espessura mínima de 1,0 m) e coeficiente de permeabilidade inferior ou igual a 10^{-9} m/s. Ainda é possível verificar que a condutividade hidráulica para a camada de base de aterro sanitário para a maior parte dos países é da ordem de 10^{-9} m/s, com exceção da Alemanha e França. As espessuras de camada de solo compactado nesta camada variam de 0,6 m a 1,0 m, com exceção da França.

Figura 8 - Sistemas de camada de base para aterros sanitários segundo recomendações de alguns países.



Fonte: Adaptado de Ferrari (2005).

No Brasil, a NBR 13896 (ABNT, 1997) faz exigências vagas em relação ao coeficiente de permeabilidade e não exige outras características do solo. A normativa considera que depósitos naturais do solo são desejáveis se apresentarem coeficiente de permeabilidade mínimo de 10^{-8} m/s . No entanto, apesar de apresentar como desejável a condutividade hidráulica, não impõe nenhuma característica adicional, até mesmo com relação a configuração das camadas de solo compactado, energia de compactação, umidade, etc.. Como informação adicional, estabelece que a zona não saturada seja de no mínimo 3,0 m de profundidade.

Especificamente, no Estado de São Paulo, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) apresenta algumas recomendações para confecção de camadas de base de aterros sanitários: os solos utilizados devem possuir classificação, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos, como CL, CH, SC ou OH; coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-9} m/s ; no mínimo 30% do

material passando na peneira 200 (0,075 mm); limite de plasticidade (LP) maior que 30% e índice de plasticidade (IP) maior que 15%; e pH do solo maior que 7.

A CETESB ainda relata que os valores de coeficiente de permeabilidade exigem uma compactação criteriosa, portanto, em casos onde não se consegue alcançar os níveis mínimos estabelecidos deve-se realizar estudos com a utilização dos geossintéticos.

2.3. APLICAÇÕES DE SOLO-LETA NA ENGENHARIA CIVIL

Neste item serão apresentados alguns resultados obtidos em misturas de solos com lodo. Destaca-se que uma das aplicações principais da pesquisa é em camadas de base e cobertura de aterros sanitários. No entanto, além de apresentar estudos aplicados à aterros sanitários, ainda serão apresentados outros estudos de misturas solo+LETA, com o objetivo de verificar a viabilidade da aplicação em diferentes obras da engenharia civil.

Gonçalves et al. (2017) realizaram um estudo com o incremento de LETA – que utiliza cloreto férrico hexahidratado como coagulante - em solos para aplicação em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário, utilizando o lodo de estação de tratamento de água da cidade de Londrina, no estado do Paraná, e dois tipos de solos (um arenoso e um argiloso) da mesma região. O peso específico real dos grãos do LETA encontrado pelos autores foi de $2,75 \text{ g/cm}^3$. Não foi possível determinar os limites de liquidez e plasticidade para o LETA, portanto, o material foi classificado como não plástico. Ainda, os autores identificaram as seguintes características químicas para o LETA: pH igual a 5,1; teor de matéria orgânica igual a 31,56 g/kg; e CTC igual a 16,95 cmolc/kg.

Nas misturas de solo+LETA estudadas por Gonçalves et al. (2017), com relação ao ensaio de permeabilidade, comparando o solo argiloso com a mistura de solo argiloso e LETA (traço 1:0,5) o valor de coeficiente de permeabilidade diminuiu, passando de $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ para $6,3 \times 10^{-10} \text{ m/s}$. Na mistura de solo argiloso com LETA (traço 1:1) o coeficiente de permeabilidade foi de $3,1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$. Portanto, neste estudo, em termos de permeabilidade, as misturas incrementadas com LETA apresentaram melhor desempenho, se comparado ao solo argiloso natural, justificando a aplicação em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários de pequeno porte.

Em outro estudo, Castilhos Júnior, Prim e Pimentel (2011) estudaram a utilização de LETA e LETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário, sendo os materiais provenientes de Jurerê Internacional, localizada na área litorânea norte do município de Florianópolis, no estado de Santa Catarina. O solo utilizado nas misturas com o LETE e LETA trata-se de um solo argiloso.

A mistura estudada pelos autores (CASTILHOS JÚNIOR, PRIM e PIMENTEL, 2011) foi de solo incrementado com lodos de ETA + ETE na proporção 1:1 e estabilizado com 15% de cal em relação ao peso seco. Ao incorporar os materiais no solo, a granulometria passou de solo argiloso (aproximadamente 64% de argila) para um material de característica arenosa (aproximadamente 71% de areias fina, média e grossa). Os autores ainda encontraram um LL para mistura igual a 71%, LP igual 45% e IP igual a 26%. Se comparado ao solo natural, que apresentou um IP de 52%, a inclusão dos materiais (LETA, LETE e cal) reduziu a plasticidade do solo.

No mesmo estudo, realizado por Castilhos Júnior, Prim e Pimentel (2011), o peso específico real dos grãos passou de $2,62 \text{ g/cm}^3$ do solo natural para $2,47 \text{ g/cm}^3$ para mistura solo+LETA+LETE+cal, possivelmente creditada a baixa massa específica do LETA e do LETE. Os parâmetros de compactação para a mistura de solo+LETA+LETE+cal apresentaram valores de 37,9% para a umidade ótima e $1,23 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica aparente seca máxima. Por fim, os autores não identificaram uma variação considerável nos valores de coeficiente de permeabilidade do solo natural e das misturas, mas mesmo assim os valores obtidos foram aceitáveis para aplicação como camada de cobertura.

Santos, Scapin e Pinheiro (2018) realizaram um estudo de mistura de solo e LETA, ambos de Santa Maria/RS, para aplicação em aterros sanitários. Os principais resultados encontrados pelos autores para o solo, para as misturas solo+LETA e para o LETA são apresentados no Quadro 15.

De acordo com o Quadro 15, Santos, Scapin e Pinheiro (2018) encontraram o aumento das frações de areia média e grossa, aumento da fração de argila e redução na fração de silte, conforme se aumenta a porcentagem de LETA adicionado ao solo. Também, os autores encontraram tendência de redução do peso específico real dos grãos conforme aumenta o teor de LETA no solo. Os valores de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade aumentaram com o incremento de LETA no solo.

Quadro 15 – Resumo de resultados de ensaios de misturas solo+LETA e do LETA da cidade de Santa Maria/RS.

Parâmetros		Solo	85% Solo + 15% LETA	65% Solo + 35% LETA	LETA
Características Físicas	Pedregulho (%)	0	0	0	-
	Areia Grossa (%)	2	11	18	-
	Areia Média (%)	7	14	13	-
	Areia Fina (%)	25	8	4	-
	Silte (%)	40	34	32	-
	Argila (%)	26	33	33	-
	γ_s (g/cm ³)	2,835	2,744	2,637	2,474
Limites de Atterberg	LL (%)	40	55	70	-
	LP (%)	26	38	58	-
	IP (%)	14	17	12	-
Compactação	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kg/m ³)	1625,00	1450,00	1270,00	-
	w _{ót} (%)	21,00	27,20	35,80	-
Permeabilidade	k (m/s)	3,843x10 ⁻¹⁰	4,026x10 ⁻¹⁰	2,053x10 ⁻⁹	-

γ_s : peso específico real dos grãos; LL: limite de liquidez; LP: limite de plasticidade; IP: índice de plasticidade; $\gamma_{dm\acute{a}x}$: peso específico aparente seco máximo; w_{ót}: umidade ótima; k: coeficiente de permeabilidade.

Fonte: Adaptado de Santos, Scapin e Pinheiro (2018).

Os autores (SANTOS, SCAPIN e PINHEIRO, 2018) verificaram redução do peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima conforme se aumenta a porcentagem de LETA no solo, para energia normal de compactação. Por fim, o coeficiente de permeabilidade reduziu quando adicionado 15% de LETA ao solo (se comparado ao solo) e aumentou com adição de 35% de LETA.

No estudo de Vaz Coelho et al. (2015) os autores utilizaram diferentes solos (um solo argiloso e um solo arenoso) com lodo de estação de tratamento de água da ETA de Cafezal (Londrina/PR) para aplicação na pavimentação rodoviária. Com a aplicação, os autores perceberem que a adição de lodo ao solo altera as características de compactação, conforme resultados apresentados no Quadro 16. Para algumas das misturas os autores realizaram a análise do Índice Suporte Califórnia e da expansão, sendo os resultados apresentados também no Quadro 16.

Quadro 16 – Parâmetros de compactação, ISC e expansão para as misturas do estudo de Vaz Coelho.

Descrição do material	Umidade Ótima - $W_{ót}$ (%)	Massa específica seca - γ_d (g/cm ³)	ISC (%)	Expansão (%)
Solo argiloso	32,00	1,44	18,56	0,15
Solo argiloso-LETA (1:1)	31,00	1,46	10,67	1,27
Solo argiloso-cimento (10%)	30,00	1,53	-	-
Solo argiloso-LETA-cimento (1:1 – 10%)	29,50	1,54	-	-
Solo arenoso	14,00	1,86	10,86	0,48
Solo arenoso-cimento (10%)	12,90	1,88	-	-
Solo arenoso-LETA (1:0,25)	14,50	1,80	4,62	1,44

Fonte: Adaptado de Vaz Coelho et al. (2015).

Pelo Quadro 16 é possível observar que com a adição do lodo de ETA, em seu estado seco e granular, na mistura de solo argiloso–cimento, houve um aumento na massa específica seca máxima da mistura, se comparado ao solo e a mistura solo argiloso–cimento sem a adição do lodo de ETA. Também, percebe-se que a mistura de solo arenoso-cimento (10%) tem a maior massa específica seca. O valor de massa específica seca máxima do solo apresenta valor maior que o da mistura solo-lodo e isso se deve ao fato de que o índice de vazios da mistura solo-lodo ($e = 0,50$) foi maior que o do solo ($e = 0,44$), após a compactação.

Ainda, com relação ao estudo de Vaz Coelho et al. (2015), o Quadro 16 mostra que o solo arenoso apresenta maior resistência à penetração que a mistura solo arenoso-LETA, em função de a massa específica seca máxima do solo ser maior que a da mistura solo arenoso-LETA. A expansão foi maior na mistura solo arenoso-LETA devido ao menor índice de vazios quando comparado com o solo arenoso. Isto acarreta maior infiltração da água, cujo resultado leva a uma maior expansão.

Ao verificar o Quadro 16, o maior valor de ISC e o menor valor de expansão foram obtidos para o solo argiloso. Por outro lado, a mistura de solo arenoso-LETA apresentou o menor ISC e a maior expansão. Como esperado, a expansão da mistura solo argiloso-LETA foi maior que a do solo argiloso, tendo em vista que o índice de vazios da mistura solo argiloso-LETA é maior que a do solo argiloso.

Vaz Coelho et al. (2015) também estudaram a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura para as misturas solo argiloso-cimento e solo argiloso-cimento-LETA. Em média, os resultados de RCS foram 0,53 MPa para a mistura solo argiloso-cimento e 0,27 MPa para a mistura solo argiloso-cimento-LETA, demonstrando que a adição de LETA provocou uma redução na resistência do material, ou seja, uma redução na qualidade do conjunto. Isso se explica pela falta de coesão entre as partículas, pois os grãos de LETA são muito lisos, o que dificulta a reação com o cimento. Portanto, neste estudo, embora a mistura com LETA tenha apresentado uma melhora na granulometria do solo, ocorreu diminuição da resistência, pela falta de entrosamento (contato) entre as partículas do solo-lodo-cimento.

Já, em outro estudo (PEREIRA, 2012), para fins comparativos, o autor estudou a aplicação de cinza de LETE de Natal/RN na pavimentação. A adição de cinza de lodo de estação de tratamento de esgoto a uma mistura de solo-cimento (9%) apresentou resistência de 22,61 kgf/cm². Quando adicionado cinza de lodo nos teores 5, 10, 20 e 30% em peso de sólidos em substituição ao solo os valores de RCS variaram entre 24,22 e 28,46 kgf/cm². Neste caso, houve um aumento de RCS para todos os teores de cinza de LETE incorporados as misturas de solo-cimento. A maior resistência foi para a adição de 20% de cinza de lodo, com um aumento de 25,87% em relação ao traço referência (solo natural).

Resultados semelhantes foram obtidos por Monzó et al. (1996), que concluíram que ao substituir 15% de cimento Portland por cinza de lodo a resistência à tração e à compressão na mistura tiveram ganhos. O autor atribui o ganho às propriedades pozolânicas da cinza de LETE.

No estudo de Montalvan (2016), o autor realizou ensaios de compressão triaxial, a fim de obter a resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito e coesão) em misturas de solo-LETA – com lodo da ETA de Cubatão/SP - nas proporções 3:1, 4:1 e 5:1 (Solo:LETA), e obteve os resultados apresentados no Quadro 17.

Pelos parâmetros de resistência determinados por Montalvan (2016) pode-se observar que os resultados determinados pela envoltória de resistência nos diagramas de trajetória de tensões concordam com os valores das envoltórias do círculo de Mohr.

Quadro 17 - Parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas do estudo de Montalvan.

Parâmetro		Material			
		Mistura 3:1	Mistura 4:1	Mistura 5:1	Solo
Trajetória de tensões	c' (kPa)	10,0	15,0	17,0	22,0
	Φ' (°)	37,0	35,0	34,0	34,0
Círculo de Mohr	c' (kPa)	10,0	15,0	18,0	22,0
	Φ' (°)	37,5	35,0	34,0	34,0

Fonte: Adaptado de Montalvan (2016).

Com relação as misturas, percebe-se pelo Quadro 17 que o solo e a mistura 5:1 apresentaram o menor ângulo de atrito efetivo, com um valor de 34°, mas apresentaram os maiores valores de coesão efetiva, 22 e 18 kPa, respectivamente. A mistura 3:1 apresentou o maior ângulo de atrito, com um valor de 37°, e o menor valor de coesão efetiva, 10 kPa. A mistura 4:1 apresentou o ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva com valores intermediários, respectivamente de 35° e 15 kPa. Esses resultados indicam que quanto maior a quantidade de LETA presente na mistura maior é o ângulo de atrito efetivo e menor a coesão efetiva.

Kizinievic et al. (2013) realizaram estudos com LETA na Lituânia, com adição do material para produção de cerâmicas. Os autores identificaram que a adição de 5% de lodo aumentou a densidade do corpo de prova de 5% a 14% e a resistência à compressão de 36% a 50%. Já, a adição de 40% de LETA proporcionou redução da densidade de 10% a 22% e na resistência à compressão de 43% a 49%.

Rodrigues e Holanda (2013) avaliaram a influência da incorporação de LETA – de Campos dos Goytacazes/RJ - nas propriedades de tijolos solo-cimento. No estudo foram analisadas as misturas 90% Solo + 10% Cimento, 88,75% Solo + 10% Cimento + 1,25% LETA, 87,50% Solo + 10% Cimento + 2,5% LETA e 85,00% Solo + 10% Cimento + 5,00% LETA, no intuito de analisar somente a influência do LETA nas misturas.

Neste estudo, Rodrigues e Holanda (2013) puderam verificar que a absorção de água é fortemente influenciada pela adição do lodo de ETA. Os autores identificaram um aumento da absorção de água com a adição do lodo de ETA e, concomitante, encontraram uma redução na massa específica com o incremento de

LETA. Na resistência à compressão simples, aos 28 dias de cura, foi identificado uma redução no parâmetro com a incorporação do resíduo. A RCS foi de aproximadamente 5,2 MPa (melhor desempenho) para mistura 90% Solo + 10% Cimento e 4,3 MPa (pior desempenho) para 85,00% Solo + 10% Cimento + 5,00% LETA. Os autores creditaram a redução da propriedade mecânica devido ao lodo de ETA influenciar na hidratação do cimento, particularmente na finalização das fases hidratadas do cimento.

Já, Castão et al. (2017) realizaram um estudo com o reuso do LETA – da ETA de Cabuçu na cidade de Guarulhos/SP - na fabricação de tijolos cerâmicos. Foram testadas proporções de 10, 20 e 30% (em peso) de lodo incorporado à massa de argila na fabricação dos tijolos cerâmicos. Os autores observaram que o aumento de lodo na massa cerâmica causa elevação na taxa de absorção de água pelos corpos de prova da ordem de 15% (tijolo referência) para cerca de 40% (tijolos com 30% de lodo), refletindo na queda da qualidade dos tijolos confeccionados. Todavia, a incorporação de 10% de lodo na conformação dos tijolos apresentou melhores resultados quando comparado com o tijolo referência.

Ainda, no mesmo estudo – Castão et al. (2017) – os autores verificaram que o aumento da massa de lodo na mistura lodo/argila faz com que os corpos de prova fiquem mais frágeis, ou seja, a adição do lodo diminui a resistência à compressão do tijolo, de 7,01 MPa (tijolo referência) para 0,39 MPa (tijolos com 30% de lodo). A adição de 20% de lodo propiciou uma resistência à compressão de 1,00 MPa e a adição de 10% gerou 3,80 MPa de RCS. Os autores consideraram inviável a adição de 20% e 30% de lodo na argila, pois reduziu consideravelmente a resistência mecânica do produto final, dificultando até o seu manuseio no momento dos testes. Contudo, a incorporação de 10% de lodo apresenta valores aceitáveis para aplicação, segundo as normativas de blocos cerâmicos.

Figueiredo e Nuvolari (2004) avaliaram o uso de LETA – de São Roque/SP - na fabricação de tijolos maciços cerâmicos, nas proporções de 10, 20, 30 e 40%. Os autores verificaram que o acréscimo de 10% de LETA na cerâmica aumentou a absorção de água com relação ao tijolo referência, passando de 9,94% para 10,66%. O incremento de 20, 30 e 40% de LETA proporcionaram leve redução na absorção de água. Em termos de resistência à compressão simples foi verificada uma redução no parâmetro com o aumento do incremento de LETA. O tijolo referência apresentou RCS de 4,38 MPa, enquanto as misturas com 10, 20, 30 e 40% de lodo apresentaram

resistência à compressão de 3,47, 2,92, 2,83 e 2,63 MPa, respectivamente. Neste estudo, todas misturas foram consideradas aptas para utilização, de acordo com as normas para tijolos cerâmicos maciços.

Ainda, mesmo que não apresentados aqui, é importante destacar outras aplicações do LETA em obras de engenharia, identificadas durante as pesquisas realizadas. O material também já foi estudado como fabricação de agregados leves, como pigmentos para argamassa, como matéria prima para fabricação de aglomerante hidráulico, em misturas asfálticas, no uso como matéria prima em mistura asfáltica e em misturas para base e sub-base de pavimentos.

Por fim, em uma análise geral deste capítulo, pode-se destacar as tendências dos estudos apresentados. A adição de LETA tende a provocar uma redução no peso específico real dos grãos do solo, bem como uma redução no peso específico aparente seco máximo e aumento na umidade ótima. Essa tendência de aumento da umidade ótima com inclusão de LETA vai ao encontro dos resultados de absorção citados, que mostram que o incremento de LETA proporciona maior absorção de água.

Em termos de permeabilidade, os estudos mostram que há tendência de reduzir a permeabilidade com pequenas porcentagens de lodo de estação de tratamento de água e aumento da mesma com maiores teores do material. A depender do tipo de solo a resistência à compressão simples pode reduzir com a inclusão de LETA, mas a maior parte das pesquisas mostra que o parâmetro tende a aumentar com menores teores e reduzir com maiores incorporações de LETA.

Por fim, pôde-se observar que a resistência ao cisalhamento tende a apresentar redução na coesão da mistura e acréscimo no ângulo de atrito, conforme se adiciona LETA no solo. Mas ressalta-se que o LETA tem características distintas de estação para estação e de lote para lote, podendo ocasionar comportamentos diferentes dos citados.

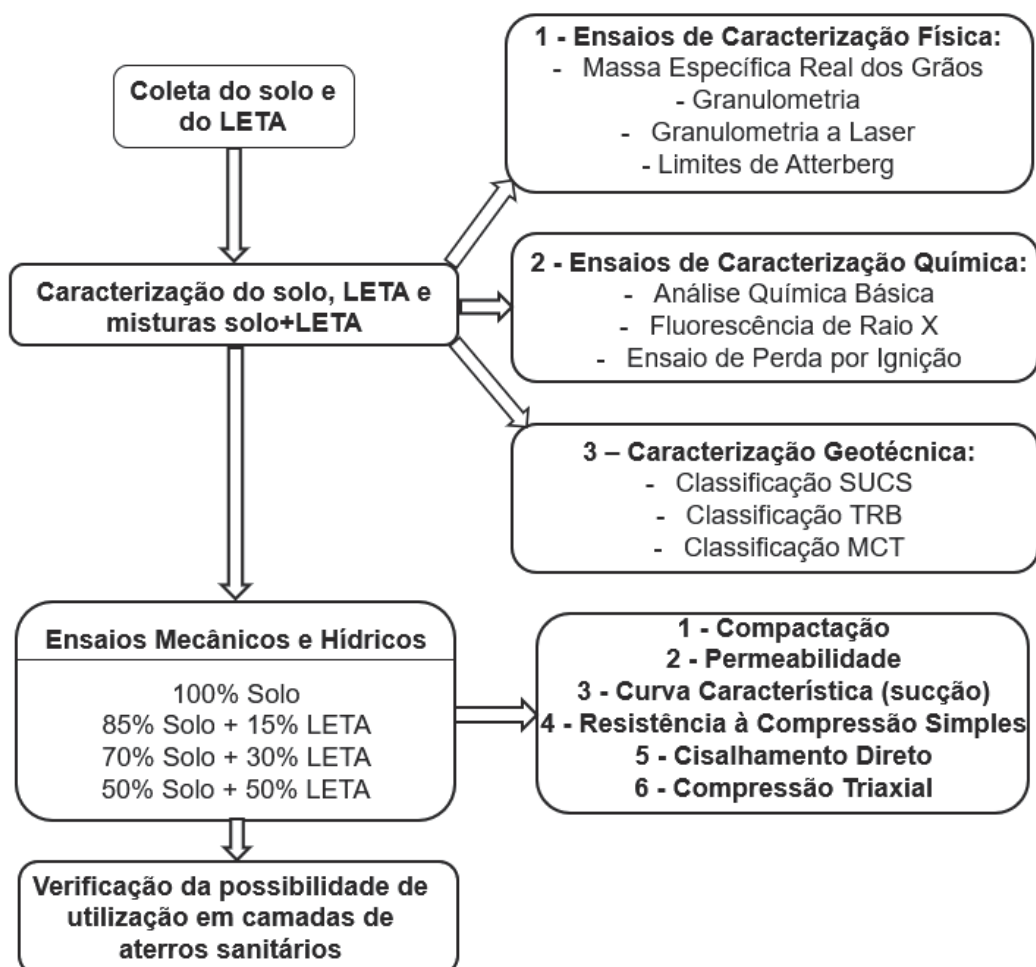
3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta informações gerais sobre a jazida, as características dos materiais empregados na pesquisa, os critérios adotados para a escolha desses materiais e os métodos utilizados para realização dos experimentos laboratoriais. Portanto, todos os procedimentos realizados nesta pesquisa serão descritos detalhadamente no presente capítulo.

3.1. ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

O planejamento da pesquisa é esquematizado por meio do fluxograma apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma da pesquisa.



A metodologia consistiu de quatro etapas de trabalho onde foram desenvolvidas as seguintes atividades:

(a) definição do tema de pesquisa, planejamento e revisão de literatura: após a definição do objetivo de estudo da dissertação, realizou-se um levantamento de dados bibliográficos acerca do tema definido, disponíveis em livros, artigos, anais de eventos, teses, dissertações, entre outros;

(b) escolha da jazida de solo e coleta de amostras, bem como coleta do LETA: nesta etapa foi definida a jazida de solo a ser explorada, onde ocorreu a coleta de amostras para posterior realização dos ensaios geotécnicos. Também, nesta etapa, fez-se a coleta do LETA para posterior análise do mesmo em misturas com o solo;

(c) etapa de laboratório: foram realizados os ensaios de caracterização física e mecânica, englobando os ensaios para a avaliação da sucção, permeabilidade e da resistência do solo e de misturas solo+LETA; e

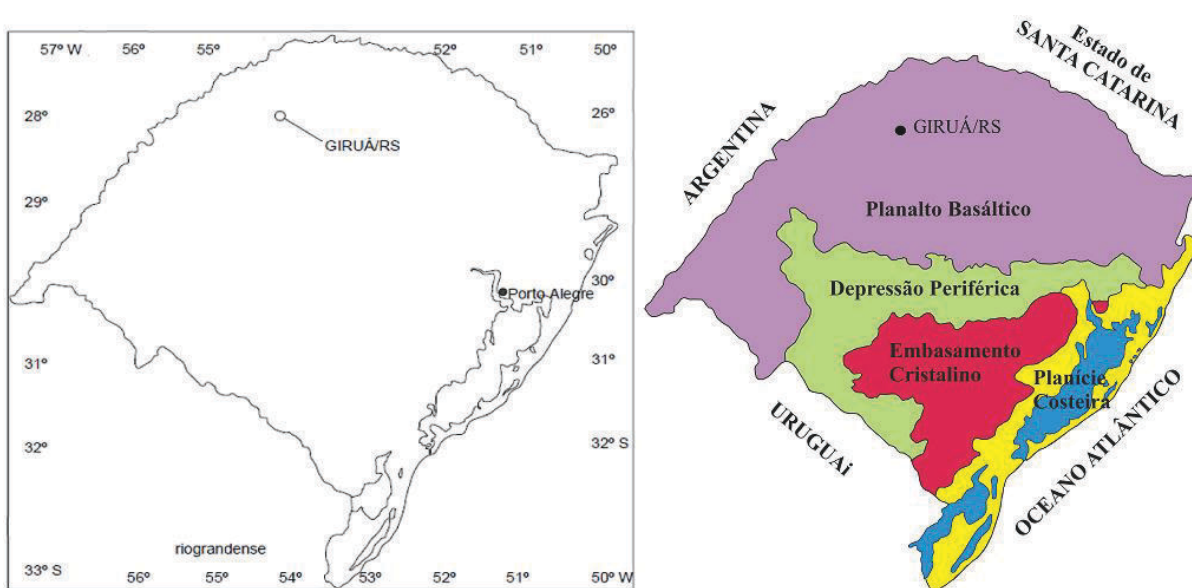
(d) análise de utilização em camadas de aterros sanitários: os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais foram compilados e verificada a possibilidade de utilização do solo e das misturas solo+LETA para camadas de base e cobertura de aterros sanitários.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

O solo utilizado na pesquisa foi coletado junto ao aterro sanitário da Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), localizada na cidade de Giruá/RS. Na Figura 10 é mostrado o mapa localizando a cidade de Giruá, no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ainda, na mesma figura (10) é apresentada a localização da cidade no mapa geomorfológico do estado do RS, estando situada no planalto basáltico. Já, na Figura 11 é mostrada a localização da CRVR, local onde o solo foi coletado. As coordenadas geográficas do local de coleta do solo são: 28° 01' 44.0" S e 54° 23' 18.8" W.

O solo em estudo é da formação serra geral, formado a partir de derrames basálticos. Destaca-se que o solo em estudo é utilizado nas células deste aterro.

Figura 10 - Localização da cidade de Giruá/RS.



Fonte: Adaptado de UFRGS (2019).

Figura 11 - Local de coleta do solo – CRVR – Unidade de Giruá/RS.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

O lodo de estação de tratamento de água utilizado na pesquisa é proveniente da estação do município de Santa Maria/RS, na empresa CORSAN, localizada na Rua Elízio Dorneles, Chácara das Flores.

Para realização dos ensaios foi utilizada água destilada. O processo de destilação da água proveniente do sistema de abastecimento urbano das cidades de Santa Maria e Frederico Westphalen foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria e no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI), campus de Frederico Westphalen.

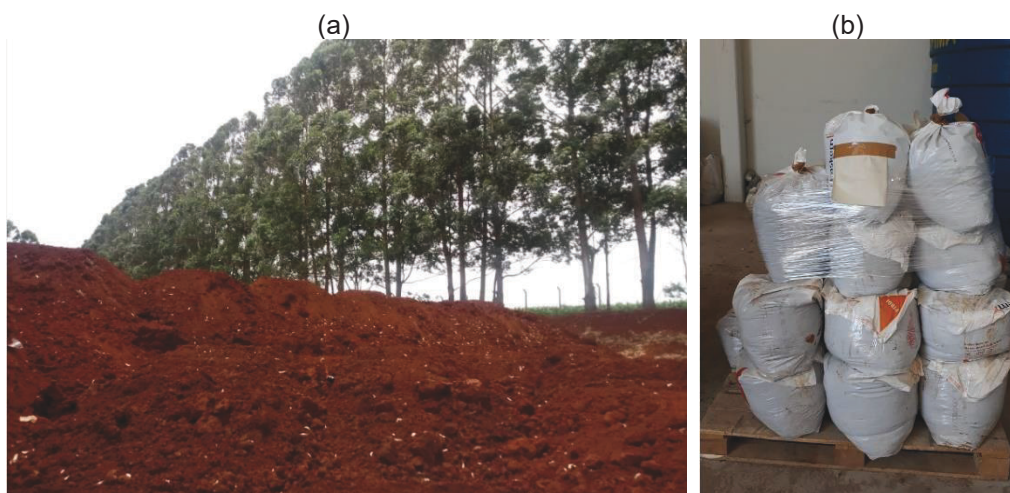
3.3. MÉTODOS

3.3.1. Coleta e preparo dos materiais

O solo foi coletado obedecendo as especificações da NBR 9604 (ABNT, 2016) - Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo. Previamente, antes da escavação, foi realizada uma limpeza superficial do terreno, retirando qualquer vestígio de vegetação presente, conforme especificado pela normativa. O ponto de coleta do material, no aterro sanitário da CRVR, é mostrado na Figura 12a. O material coletado, aproximadamente 400 kg, foi acondicionado em bolsas limpas para o transporte (Figura 12b), os quais também foram fechados a fim de não perder umidade e não haver contaminação do solo.

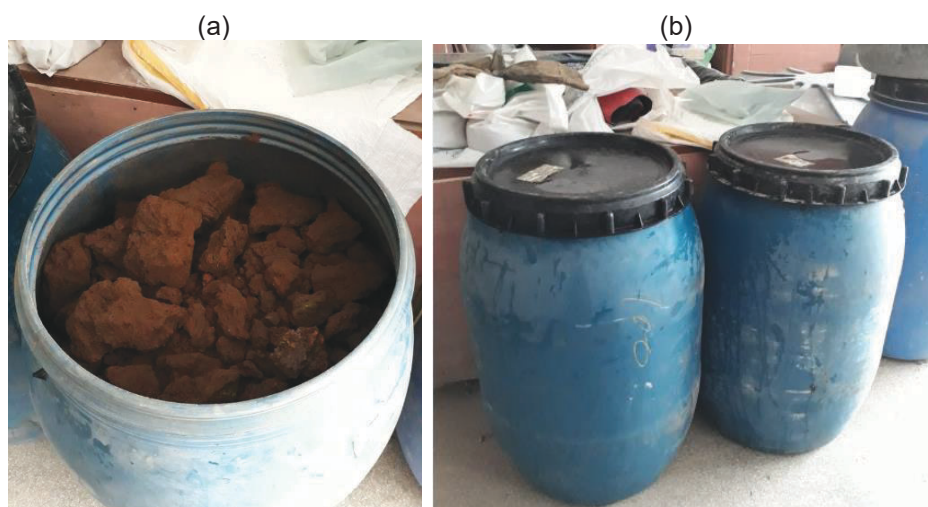
O LETA foi coletado diretamente de um *container* na Estação de Tratamento de Água de Santa Maria/RS, na empresa CORSAN. O mesmo foi acondicionado em bombonas plásticas e armazenado em laboratório para posterior realização dos ensaios. O material passou pelo processo de secagem prévia para utilização nos ensaios. Na Figura 13a é mostrado o LETA na bombona plástica e a Figura 13b mostra o mesmo armazenado em laboratório.

Figura 12 – (a) Ponto de coleta do solo na CRVR; (b) solo armazenado em sacos no laboratório.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Figura 13 – (a) LETA na bombona plástica; (b) armazenamento do LETA em laboratório.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

3.3.2. Dosagem e mistura

Como o solo e o LETA foram previamente secos ao ar, os mesmos foram misturados e homogeneizados para posteriormente ser adicionada água às misturas. As misturas estudadas são apresentadas no Quadro 18. É importante destacar que as misturas foram calculadas em relação ao peso seco dos materiais.

Quadro 18 – Misturas.

Nomenclatura	Solo (%)	LETA (%)
Solo	100	0
85% Solo + 15% LETA	85	15
70% Solo + 30% LETA	70	30
50% Solo + 50% LETA	50	50

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

3.3.3. Ensaios de caracterização

A preparação do solo para os ensaios de caracterização e compactação seguiu as recomendações da norma NBR 6457 (ABNT, 2016) – Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e caracterização.

O solo e o LETA passaram pela secagem ao ar até atingirem valores de umidade próximo à higroscópica. Após a secagem, o solo e o LETA foram destorroados e peneirados para serem novamente acondicionados em sacos, a fim de posteriormente realizar todos os ensaios. Para cada ensaio de caracterização foram realizadas três repetições. A Figura 14 apresenta os materiais utilizados na pesquisa após preparo dos mesmos.

Figura 14 – (a) Solo peneirado; (b) LETA peneirado.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Para a caracterização física do solo, do LETA e das misturas solo+LETA inicialmente foi realizado o ensaio de peso específico real dos grãos, seguindo as diretrizes da NBR 6458 (ABNT, 2016) – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.

Posteriormente, foi realizado o ensaio de análise granulométrica para o solo e misturas solo+LETA segundo a NBR 7181 (ABNT, 2016) – Solo: análise granulométrica, executado através do peneiramento e sedimentação (o ensaio foi realizado em duas condições, com e sem defloculante – hexametáfosfato de sódio). No entanto, em função da proximidade dos resultados obtidos para as amostras de solo (três amostras com e três sem defloculante), para as misturas solo+LETA optou-se por realizar o ensaio com uma amostra para cada condição. Já, para o LETA não foi possível obter resultados quanto ao ensaio de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, visto que a alta concentração de alumínio presente no mesmo, fez com que o material não reagisse com a solução de 125 cm³ de hexametáfosfato de sódio, estabelecida pela norma no processo de sedimentação.

Os Limites de Atterberg foram executados para o solo, o LETA e para as misturas solo+LETA, a fim de verificar a alteração dessas propriedades com a inclusão do LETA. A determinação do Limite de Liquidez foi realizada conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016) – Solo: determinação do Limite de Liquidez, através do aparelho de Casagrande. Já a determinação do Limite de Plasticidade foi de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016) – Solo: determinação do Limite de Plasticidade.

Os ensaios de caracterização supracitados foram todos realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria.

A fim de determinar o tamanho das partículas foi realizado o ensaio de granulometria por difração a laser. Neste método as partículas são dispersas num fluido em movimento causando descontinuidades no fluxo do mesmo, que são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho de partículas. O equipamento analisador de partículas utilizado no ensaio é da marca CILAS, modelo 1180.

Para este ensaio, inicialmente as amostras foram destorroadas e posteriormente houve a necessidade de se fazer um peneiramento das amostras na peneira n° 20 (abertura 0,84 mm) para evitar um espalhamento muito alto no espectro de difração, que ocasiona erros de leitura devido a poucas partículas muito grossas.

As amostras para esse ensaio foram preparadas individualmente (em torno de 5 g de cada amostra) e enviadas para análise no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para este ensaio o laboratório disponibilizou a média do resultado de três amostras para cada material. Este ensaio foi realizado para o solo, LETA e misturas solo+LETA.

3.3.4. Análise química

Para os ensaios de caracterização química foram utilizados 200 g de cada mistura, passantes na peneira de nº 10 (abertura de 2,0 mm). A análise química das misturas foi realizada no Laboratório de Análise de Solos e Tecidos Vegetais da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, campus de Frederico Westphalen. Cabe ressaltar que o referido laboratório é certificado pela Sociedade Brasileira da Ciência do Solo. O intuito do ensaio é identificar a textura, o pH, a capacidade de troca catiônica – CTC, a saturação de bases e alumínio e outros cátions presentes nos materiais em estudo.

Também na intenção de identificar os elementos presentes nas amostras foi realizado o ensaio de fluorescência de raios-X em todas as misturas estudadas. Este ensaio permite identificar a proporção (concentração) de cada elemento na amostra. Para o ensaio de fluorescência de raios-X foram preparadas em torno de 30 g de cada mistura, passantes na peneira nº 200 (abertura de 0,075 mm). As amostras foram preparadas e enviadas para análise no Laboratório de Análises Químicas (LACHEM) da Universidade Federal de Santa Maria.

Os resultados de análise química e de fluorescência de raio-X foram obtidos a partir da média de três amostras ensaiadas.

3.3.5. Teor de matéria orgânica – perdas por ignição

Para determinação do teor de matéria orgânica das misturas estudadas foi utilizado o método das perdas por ignição (PPI). Contudo, é conhecido que as perdas por ignição podem não corresponder somente as perdas de matéria orgânica, esse fato é justificado por possíveis perdas de outras substâncias, tais como água de constituição e carbonatos, que podem ocorrer no momento em que a temperatura é elevada.

As amostras das misturas foram inicialmente submetidas a temperatura de 60°C (+/- 5°C) durante 48 horas, a fim de eliminar água livre. Antes da retirada definitiva das amostras da estufa foram realizadas diversas pesagens das mesmas para verificar se toda a água livre realmente tinha sido eliminada. Não constatada a variação do peso da amostra, considerou-se a mesma como seca. Ressalta-se que a temperatura de 60°C por um período de 48 horas foi definida em função do LETA, já que ao submetê-lo a temperaturas mais elevadas (110°C, por exemplo) poderia ocorrer a queima de matéria orgânica, antes mesmo da mistura ser exposta a temperaturas mais elevadas, de até 540°C.

Posteriormente, as amostras foram expostas, em muflas, a temperaturas de 540 °C (+/- 20°C), até a estabilização do peso. As perdas por ignição (PPI) foram então calculadas de acordo com a expressão da Equação 1, adaptada da norma NBR 13600 (ABNT, 1996).

$$PPI (\%) = \left(1 - \frac{W^{t^{\circ}C}}{W^{60^{\circ}C}} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

- PPI: Perda por ignição, em %;
- $W^{t^{\circ}C}$: peso do solo seco na temperatura final (mufla), em gramas;
- $W^{60^{\circ}C}$: peso do solo seco na temperatura de 60°C, em gramas.

Esse ensaio foi repetido três vezes para o solo, para o LETA e para as misturas solo+LETA, sendo o mesmo executado no LMCC da UFSM.

3.3.6. Ensaio de compactação

Para a determinação dos valores dos pesos específicos aparentes secos máximos e das umidades ótimas do solo e das misturas de solo+LETA foram realizados ensaios de compactação no cilindro Proctor. Neste estudo, prevaleceu a utilização da energia intermediária. Ressalta-se que pela má trabalhabilidade e pelo alto poder de absorção de água do LETA não foi possível realizar o ensaio de compactação deste material (100% LETA).

Os ensaios de compactação seguiram as diretrizes da norma NBR 7182 (ABNT, 2016) – Solo: ensaio de compactação. Os ensaios de compactação foram realizados no LMCC da UFSM. A forma de compactação foi manual.

Os ensaios de compactação do solo e das misturas solo+LETA foram realizados três vezes para cada material, utilizando para os ensaios posteriores os valores médios de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima. No Quadro 19 é apresentado o número de curvas de compactação realizadas.

Quadro 19 – Número de curvas de compactação.

Mistura	Energia	Números de curvas
Solo	Intermediária	3
85% Solo + 15% LETA	Intermediária	3
70% Solo + 30% LETA	Intermediária	3
50% Solo + 50% LETA	Intermediária	3
Total de curvas		12

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

3.3.7. Classificações geotécnicas

Inicialmente, de posse dos dados de caracterização física dos materiais, o solo e as misturas solo+LETA foram classificadas segundo os sistemas tradicionais: Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e Sistema Rodoviário de Classificação de Solos (TRB - *Transportation Research Board*). A fim de complementar a classificação geotécnica dos materiais, os mesmos foram classificados segundo a metodologia de classificação MCT.

Pela metodologia de classificação MCT os solos são classificados de acordo com seu comportamento – laterítico ou não laterítico – por meio de dois índices (c' e e') determinados por meio do ensaio de compactação Mini-MCV e ensaio de perda de massa por imersão. O coeficiente c' é obtido pela inclinação das curvas de deformabilidade. Já, o índice e' é obtido pela Equação 2.

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d_r}} \quad (2)$$

Onde:

- e' : índice de laterização;
- P_i : perda de massa por imersão, em %;
- d' : coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes.

Com os parâmetros c' e e' definidos é possível classificar o solo a partir do ábaco de classificação MCT.

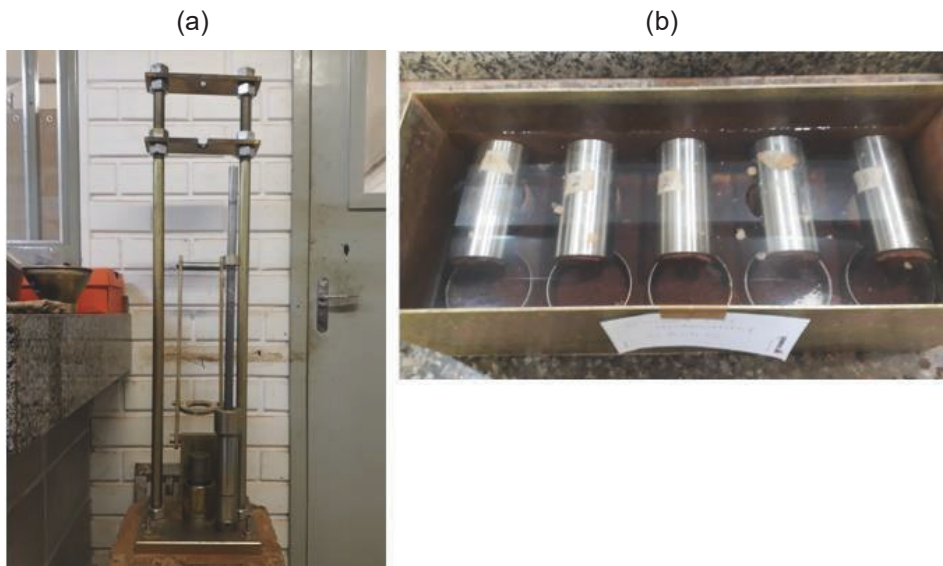
Nesta pesquisa os ensaios para a classificação MCT foram realizados atendendo as normativas rodoviárias do DNER: DNER-ME 256/94 (Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão) e DNER-ME 258/94 (Solos compactados em equipamento miniatura – Mini MCV).

As amostras foram preparadas com material passante na peneira nº 10 (abertura de 2 mm), devidamente misturadas e ensacadas pelo período mínimo de 24 horas, para homogeneização das amostras. A moldagem dos corpos de provas foi realizada em cilindros de 50 mm de diâmetro e 130 mm de altura, controlando o número de golpes e os critérios de parada previstos em norma.

Após a compactação, as amostras foram submersas em água por um período de 24 horas para determinação da perda de massa por imersão. A Figura 15 apresenta (a) o equipamento utilizado na compactação e (b) as amostras durante o ensaio de perda por imersão.

Para fins de complementação e comparativo com a classificação MCT pelo método da imersão, foi realizado o ensaio pelo método das pastilhas, de acordo com o proposto por Nogami e Villibor (1994). Para este ensaio são utilizadas amostras passantes na peneira nº 40 (abertura 0,42 mm). Busca-se nesse ensaio obter o valor de contração diametral das pastilhas (após umedecimento e secagem), bem como o valor de penetração da agulha do penetrômetro após o processo de reabsorção de água. Com o valor de contração diametral da amostra é possível calcular o coeficiente c' e, por fim, classificar o material em estudo.

Figura 15 – (a) Equipamento de compactação miniatura; (b) amostras em imersão.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

A Figura 16 apresenta o penetrômetro e as pastilhas utilizadas na classificação MCT pelo método das pastilhas.

Figura 16 – Penetrômetro e pastilhas utilizadas no método das pastilhas para classificação MCT.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Os ensaios de classificação MCT, pelo método da imersão e pelo método das pastilhas, foram realizados para o solo e misturas solo+LETA. Para cada mistura

foram realizadas três repetições do ensaio. Os ensaios por ambos métodos foram executados no setor de geotecnia do LMCC da UFSM.

Ressalta-se também que os ensaios foram realizados para as misturas solo+LETA para verificar as possíveis alterações de comportamento do solo com a substituição parcial por LETA. Para o LETA tentou-se realizar o ensaio de classificação MCT pelo método das pastilhas, mas não foi possível pois o material não apresentou plasticidade necessária para penetração da agulha do penetrômetro. Pelo método de perda por imersão não foi realizado o ensaio para o LETA visto que não foi possível moldar o mesmo, pelas características distintas desse resíduo, quando comparadas a um solo.

3.3.8. Ensaio de permeabilidade

A determinação do coeficiente de permeabilidade do solo e das misturas solo+LETA foi realizado seguindo os procedimentos da NBR 14545 (ABNT, 2000) – Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. O ensaio baseia-se na lei de Darcy, pressupondo a existência de proporcionalidade direta entre as velocidades de fluxo e os gradientes hidráulicos. Admite-se também a continuidade do escoamento, sem variações no volume do solo e a saturação total do corpo de prova.

Os corpos de prova foram compactados com amostras de material passantes na peneira de nº 10 (abertura de 2 mm), considerando o teor ótimo de compactação. Após a compactação, o corpo de prova foi extraído do molde e suas dimensões e massa determinadas. O corpo de prova foi coberto por uma camada de parafina e, já no molde, foi envolto por argila bentonítica, para a água percolar apenas no sentido vertical. Fez-se então a saturação do corpo de prova por meio de percolação no sentido ascendente.

Após a saturação, foi conectado ao sistema de aplicação e medição de cargas hidráulicas, efetuando as medidas das mesmas, dos tempos decorridos e da temperatura da água que percolou pelo corpo de prova.

O ensaio foi realizado até o momento em que 4 valores medidos se tornassem constantes. Posteriormente a execução do ensaio, calculou-se os coeficientes de permeabilidade, de acordo com a Equação 3.

$$k = \frac{a \cdot H}{A \cdot \Delta t} * \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3)$$

Onde:

- k: coeficiente de permeabilidade, em cm/s;
- A: área do corpo de prova, em cm²;
- H: altura do corpo de prova, em cm;
- Δt: variação de tempo, em s;
- h1: carga hidráulica no instante t1, em cm;
- h2: carga hidráulica no instante t2, em cm;
- a: área interna da bureta de vidro, em cm².

Foi realizada a correção do coeficiente de permeabilidade em função da temperatura, pois o mesmo deve ser apresentado com relação à temperatura de 20°C. Para essa correção utilizou-se a Equação 4.

$$k_{20} = R_T * k \quad (4)$$

Onde:

- k₂₀: coeficiente de permeabilidade à temperatura de 20°C, em cm/s;
- R_T: relação de viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade com a temperatura de 20°C.

Ressalta-se que o coeficiente de permeabilidade foi apresentado em m/s, visto que é geralmente a unidade utilizada para fins de análise em aterros sanitários. Os ensaios de permeabilidade do solo e das misturas solo+LETA foram realizados três vezes, a fim de se obter a média dos resultados.

Além do ensaio de permeabilidade seguindo as diretrizes da norma brasileira, também foi realizado o ensaio com uma amostra de cada mistura utilizando a metodologia MCT. Esse procedimento foi executado a fim de validar os resultados obtidos no ensaio segundo a NBR 14545 (ABNT, 2000). Na metodologia MCT, de acordo com Villibor e Nogami (2009), o ensaio é feito de maneira expedita e simplificada.

Primeiramente as amostras (passantes na peneira #10) foram compactadas de acordo com o método de ensaio DNER-ME 228/94 (Solo – Compactação em equipamento miniatura). A compactação foi realizada nos mesmos cilindros utilizados para classificação MCT (50 mm de diâmetro por 130 mm de altura) e o peso específico aparente seco foi controlado através da altura do corpo de prova (50 mm \pm 1 mm). Nesse caso, o próprio cilindro é empregado como um permeâmetro de parede rígida.

No Quadro 20 é apresentado o número de ensaios de permeabilidade.

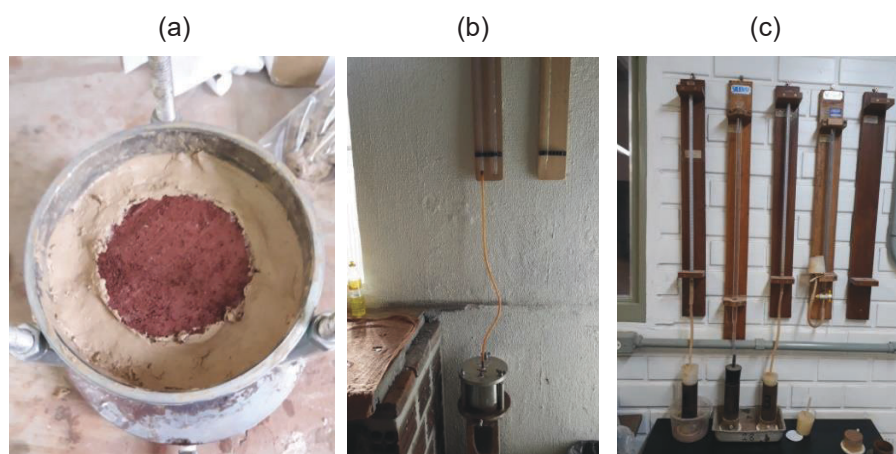
Quadro 20 – Número de ensaios de permeabilidade.

Mistura	Número de ensaios (NBR)	Número de ensaios (MCT)
Solo	3	1
85% Solo + 15% LETA	3	1
70% Solo + 30% LETA	3	1
50% Solo + 50% LETA	3	1
Total de ensaios	16	

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

A Figura 17 apresenta a (a) montagem da amostra no permeâmetro e (b) o ensaio em andamento, de acordo com os requisitos da norma brasileira. Já, a Figura 19c mostra o ensaio de permeabilidade pela metodologia MCT em andamento.

Figura 17 – (a) Montagem da amostra no permeâmetro; (b) ensaio pela NBR 14545 em andamento; (c) ensaio pela metodologia MCT em andamento.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

O ensaio seguindo a norma brasileira foi executado no Laboratório de Solos e Pavimentação, na Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, campus de Frederico Westphalen, enquanto o ensaio seguindo a metodologia MCT foi executado no LMCC da UFSM.

3.3.9. Determinação da curva característica (sucção)

Como na maioria das obras de engenharia que sofrem processo de compactação encontram-se acima do nível d'água e, também, nessas situações a umidade ótima é menor que a umidade do solo saturado, as mesmas apresentam comportamento de solos não saturados. Os solos não saturados, principalmente em regiões de clima tropical e subtropical, apresentam um comportamento singular e não seguem os critérios adotados pela Mecânica dos Solos Clássica. O parâmetro determinante para se entender o comportamento deste tipo de solo é a sucção. A sucção é a energia necessária para se remover certa quantidade de água do solo. Em outras palavras, sucção pode ser definida como uma grandeza energética que avalia a capacidade do solo de reter água.

A relação entre a variação do teor de umidade e a sucção de um solo é obtida através da curva de retenção de água, também chamada de curva característica do material. Por meio desta, é possível correlacionar a sucção com outros parâmetros. Fredlund (1996) afirma que com este ensaio é possível obter correlações com a resistência ao cisalhamento, permeabilidade e módulo de resiliência dos materiais.

A determinação da curva característica do solo e das misturas solo+LETA foram realizadas pelo Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM.

Antes de serem submetidas ao referido laboratório, foram moldadas duas amostras, conforme solicitado, de cada mistura a partir de um corpo de prova de dimensões 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura), moldados nos parâmetros de compactação de cada mistura. Os anéis de moldagem têm aproximadamente 4,5 cm de diâmetro e 2 cm de altura.

Após as amostras serem moldadas, as mesmas foram deixadas em imersão em água pelo período de 24 horas. Posteriormente, as amostras foram colocadas em um dessecador com uma bomba de vácuo, conforme solicitado pelo laboratório. A

Figura 18 mostra a (a) moldagem das amostras e (b) as amostras em imersão. A Figura 19 apresenta as amostras no dessecador.

Figura 18 – (a) Moldagem das amostras; (b) as amostras em imersão.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Figura 19 – Amostras no dessecador.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Para a obtenção da curva nas tensões de 1, 6 e 10 kPa as amostras foram saturadas por capilaridade em uma coluna de areia, para 100 kPa foi utilizado o aparelho extrator de Richards e para tensão de 1500 kPa foi utilizado um psicrômetro de termopar, modelo WP4-T (DECAGON DEVICES, 2000). Este equipamento permite medir a sucção total de forma rápida e confiável para sucções entre 100 e 10^6 kPa, sendo que para tensões entre 0 e 100 kPa as leituras são com baixa precisão, por

esse motivo o ensaio foi executado em 3 métodos, a fim de obter maior precisão nos valores.

Assim, os valores de umidade foram obtidos em base de massa, ou seja, umidade gravimétrica, sendo posteriormente transformados em umidade volumétrica. Por meio do programa SWRC (DOURADO NETO et al., 2001) foram obtidos os parâmetros empíricos α , n e m , que foram usados para os ajustes das curvas de retenção de água, realizado segundo modelo proposto por Van Genuchten (1980), apresentado na Equação 5.

$$U_v = U_r + \frac{U_{sat} - U_r}{[1 + (\alpha * \psi)^n]^m}, \quad m = 1 - \left(\frac{1}{n}\right) \quad (5)$$

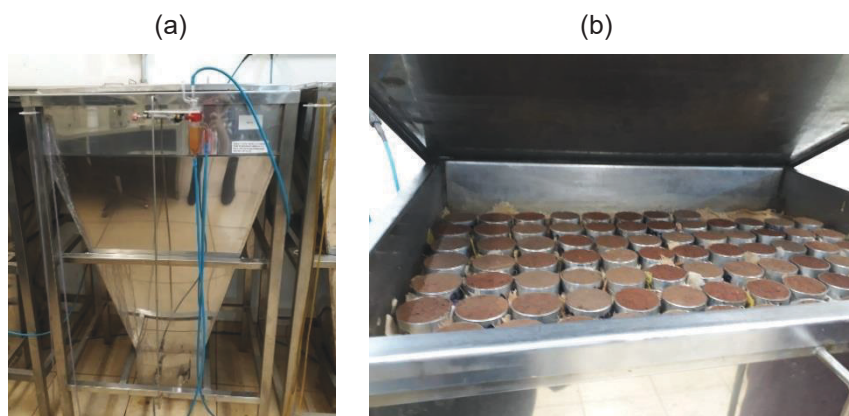
Onde:

- U_v : umidade volumétrica, em cm^3/cm^3 ;
- U_r : umidade residual, em cm^3/cm^3 ;
- U_{sat} : umidade de saturação, cm^3/cm^3 ;
- ψ : sucção mátrica ou potencial matricial, em kPa;
- α , m e n : parâmetros de ajuste da equação obtidos por regressão.

Ressalta-se que a qualidade dos resultados foi garantida pelo número de amostras ensaiadas (duas amostras de cada material), sendo que a determinação da curva se deu pela média dos resultados das amostras. Também, destaca-se que para aferição dos parâmetros de compactação, os corpos de provas foram medidos e pesados, além da obtenção da umidade.

Para representar parcialmente o procedimento de ensaio, a Figura 20 apresenta a (a) coluna de areia e (b) as amostras dentro da coluna da areia. A Figura 21 apresenta o aparelho extrator de Richards utilizados nos ensaios.

Figura 20 – (a) Coluna de areia; (b) amostras dentro da coluna de areia.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Figura 21 – Aparelho extrator de Richards.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

3.3.10. Ensaio de resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) do solo e das misturas solo+LETA seguiram aos preceitos da NBR 12770 (ABNT, 1992) – Solo coesivo: determinação da resistência à compressão não confinada.

A preparação dos corpos de prova foi efetuada em moldes cilíndricos de dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para cada mistura. Para aferição dos parâmetros de compactação, nos corpos de provas foram realizadas as medições e pesagem, além da obtenção da umidade. Também é importante destacar que para a

compactação dos corpos de prova, pelo fato das dimensões serem diferentes das dimensões do corpo de prova para o ensaio Proctor, o número de golpes foi corrigido, a fim de obter os parâmetros de compactação referentes ao ensaio Proctor na energia intermediária.

A moldagem foi realizada de forma dinâmica, por meio de compactação manual. Como não há processo e período de cura, os corpos de prova foram moldados, desmoldados e, em seguida, ensaiados. Ressalta-se que, para não haver possibilidade de desagregação dos CPs, os mesmos não foram imersos em água antes do rompimento.

Para cada corpo de prova, de cada uma das misturas, foram determinadas a altura inicial (após moldagem) e final (após ensaio), a fim de obter a deformação. Posteriormente, com a obtenção da força de ruptura da prensa e com a área da seção transversal corrigida pela deformação do corpo de prova, foi determinada a resistência à compressão simples de cada corpo de prova. Foram moldados 3 corpos de prova para cada mistura em estudo a fim de obter a média RCS. Dessa forma, tem-se no Quadro 21 o número de ensaios realizados nos ensaios de RCS.

A prensa utilizada para ruptura dos corpos de prova foi da marca PAVITEST, com calibração realizada no dia 25/08/2018 e com validade de 1 ano, sendo que o ensaio foi realizado no mês de junho de 2019.

Quadro 21 – Número de ensaios de RCS.

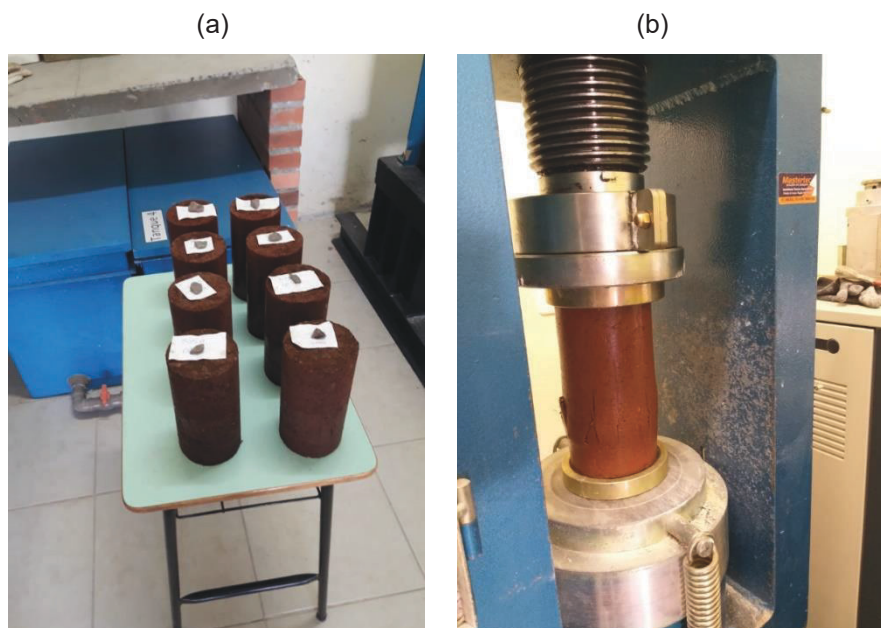
Mistura	Número de ensaios
Solo	3
85% Solo + 15% LETA	3
70% Solo + 30% LETA	3
50% Solo + 50% LETA	3
Total de ensaios	12

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

A velocidade de ruptura utilizada foi controlada de modo que a deformação axial específica ficasse constante, entre 0,5%/min e 2%/min, de acordo com o estabelecido na norma. O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da URI, campus de Frederico Westphalen. Na Figura

22 são apresentados (a) corpos de prova após moldagem e (b) o ensaio de RCS sendo realizado.

Figura 22 – (a) Corpos de prova após moldagem; (b) ensaio de RCS em andamento.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

3.3.11. Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia no critério de Mohr-Coulomb. O objetivo principal do ensaio é a obtenção da envoltória de resistência do solo e os parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Esses parâmetros definem a resistência ao cisalhamento, ou seja, quanto maior o ângulo de atrito e a coesão, maior a resistência ao cisalhamento.

Embora o ensaio seja simples, rápido e prático, ele apresenta algumas desvantagens, como a impossibilidade de se conhecer os esforços que atuam em planos diferentes daqueles de ruptura (com um único ensaio), além de não permitir a leitura de poropressões. Nesta pesquisa a execução do ensaio seguiu as diretrizes da norma americana ASTM: D3080 - 11.

Os CPs foram moldados de forma semi-estática utilizando anéis metálicos quadrados, com dimensões de 5 cm x 5 cm x 2 cm (comprimento x largura x altura).

O peso específico aparente seco, assim como o grau de compactação, e a umidade ótima foram controlados durante o procedimento de moldagem.

Os ensaios para o solo e para as misturas solo+LETA foram realizados em duas condições, umidade natural (CN) e inundados (CI). O Quadro 22 apresenta o número de ensaios que foram executados, com as respectivas tensões normais aplicadas.

Quadro 22 – Número de ensaios de cisalhamento direto e tensões normais.

Mistura	Tensão normal aplicada (kPa)	Números de ensaios na CN	Números de ensaios na CI
Solo	25	1	1
	50	1	1
	100	1	1
85% Solo + 15% LETA	25	1	1
	50	1	1
	100	1	1
70% Solo + 30% LETA	25	1	1
	50	1	1
	100	1	1
50% Solo + 50% LETA	25	1	1
	50	1	1
	100	1	1
Total de ensaios		24	

CN: condição natural; CI: condição inundada.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

O equipamento utilizado para execução dos ensaios foi uma prensa de cisalhamento direto produzida pela Ronald Top S/A, apresentada na Figura 23. A prensa é composta por uma caixa bipartida, onde a parte superior desloca com a imposição da tensão cisalhante, enquanto a parte inferior permanece imóvel. Durante a execução do ensaio o CP foi acomodado dentro da caixa bipartida e sobre o mesmo aplicava-se a tensão normal. Após a estabilização das deformações (variação de

altura) a tensão cisalhante era aplicada, impondo um deslocamento horizontal à amostra, até a ruptura do corpo de prova.

Figura 23 - Equipamento para realização do ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Para cada tensão normal aplicada obtém-se um valor de tensão cisalhante de ruptura, permitindo o traçado da envoltória de ruptura. As leituras foram realizadas manualmente com o auxílio de extensômetros. No caso da força horizontal, a mesma foi determinada através de um anel dinamométrico com capacidade de 50 kgf.

Após a realização das leituras e obtenção dos dados, foi possível, com o auxílio do Excel, a determinação dos gráficos de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal, variação volumétrica *versus* deformação horizontal e respectivas envoltórias de ruptura de cada mistura em estudo.

3.3.12. Ensaio de compressão triaxial

Primeiramente, antes da obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo+LETA, nesta etapa da pesquisa o objetivo foi montar o equipamento de compressão triaxial, bem como colocar o mesmo em funcionamento e fazer alguns testes iniciais. Este procedimento foi realizado e para fins práticos e didáticos foi escrito um manual, com o passo a passo da utilização do equipamento para realização dos ensaios. Este manual, para que possa ficar

disponível para futuras pesquisas e futuros pesquisadores, foi anexado a esta dissertação, em seu Apêndice A.

Posteriormente, após montagem e testes no equipamento, o objetivo principal almejado na execução dos ensaios triaxiais foi a obtenção dos parâmetros de resistência dos solos: coesão efetiva (c') e ângulo de atrito efetivo (Φ'). Optou-se pela realização de ensaios consolidados, drenados, na condição saturado, conhecido como ensaio CD. Neste ensaio, as tensões aplicadas na amostra são efetivas e há permanente drenagem do corpo de prova. Aplica-se a pressão confinante e espera-se que o corpo de prova adense, ou seja, que a poropressão se dissipe. A seguir, a tensão axial é aplicada lentamente para que a água sob pressão possa sair. Dessa forma, a poropressão durante todo carregamento é praticamente nula.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de forma semi-estática, com uso de uma prensa e sistema de duplo embolo, em que a amostra de solo é colocada dentro do molde e compactada por prensagem até atingir a altura desejada. A moldagem foi realizada em 3 camadas, de alturas iguais. A preparação dos corpos de prova foi efetuada em moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para cada mistura (solo e solo+LETA). Para aferição dos parâmetros de compactação, nos corpos de provas foram realizadas as medições e pesagem dos mesmos, além da obtenção da umidade. Como não há período de cura, os corpos de provas foram submetidos à câmara do triaxial logo após a compactação.

Na montagem do sistema, no topo e na base do corpo de prova, foram utilizados papéis filtro e pedras porosas comuns e ao longo da altura foi utilizada uma membrana impermeável específica para o ensaio. Cada corpo de prova passou pelo processo de saturação ascendente, controlada por meio de uma saída de água posicionada acima do corpo de prova. Após a saturação, cada corpo de prova passou pelo processo de adensamento/consolidação, por um período de aproximadamente 12 horas.

A Figura 24 mostra o equipamento de ensaio de compressão triaxial que foi utilizado para realização dos ensaios, da marca WILLE GEOTECHNIK, disponível no LMCC da UFSM. A velocidade de ruptura utilizada foi de 0,0313 mm/min, sendo essa velocidade considerada dentro dos valores recomendados para ensaios em solos finos.

Figura 24 - Equipamento de ensaio de compressão triaxial.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Após o processo de adensamento/consolidação, cada corpo de prova foi submetido a ruptura. As tensões confinantes aplicadas a cada CP foram de 25 kPa (CP1), 50 kPa (CP2), e 100 kPa (CP3). Essas, na envoltória de ruptura se referem a tensão confinante (σ_3'), que também pode ser dita como tensão principal menor. As tensões adotadas para o ensaio são justificadas em função das tensões aplicadas em camadas de aterro sanitário. Embora na camada de cobertura as tensões aplicadas sejam baixas (ou até podem ser consideradas nulas), na camada de base estas podem ser altas, a depender da carga imposta no aterro. No Quadro 23 é apresentado o número de ensaios de compressão triaxial com as respectivas tensões confinantes aplicadas.

Como não foi possível realizar o ensaio de forma automática, com sistema de aquisição de dados e com a utilização de software, o ensaio foi realizado de forma manual, com a utilização de um anel dinamométrico de capacidade de carga 50 kgf, com resolução de 0,01 mm. Dessa forma, após acomodação do anel no pistão e do pistão no *topcap*, anotaram-se as leituras no anel em 15s, 30 s, de 1 em 1 minuto até os 15 minutos iniciais de ensaio e, depois, de 15 em 15 minutos, até a ruptura do CP. Também, foram realizadas, nos mesmos intervalos de tempo, as leituras de

deformação do CP na prensa. No final do ensaio, foram realizadas as medições de altura e diâmetro do corpo de prova, para fins de aferição de sua deformação.

Quadro 23 – Número de ensaios de compressão triaxial e tensões confinantes.

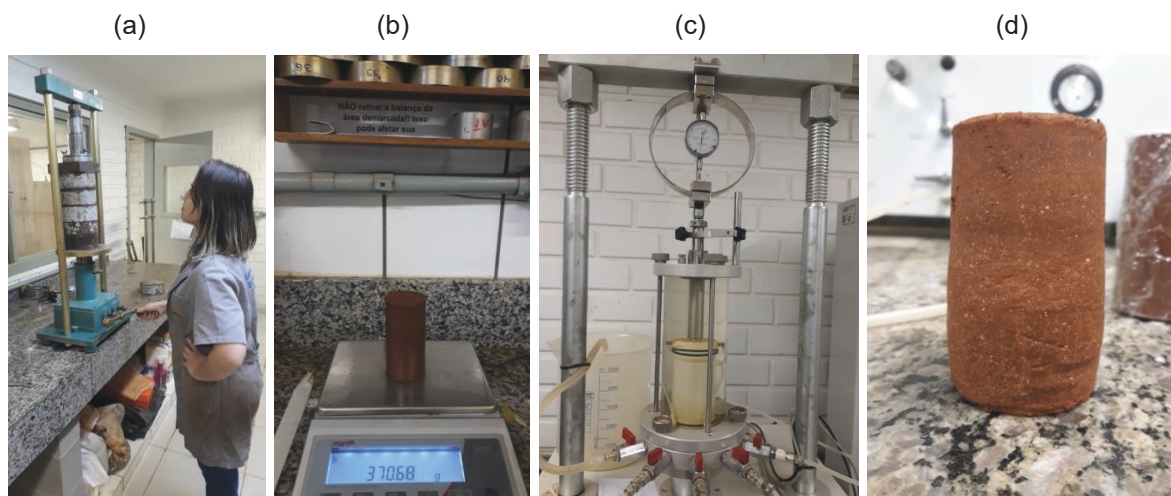
Mistura	Tensão confinante aplicada (kPa)	Números de ensaios
Solo	25	1
	50	1
	100	1
85% Solo + 15% LETA	25	1
	50	1
	100	1
70% Solo + 30% LETA	25	2
	50	2
	100	2
50% Solo + 50% LETA	25	2
	50	2
	100	2
Total de ensaios		18

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Ressalta-se que o ensaio foi finalizado quando identificada a ruptura do corpo de prova, seja por cisalhamento ou deformação. O rompimento por deformação do corpo de prova foi considerado quando fosse identificada a deformação de no mínimo 15% da altura inicial do corpo de prova. Esse valor limite foi definido em função de que a partir dessa deformação praticamente não há mais resistência pelo CP, pois já atingiu a tensão de pico, apresentando apenas a resistência da membrana. Ainda, esse fato pode ser justificado pelo solo não ser uma argila pura, logo, não há resistência residual a partir desse ponto.

A Figura 25 apresenta a (a) moldagem do corpo de prova, (b) o corpo de prova antes da ruptura, (c) o ensaio de compressão triaxial em andamento e (d) o corpo de prova após a ruptura.

Figura 25 – (a) Moldagem do CP; (b) CP antes da ruptura; (c) ensaio de compressão triaxial em andamento; (d) CP após ruptura.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

De posse das anotações no anel dinamométrico, foi possível calcular, ao longo do tempo, a carga aplicada ao corpo de prova, por meio da Equação 6, indicada no Certificado de Calibração – SOLOTEST - n° 44452-17.

$$y = 0,120 * x + 0,645274533 \quad (6)$$

Onde:

- y = força aplicada ao corpo de prova, em kgf;
- x = valor de leitura no anel dinamométrico.

Com o resultado da força aplicada ao corpo de prova, foi possível calcular a tensão aplicada ao longo do tempo, em função da área do CP. Essa tensão corresponde, no ensaio CD, a tensão desvio (σ_d). Além disso, foi calculada a tensão principal maior (σ_1'), sendo a mesma definida pela Equação 7.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_d \quad (7)$$

Onde:

- σ_1' = tensão principal maior;
- σ_3' = tensão principal menor (tensão confinante);

- σ_d = tensão desvio.

Foram elaboradas as curvas tensão desvio *versus* deformação para cada corpo de prova de cada mistura, a fim de fazer uma análise para obtenção das tensões de ruptura dos CPs.

A partir das tensões de ruptura em cada pressão de confinamento foram definidas as envoltórias de ruptura em diagramas q x p' de Lambe e Whitman (1969), onde também foram representadas as trajetórias de tensões. Os diagramas de τ x σ de Mohr-Coulomb também foram obtidos e apresentados, para fins comparativos.

Para determinação desse diagrama foram definidos os valores de q e p' , pelas Equações 8 e 9 respectivamente.

$$q = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (8)$$

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (9)$$

Na trajetória de tensões é possível definir uma reta que define a envoltória de resistência por meio do ângulo formado pela reta da envoltória e o eixo horizontal (p') e, também, pelo intercepto com o eixo vertical (q). Com isso, foi possível obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva.

3.3.13. Análise dos Resultados

Posterior à obtenção dos resultados de caracterização, ensaios hídricos e ensaios mecânicos, os dados obtidos nesta pesquisa foram comparados a outros estudos e normas, já citados na revisão bibliográfica.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais descritos na metodologia do Capítulo 3. Em um primeiro momento são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física, classificação MCT e análise química para o solo, para o LETA e para as misturas solo+LETA. O teor de matéria orgânica dos materiais em estudo é apresentado na sequência.

Posteriormente são apresentados os resultados de caracterização mecânica do solo e das misturas solo+LETA, incluindo os parâmetros de compactação para energia intermediária. A curva característica dos solos é apresentada na sequência, indicando a capacidade de retenção do solo e das misturas solo+LETA. Os resultados dos ensaios de permeabilidade dos materiais são apresentados para a verificação da possibilidade de aplicação em camadas de aterro sanitário.

Os parâmetros de coesão e ângulo de atrito do solo e das misturas solo+LETA, obtidos por meio dos ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial, são apresentados, além da realização da análise do teor de umidade e da sucção nas características de resistência ao cisalhamento das misturas estudadas. Os resultados de resistência à compressão simples também são expostos e analisados. Por fim, é apresentada uma análise da aplicação das misturas (solo e solo+LETA) para camadas de base e cobertura de aterros sanitários, além da verificação de aplicação em diferentes obras de engenharia.

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização foram realizados para o solo, para o LETA e para as misturas solo+LETA em estudo, de acordo com a metodologia. Esta etapa compreende os ensaios de peso específico real dos grãos, limites de Atterberg, análise granulométrica com e sem o uso do agente defloculante (hexametáfosfato de sódio) e análise granulométrica a laser. Ressalta-se que o LETA não passou pelo processo de análise granulométrica clássica, visto que a elevada concentração de alumínio presente no material fez com que o defloculante no processo de sedimentação não reagisse com o mesmo, impossibilitando a determinação das frações granulométricas reais.

A Tabela 1 apresenta o resumo de todos ensaios de caracterização e a classificação para o solo em estudo.

Tabela 1 – Resumo dos ensaios de caracterização e classificação do solo.

Parâmetro	AM01	AM02	AM03	Média
% pedregulho (> 2,0 mm)	6/5*	6/5*	6/6*	6/5*
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)	0/1*	0/1*	0/0*	0/1*
% areia média (0,2 - 0,6 mm)	1/1*	1/1*	1/1*	1/1*
% areia fina (0,06 - 0,2 mm)	14/7*	13/7*	13/9*	13/8*
% silte (2 µm - 0,06 mm)	23/75*	23/73*	22/71*	23/73*
% argila (< 2 µm)	56/11*	57/13*	58/13*	57/12*
PP#200 (%)	80/91*	82/91*	81/91*	81/91*
GF (%)	80,36	77,19	77,59	78,38
γ _s (kN/m ³)	26,99	27,08	27,00	27,02
LL (%)	65	66	67	66
LP (%)	55	54	56	55
IP (%)	10	12	11	11
Classificação SUCS	CH/MH*	CH/MH*	CH/MH*	CH/MH*
Classificação TRB	A-5/A-5*	A-7-5/A-7-5*	A-7-5/A-7-5*	A-7-5/A-7-5*

*Análise granulométrica sem uso de defloculante; µm: micrometro; PP#200: porcentagem passante na peneira 200 (0,075 mm); GF: grau de flocculação.

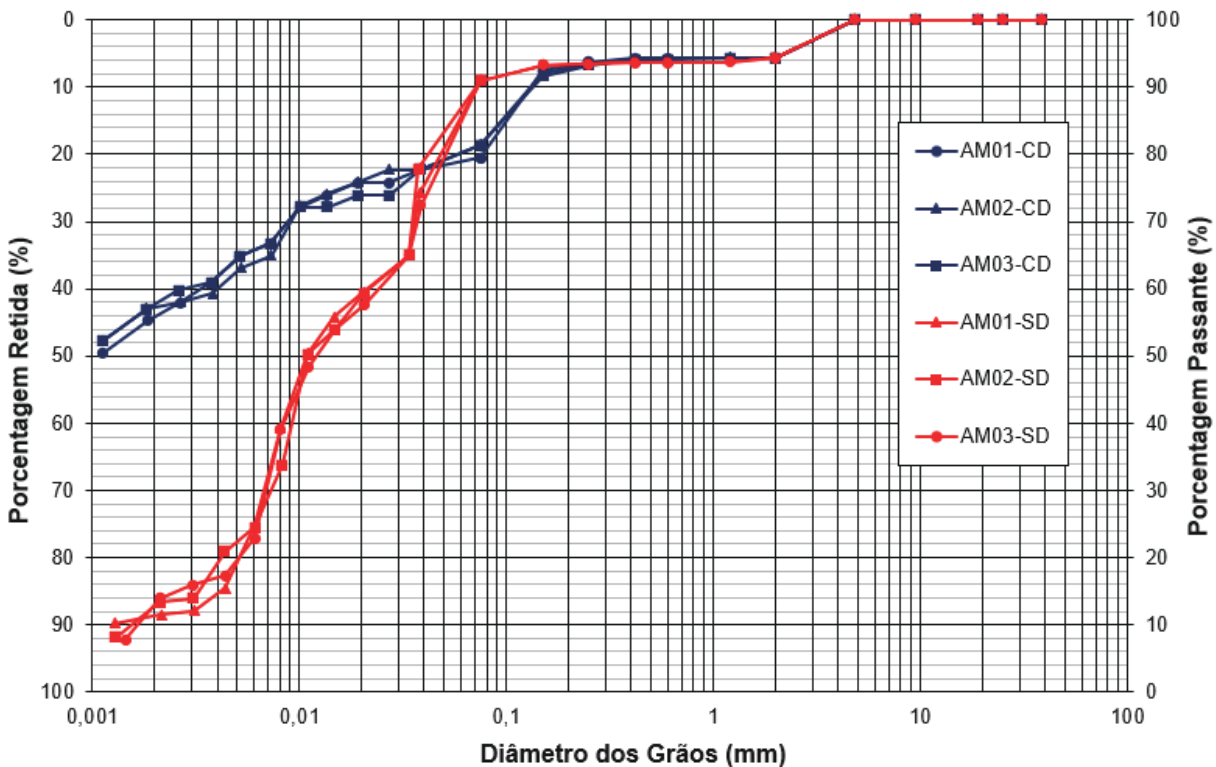
Inicialmente, ao analisar a Tabela 1, percebe-se a pequena variabilidade apresentada no peso específico real dos grãos, com valores entre 26,99 kN/m³ e 27,08 kN/m³, consistentes com a mineralogia do material. A presença de caulinita e quartzo foi identificada nos ensaios de análise química e de fluorescência de raio X (os mesmos serão apresentados posteriormente), sendo que o quartzo em geral apresenta peso específico real dos grãos variando em torno de 26,50 kN/m³ a 26,70 kN/m³ e a caulinita 26,10 kN/m³ a 26,60 kN/m³. Portanto, a presença desses argilominerais no solo em estudo corroboram com os resultados encontrados no parâmetro.

Ainda, para o peso específico real dos grãos é importante comparar os resultados encontrados para o solo em estudo nesta pesquisa com os resultados de outras amostras do mesmo solo, mas coletadas a 3,0 m de profundidade. Os resultados encontrados, de acordo com certificado de ensaio n° 111099 (UFSM, 2017a), realizado pelo LMCC da UFSM foram em média, para 3 amostras coletadas, 29,62 kN/m³. Esse valor mais elevado, se comparado ao solo analisado neste estudo, pode ser pela profundidade de coleta do solo, que possivelmente tem características diferentes.

Com relação ao ensaio de granulometria é possível observar nas curvas, apresentadas na Figura 26, que as amostras 01, 02 e 03 ensaiadas com o uso de defloculante apresentaram distribuição granulométrica bastante semelhante, com cerca de 80% de sua granulometria composta de materiais finos (argila e silte), com predominância da fração de argila. Já, para amostras ensaiadas sem defloculante, com curvas bastante semelhantes, a predominância ainda foi de finos (argila e silte), com cerca de 85% da amostra. Neste caso, sem o uso de defloculante, predominou a fração silte.

No entanto, fica evidente, pela Tabela 1 e Figura 26, ao comparar as amostras com e sem defloculante, que o material no seu estado natural apresenta estrutura floculada, visto que o ensaio sem defloculante apresentou granulometria predominante de silte (cerca de 73%), enquanto no ensaio com defloculante a predominância foi de argila (aproximadamente 57%).

Figura 26 – Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – Solo.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

A estrutura floculada apresentada pelo solo pode ser justificada pelo seu grau de floculação. O grau de floculação (GF) se refere a fração da argila que se encontra floculada e pode ser determinado pela relação entre a argila obtida com dispersante (defloculante) e a argila dispersa em água (sem defloculante). O GF pode ser determinado, de acordo com a EMBRAPA (2017), pela Equação 10.

$$GF = \left(\frac{ARG_d - ARG_a}{ARG_d} \right) * 100 \quad (10)$$

Onde:

- ARG_d – Argila obtida com dispersante;
- ARG_a – Argila obtida com água.

Dessa forma, ao analisar o GF do solo (Tabela 1), para as três amostras analisadas, tem o grau de floculação variando entre 77,19% e 80,36%, com valor médio de 78,38%. Esses valores indicam que o solo tem elevado grau de floculação

e possui alta estabilidade dos agregados, de acordo com EMBRAPA (2017). Esses valores são característicos de solos lateríticos.

Para as amostras coletadas na profundidade de 3,0 m o solo apresentou, em média, no ensaio com defloculante, a presença de 1% de areia grossa, 1% de areia média, 5% de areia fina, 15% de silte e 78% de argila. Esses resultados vão parcialmente ao encontro com os resultados encontrados neste trabalho, destacando-se a presença de pequena quantidade de areias e alta concentração de silte e argila. Mas, é importante ressaltar também que nesta pesquisa a coleta foi próxima a superfície, o que diferencia as frações do solo, se comparado ao solo coletado na profundidade de 3,0 m.

Com relação as características de plasticidade, apresentadas na Tabela 1, o solo apresenta em torno de 57% de fração de argila em sua composição, com índice de plasticidade variando entre 10% e 12% (IP médio igual a 11%), o que caracteriza o material como medianamente plástico. Ainda, o LL médio do solo foi igual a 66%, enquanto o LP foi igual a 55%. Os valores de LL, LP e IP médios, para o solo coletado na profundidade de 3,0 m, foram 63%, 46% e 17%, respectivamente. No caso citado, a maior plasticidade (LP e IP) pode ser creditada a maior presença de argila, se comparado as amostras aqui estudadas.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS todas as amostras (ensaiadas no ensaio de granulometria com a presença de defloculante) foram classificadas como argilas de plasticidade média a alta (CH). O sistema classificatório da *Transportation Research Board* (TRB) enquadra as amostras 2 e 3 como A-7-5, típico de materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume. A amostra 1 está inserida no grupo A-5 e caracteriza-se como um solo típico argiloso e plástico, comumente sujeito à elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos do solo, do LETA e das misturas solo+LETA. A Figura 27 mostra a variação do peso específico real dos grãos com o acréscimo de LETA.

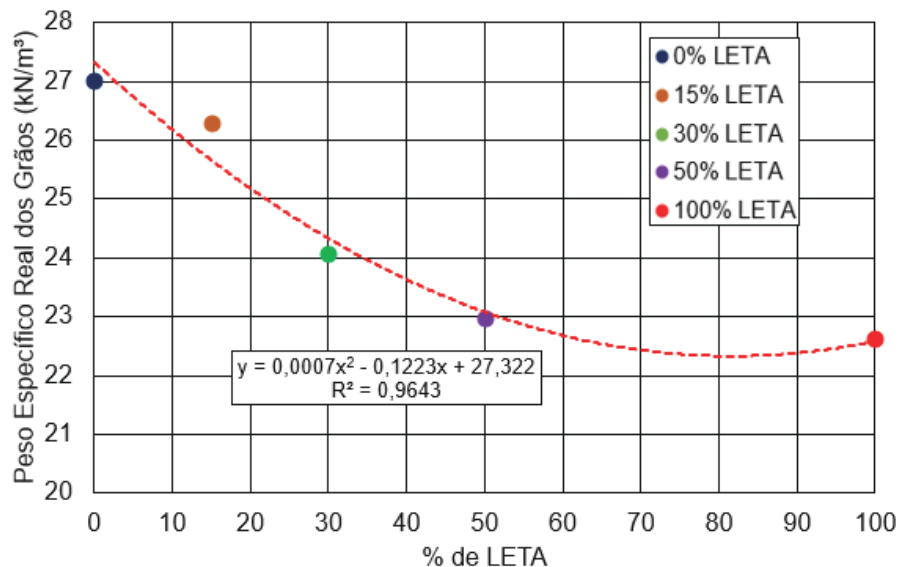
Tabela 2 – Resultados do ensaio de peso específico real dos grãos para o solo, LETA e mistura solo+LETA.

Mistura	Parâmetro	AM01	AM02	AM03	Média
Solo	w (%)	20,87	20,87	20,87	-
	γ_s (kN/m ³)	26,99	27,08	27,00	27,02
LETA	w (%)	27,23	27,23	27,23	-
	γ_s (kN/m ³)	22,63	22,60	22,63	22,62
85% Solo + 15% LETA	w (%)	22,05	22,05	22,05	-
	γ_s (kN/m ³)	26,25	26,31	26,27	26,28
70% Solo + 30% LETA	w (%)	14,34	14,34	14,34	-
	γ_s (kN/m ³)	24,16	24,01	24,08	24,08
50% Solo + 50% LETA	w (%)	17,33	17,33	17,33	-
	γ_s (kN/m ³)	22,90	22,95	23,07	22,97

w: umidade da amostra para o ensaio; γ_s : peso específico real dos grãos.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Figura 27 – Peso específico real dos grãos *versus* porcentagem de LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Ao analisar os resultados obtidos para o peso específico real dos grãos – Tabela 2 e Figura 27 – nota-se uma redução no parâmetro com o aumento da porcentagem de substituição de solo por LETA, passando de 27,02 kN/m³ do solo para 22,97 kN/m³ para a mistura 50% Solo + 50% LETA. Portanto, tem-se uma tendência

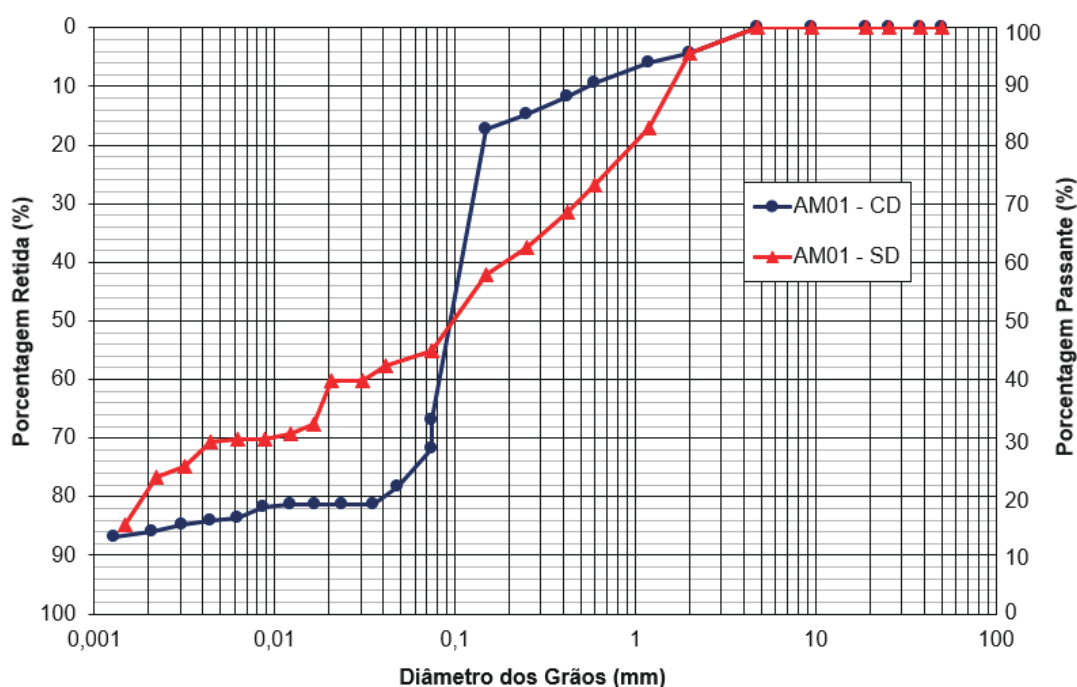
clara da variação do parâmetro com a porcentagem de LETA. Isso se justifica pela baixa peso específico real dos grãos do LETA ($22,62 \text{ kN/m}^3$), se comparado ao solo.

No estudo de Castilhos Júnior, Prim e Pimentel (2011) os autores verificaram a redução do peso específico real dos grãos de misturas de solo+LETE+LETA+cal, se comparado ao solo natural. Os autores creditaram o fato ao baixo peso específico real dos grãos do LETE e do LETA.

O LETA apresentou valores semelhantes aos apresentados na revisão de literatura, como por exemplo, os resultados obtidos por Vandermeijden e Cornwell (1998). Os autores encontraram peso específico real dos grãos para vários LETAs, sendo que a maior parte dos materiais analisados apresentaram resultados entre $20,50 \text{ kN/m}^3$ e $22,60 \text{ kN/m}^3$, próximos aos encontrados nesta pesquisa.

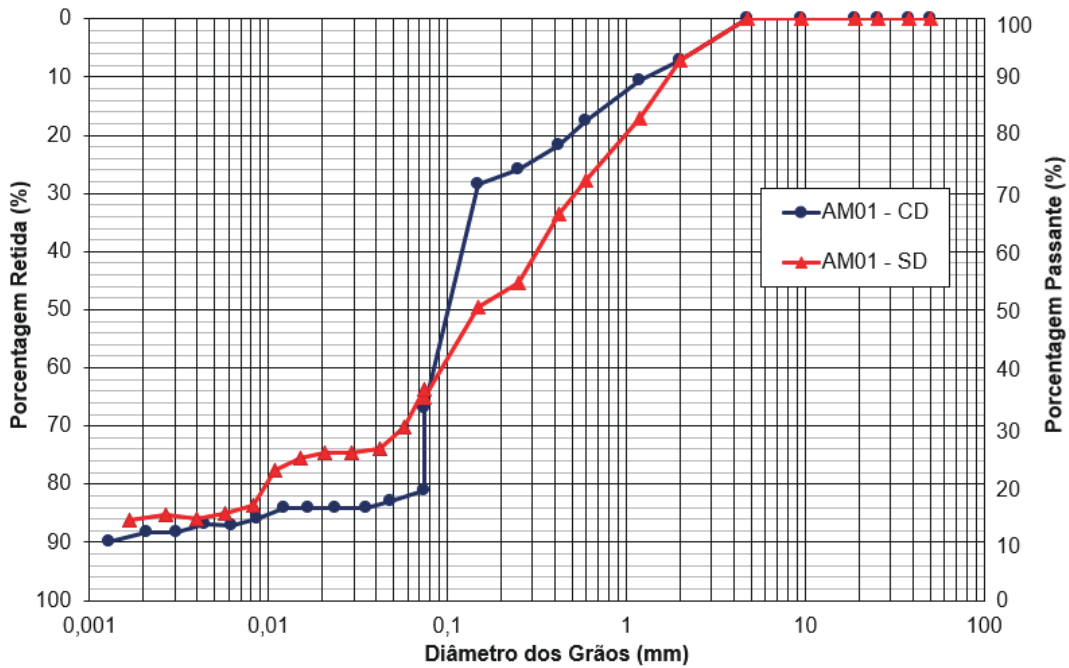
A fim de verificar a influência da substituição de solo por LETA, nas Figuras 28, 29 e 30 são apresentadas as curvas granulométricas para os ensaios com e sem defloculante para as misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA, respectivamente. Também, na Tabela 3 é apresentado o resumo dos ensaios de caracterização realizados para solo e para as misturas solo+LETA.

Figura 28 – Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – 85% Solo + 15% LETA.



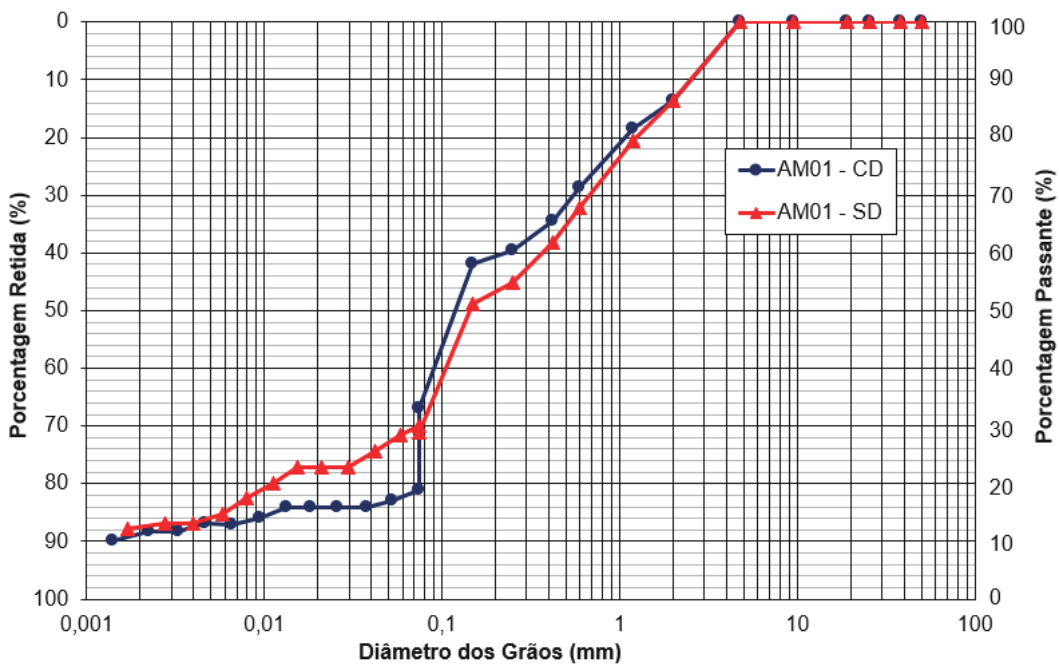
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Figura 29 – Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – 70% Solo + 30% LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Figura 30 – Curvas granulométricas com (CD) e sem (SD) defloculante – 50% Solo + 50% LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Tabela 3 – Resumo dos ensaios de caracterização e classificação do solo e das misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA.

Mistura	Solo (média)	85% Solo + 15% LETA**	70% Solo + 30% LETA**	50% Solo + 50% LETA**
% pedregulho (> 2,0 mm)	6/5*	4/4*	7/7*	14/12*
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)	0/1*	5/23*	10/21*	15/20*
% areia média (0,2 - 0,6 mm)	1/1*	7/13*	10/19*	12/15*
% areia fina (0,06 - 0,2 mm)	13/8*	59/16*	55/23*	41/24*
% silte (2 µm - 0,06 mm)	23/73*	11/23*	6/16*	7/17*
% argila (< 2 µm)	57/12*	14/21*	12/14*	11/12*
PP#200 (%)	81/91*	33/45*	33/36*	33/30*
GF (%)	78,38	33,33	14,29	8,33
γ _s (kN/m ³)	27,02	26,28	24,08	22,97
LL (%)	66	75	70	75
LP (%)	55	43	54	65
IP (%)	11	32	17	10
Classificação SUCS	CH/MH*	SM/SM*	SM/SM*	SM/SM*
Classificação TRB	A-7-5/A-7-5*	A-2-7/A-7-5*	A-2-7/A-7-5*	A-2-5/A-2-5*

*Análise granulométrica sem uso de defloculante; **A análise granulométrica foi realizada com apenas uma amostra com defloculante e uma sem defloculante; µm: micrometro; PP#200: porcentagem passante na peneira 200 (0,075 mm); GF: grau de floculação.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Ressalta-se que para as misturas de solo+LETA o ensaio de granulometria (peneiramento + sedimentação) foi realizado com apenas uma amostra com e uma sem defloculante. Essa situação foi adotada em função de que as curvas granulométricas obtidas para o solo, com a realização de três amostras com e três

sem defloculante, apresentaram comportamento e resultado semelhantes, em função da homogeneidade do material.

Pela Tabela 3 – e Figuras 28, 29 e 30 – fica evidente a alteração das características de granulometria das misturas de solo+LETA se comparadas ao solo natural. O solo natural apresentou em média, no ensaio com defloculante, 57% de argila e 23% de silte. Já, no ensaio sem presença de defloculante, a predominância foi de 12% de argila e 73% de silte. Todas as misturas de solo+LETA apresentaram predominância de areias (fina, média e grossa), nos dois tipos de ensaios realizados (com e sem defloculante).

É possível observar – pela Tabela 3 e Figuras 28, 29 e 30 – que conforme aumentou-se a porcentagem de substituição de solo por LETA houve a tendência de acréscimo de material grosseiro e redução nas porcentagens de argila e silte. Isso era esperado em função do comportamento distinto do LETA. As porcentagens dos diferentes tipos de areias nas misturas apresentaram variação com o incremento de LETA. O material com maior fração arenosa foi a mistura 70% Solo + 30% LETA, com 75% de areias (fina, média e grossa) no ensaio com defloculante e 63% no ensaio sem a presença de defloculante. A mistura 85% Solo + 15% LETA apresentou 71% de areias no ensaio com e 52% no ensaio sem defloculante. Já, a mistura 50% Solo + 50% LETA apresentou 68% e 59% de areias nos ensaios com e sem defloculante, respectivamente.

Esse comportamento das misturas solo+LETA pode ser creditado pela ineficiência do defloculante utilizado, que não foi eficaz para quebrar os flocos contidos nas misturas solo+LETA. Isso, possivelmente acontece em função do LETA conter coagulante com alta concentração de alumínio, logo, o defloculante na proporção designada por norma não é suficiente para deflocular o lodo.

Essa situação pode também ser comprovada com os resultados de grau de floculação (Tabela 3), determinadas de acordo com a Equação 10, onde é possível observar que todas as misturas solo+LETA apresentaram valores de GF inferiores ao solo (GF médio do solo igual a 78,38%). A mistura 85% Solo + 15% LETA apresentou GF igual 33,33%, enquanto as misturas 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA apresentaram valores de grau de floculação igual a 14,29% e 8,33%, respectivamente. Percebe-se, também, que conforme aumenta a porcentagem de LETA em substituição ao solo, há uma redução no grau de floculação, creditado a redução de argila presente conforme se aumenta a inclusão de LETA. As misturas

solo+LETA apresentam baixo valor de GF e baixa estabilidade dos agregados do solo, de acordo com EMBRAPA (2017).

Com relação a classificação no sistema SUCS todas as misturas de solo+LETA apresentaram o mesmo resultado, nos ensaios com e sem defloculante. Pela Tabela 3 é possível observar que as misturas de solo+LETA foram classificadas como SM, caracterizando os materiais como arenosos-siltosos.

No sistema rodoviário de classificação de solos – resultados apresentados na Tabela 3 - as misturas 85% Solo + 15% LETA e 70% Solo + 30% LETA apresentaram comportamento semelhante, com mesma classificação nos ensaios com defloculante (A-2-7) e sem defloculante (A-7-5). Portanto, esses materiais quando ensaiados no ensaio de sedimentação com defloculante foram classificados como arenosos ou arenosos-siltosos. Já, nos ensaios sem defloculante, os materiais foram classificados como típico de materiais finos com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez. A mistura 50% Solo + 50% LETA apresentou a mesma classificação nos ensaios com e sem defloculante (A-2-5), característico de materiais granulares, solos arenosos ou arenosos-siltosos.

É importante destacar que não houve uma tendência linear na variação das porcentagens de areias (fina, média e grossa) nas misturas solo+LETA, o que pode ser creditado a heterogeneidade do material. Mas, um fato de extrema importância a se destacar é da realização dos ensaios com e sem hexametáfosfato de sódio no processo de sedimentação. Como era de se esperar, a alta concentração de alumínio presente no LETA fez com que o material não reagisse com o defloculante, isso fica claro ao analisar a proximidade dos resultados com e sem a presença do produto. Isso também é comprovado ao analisar os resultados de granulometria, para as misturas solo+LETA, nas frações de siltes e argilas. A presença da água (ensaio sem defloculante) propiciou maiores porcentagens de material fino se comparado ao ensaio com defloculante, o que demonstra que o mesmo não reagiu com as misturas, deixando as mesmas floculadas.

Os resultados de granulometria das misturas solo+LETA não foram comparados com os estudos destacados na revisão de literatura, visto que, conforme já citado, os LETAs apresentam grande variação nas características, a depender do local e do sistema de potabilização da água utilizado nas ETAs.

Embora não tenha sido possível realizar o ensaio de análise granulométrica para o LETA, buscou-se determinar os limites de Atterberg para o mesmo. Desse

modo, para fins de comparação, na Tabela 4 são apresentados os resultados para o solo, LETA e misturas solo+LETA.

Tabela 4 – Resumo dos ensaios de limites de Atterberg do solo, LETA e misturas solo+LETA.

Mistura	Parâmetro	AM01	AM02	AM03	Média
Solo	LL (%)	65	66	67	66
	LP (%)	55	54	56	55
	IP (%)	10	12	11	11
LETA	LL (%)	164/62*	166/63*	162/62*	164/62*
	LP (%)	143/59*	145/59*	142/59*	143/59*
	IP (%)	21/3*	21/4*	20/3*	21/3*
85% Solo + 15% LETA	LL (%)	76	74	76	75
	LP (%)	44	43	43	43
	IP (%)	32	31	33	32
70% Solo + 30% LETA	LL (%)	70	70	71	70
	LP (%)	53	54	54	54
	IP (%)	17	16	17	17
50% Solo + 50% LETA	LL (%)	75	75	76	75
	LP (%)	64	66	65	65
	IP (%)	11	9	11	10

LL: Limite de Liquidez; LP: Limite de Plasticidade; IP: Índice de Plasticidade; *Limites de Atterberg em relação ao peso úmido do material.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Percebe-se pela Tabela 4, para os limites de Atterberg, que a utilização do LETA alterou a plasticidade do solo, sendo que as misturas com menor inclusão do LETA (15% e 30%) tenderam a aumentar a plasticidade e a mistura com maior porcentagem de LETA (50%) proporcionou a redução no IP. Ao substituir 15% do solo por LETA, o IP aumentou, passando de 11% do solo (plasticidade média) para 32% na mistura 85% solo + 15% LETA (plasticidade alta). A substituição de 30% de solo por LETA proporcionou um aumento da plasticidade em relação ao solo e uma redução em relação a mistura 85% Solo + 15% LETA, sendo encontrado um IP de 17% (plasticidade média). Já a substituição de 50% de solo por LETA proporcionou a

redução no valor do IP, se comparado ao solo e as demais misturas, com valor de IP igual a 10%.

Nas substituições de 15% e 30% de solo por LETA, possivelmente, a plasticidade foi aumentada pelo rearranjo dos vazios no solo com a inclusão do material, situação notada na análise granulométrica. Por outro lado, na substituição de 50% de solo por LETA, a quantidade de material de característica arenosa proporcionou uma redução na plasticidade da mistura.

Ainda, pela Tabela 4, observam-se altos valores de LL e LP para o LETA, proporcionando um valor de IP médio de 21%, característica de um material de plasticidade alta. Os altos valores de LL e LP (164% e 143%, respectivamente) são característicos desse material, conforme resultados encontrados por Watanabe et al. (2011). Em seu estudo, os autores verificaram ao longo de dois anos e meio a variação do LL de 83% até 511%, do LP de 60% até 185%, para um mesmo lodo.

No entanto, não será feita aqui uma comparação direta com nenhum dado apresentado na literatura, pois fica claro que a característica de cada LETA é única, podendo apresentar uma grande variação nos parâmetros, até mesmo ao analisar o mesmo material ao longo do tempo. Mas, é importante destacar que os valores elevados de LL e LP podem ter relação direta com a umidade natural do material, que é em torno de 110%, em função do alto poder de absorção de água do LETA, e também pela característica distinta do material.

Considera-se, ainda, em relação aos Limites de Atterberg do LETA, que os mesmos foram também determinados em função do peso úmido do material, apresentando valores mais condizentes com as características visuais e táteis do mesmo. Ao determinar o LL e LP do LETA com relação ao peso úmido obteve-se valores médios de 62% e 59%, respectivamente. O IP do material foi igual a 3%, caracterizando o material como ligeiramente plástico ($1 < IP < 5$), característica de material arenoso.

Essa determinação dos Limites de Atterberg em função do peso úmido do material tem sido aplicada para este tipo de resíduo em função da alta umidade natural do material e, também, pelo fato de materiais com grande quantidade de matéria orgânica, quando submetidos a temperatura de 100°C, terem tendência de degradar, não apresentando os reais valores dos limites.

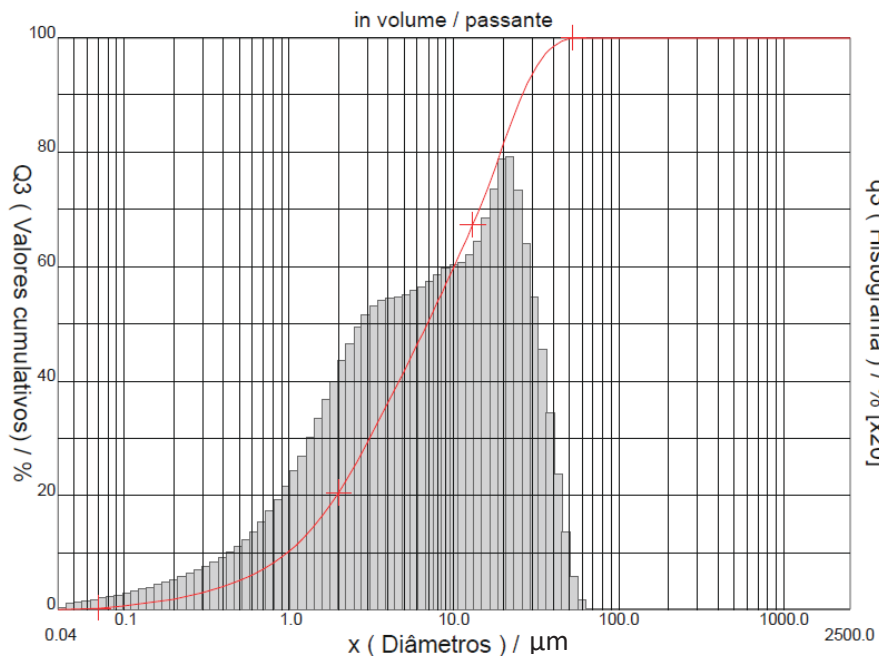
Portanto, se considerar os limites em função do peso seco do material não se tem os reais limites de passagem de estados líquido para semissólido e semissólido

para sólido, pois não apresenta o acréscimo de água para atingir os limites e sim a água total para se obter os mesmos. Logo, a consideração dos limites em relação ao peso úmido tem sido utilizada pois representa apenas o acréscimo de água, a partir da umidade natural do material, para se atingir os limites.

Nesta mesma ideia, não será feita uma comparação direta entre os valores de granulometria e limites de Atterberg encontradas para as misturas de solo+LETA, visto a característica única do LETA, bem como as características únicas das misturas do solo e do LETA em estudo.

Na intenção de complementar os resultados de caracterização física do solo, do LETA e das misturas solo+LETA foi realizado o ensaio de granulometria a laser. Os resultados deste ensaio são apresentados nas Figuras 31, 32, 33, 34 e 35 para o solo, LETA, 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA. Na Tabela 5 é apresentado um resumo dos resultados obtidos para o ensaio de granulometria a laser para todos materiais em estudo.

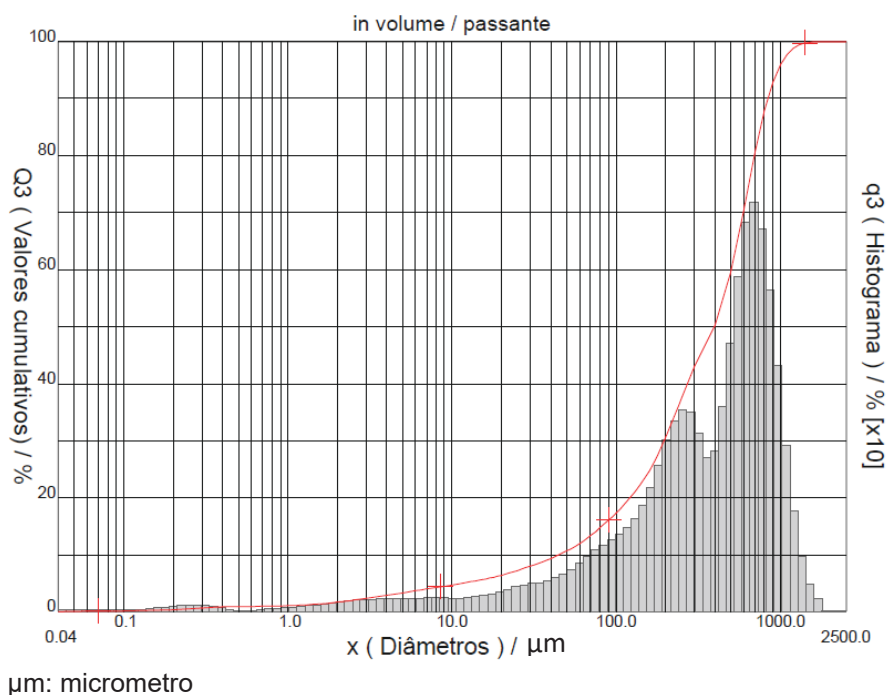
Figura 31 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – Solo.



µm: micrometro.

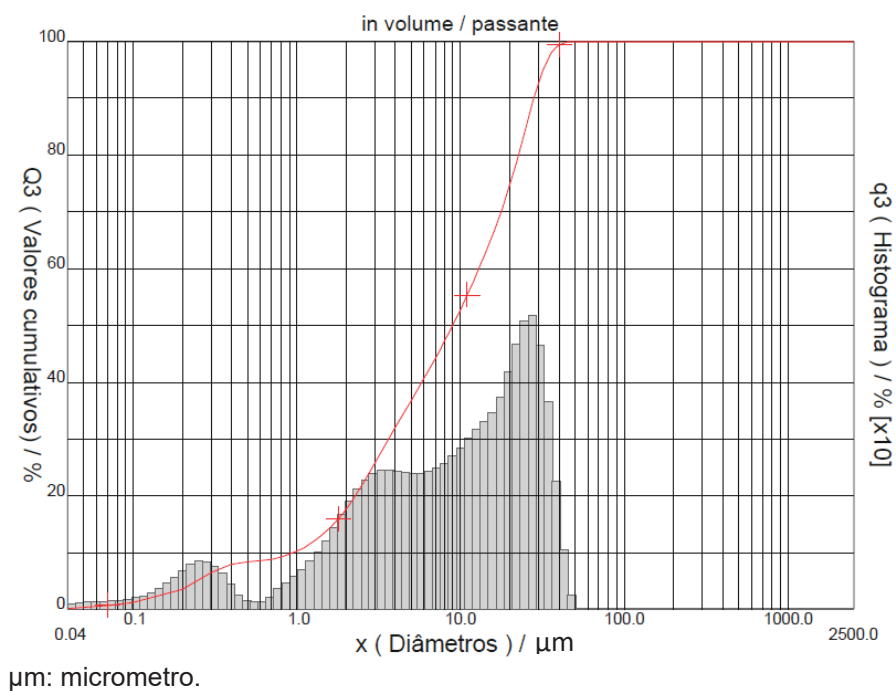
Fonte: Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS – Laudo nº 01 (2019).

Figura 32 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – LETA.



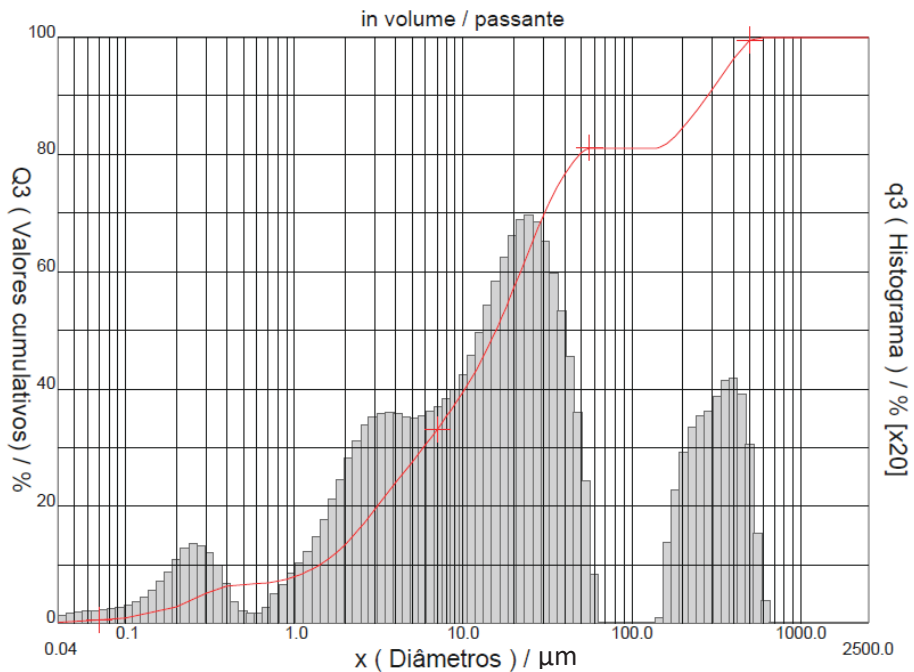
Fonte: Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS – Laudo n° 01 (2019).

Figura 33 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – 85% Solo + 15% LETA.



Fonte: Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS – Laudo n° 01 (2019).

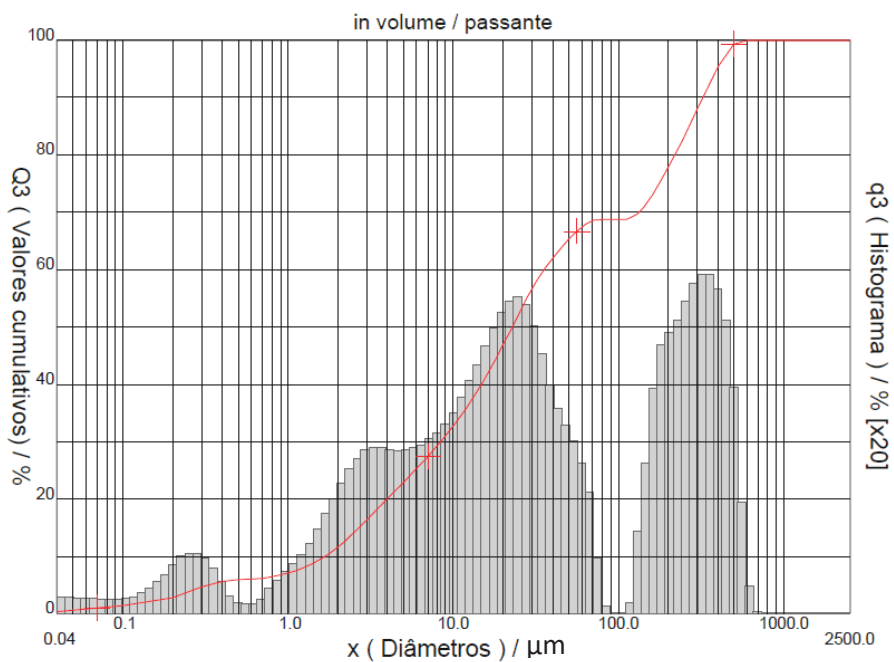
Figura 34 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – 70% Solo + 30% LETA.



μm : micrometro.

Fonte: Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS – Laudo nº 01 (2019).

Figura 35 – Distribuição dos tamanhos das partículas pelo ensaio de granulometria a laser – 50% Solo + 50% LETA.



μm : micrometro

Fonte: Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS – Laudo nº 01 (2019).

Tabela 5 – Resumo do ensaio de granulometria a laser para o solo, LETA e misturas solo+LETA.

Mistura	Frações (%)		
	Argila (< 2 μ m)	Silte (2 \leq x 60 μ m)	Areia (60 \leq x 2000 μ m)
Solo	20,45	79,55	0,00
LETA	1,72	10,33	87,95
85% Solo + 15% LETA	17,66	82,34	0,00
70% Solo + 30% LETA	13,43	67,61	18,96
50% Solo + 50% LETA	11,60	58,52	29,88

μ m - micrometro.

Fonte: Adaptado de Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS – Laudo n° 01 (2019).

Ressalta-se que para este ensaio as amostras foram passadas na peneira n° 20 (abertura 0,84 mm), a fim de evitar um espalhamento muito alto no espectro de difração durante o processo de ensaio, que poderia ocasionar erros de leitura. Ainda, para obtenção das frações de argila, silte e areia, as leituras foram realizadas diretamente pela linha da distribuição das partículas (em vermelho) e no eixo y da esquerda (Q3 – valores cumulativos).

Pela Tabela 5 é notável que o solo é predominantemente composto por materiais finos (argila e silte) e o LETA tem areia como fração preponderante. Fica evidente também que ao substituir solo por LETA há tendência de mudança da granulometria do material. Conforme aumenta a porcentagem de LETA na mistura há redução na porcentagem de material fino (silte e argila) e um acréscimo de material granular. Essa situação era esperada, visto o comportamento do LETA. A baixa porcentagem de argila no LETA (1,72%) pode ser creditada ao efeito da floculação proporcionado pelo alumínio contido no coagulante utilizado na ETA. Mas, destaca-se aqui que Scapin (2020 – não publicado), para fins de teste, destorroou o LETA constantemente, sem quebrar partículas, e verificou que o material totalmente destorroado é 100% passante na peneira n° 200 (abertura de 0,075 mm), ou seja, nessa situação pode-se considerar que o LETA tem características de argila e silte.

Ao fazer um comparativo entre os resultados da granulometria a laser e da granulometria (peneiramento e sedimentação) clássica, é importante destacar que os ensaios são realizados em condições diferentes e com amostras diferentes, podendo apresentar variação nos resultados. Mas, é notável que as frações de partículas de solo apresentam certa consistência entre os resultados dos dois ensaios, visto a predominância de partículas de argila e silte em ambos ensaios. No ensaio de granulometria clássica (Tabela 1) o solo apresentou 73% de silte e 12% de argila, no ensaio sem defloculante, indo ao encontro dos resultados de granulometria a laser (Tabela 5), que apresentaram 20,50% de argila e 79,55% de silte.

A mistura 85% Solo + 15% LETA foi a mistura que apresentou maior diferenciação entre os resultados de granulometria. No entanto, se considerar que o material utilizado no ensaio de granulometria a laser é limitado ao diâmetro de 0,84 mm, parte da fração arenosa pode não ser real, o que pode aumentar a porcentagem de material siltoso. Assim, ao analisar a fração siltosa – Tabelas 3 e 5 - no ensaio de granulometria a laser (82,35%) e a fração de silte e areias no ensaio de granulometria clássica sem defloculante (75%) pode-se considerar que os resultados são consistentes. Esse fato, ainda pode ser comprovado pela fração de argila nos ensaios (21% no ensaio de granulometria clássica sem defloculante e 17,66% no de granulometria a laser).

Do mesmo modo, pode-se analisar os resultados obtidos para as misturas 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA. Na primeira (70% Solo + 30% LETA), no ensaio de granulometria clássica foi obtido 14% de argila, 16% de silte e 63% de areias. A fração de argila apresenta consistência no resultado com o ensaio de granulometria a laser, onde foi encontrado 13,43%. Para a mistura de 50% Solo + 50% LETA há também consistência nas frações de argila nos ensaios de granulometria clássica e a laser, com 12,00% e 11,60%, respectivamente. As demais frações, silte e areia, se diferenciam nos dois ensaios, possivelmente pelos fatos já citados anteriormente.

4.2. CLASSIFICAÇÃO MCT

A classificação MCT, produto da Metodologia MCT desenvolvida por Nogami e Villibor (1981), tem por objetivo classificar adequadamente os solos tropicais, apresentando as propriedades mecânicas e hidráulicas dos mesmos, muitas vezes

considerados inapropriados para aplicação por meio das classificações tradicionais como SUCS e TRB.

Para fins de complementação foi também realizado o ensaio pelo método das pastilhas, de acordo com o proposto por Nogami e Villibor (1994). Nesse ensaio obteve-se o valor de contração diametral das pastilhas e o valor de penetração da agulha do penetrômetro após o processo de reabsorção de água, com a finalidade de classificar os solos tropicais.

A Tabela 6 apresenta os índices de classificação obtidos nos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão, bem como a classificação MCT para o solo e para as misturas solo+LETA. Na Figura 36 são apresentados os resultados finais da classificação MCT, para o solo e para as misturas solo+LETA, pelo método da perda de massa por imersão.

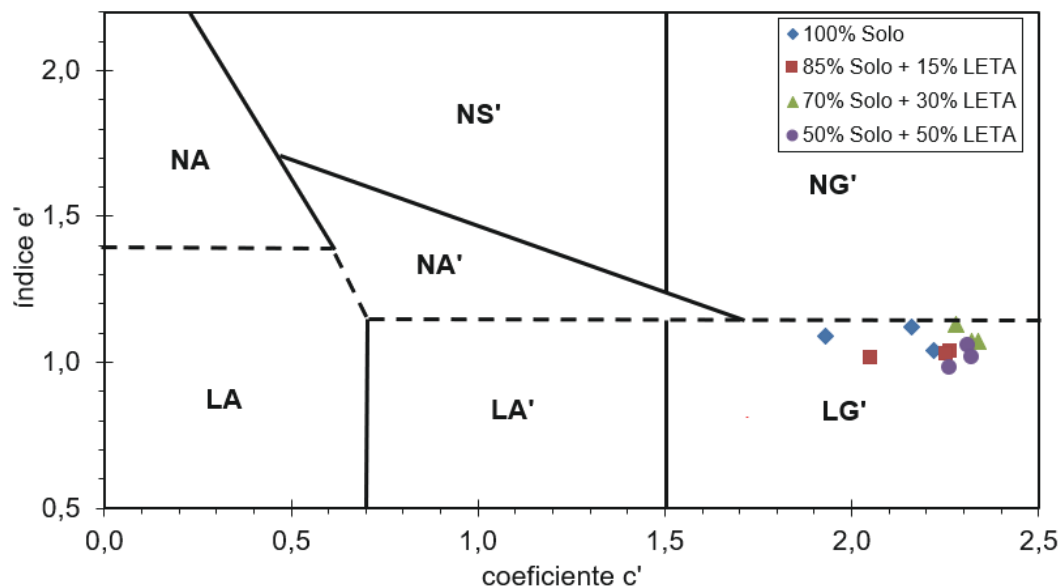
Tabela 6 – Índices para classificação MCT pelo método de perda de massa por imersão para o solo e misturas solo+LETA.

Mistura	AM	Método da Perda de Massa por Imersão				Classificação
		c'	d'	Pi (%)	e'	
Solo	1	2,16	20,00	42,13	1,12	LG'
	2	1,93	23,33	44,57	1,09	LG'
	3	2,22	24,19	29,93	1,04	LG'
85% Solo + 15% LETA	1	2,26	33,87	55,50	1,04	LG'
	2	2,05	44,74	62,72	1,02	LG'
	3	2,25	37,50	55,05	1,03	LG'
70% Solo + 30% LETA	1	2,34	34,09	65,04	1,07	LG'
	2	2,28	25,00	63,73	1,13	LG'
	3	2,32	35,65	66,73	1,07	LG'
50% Solo + 50% LETA	1	2,31	26,79	44,30	1,06	LG'
	2	2,32	32,00	45,49	1,02	LG'
	3	2,26	38,64	41,95	0,98	LG'

c': coeficiente angular da parte retilínea da curva de compactação correspondente à condição Mini-MCV = 10; d': coeficiente angular da parte retilínea mais inclinada do ramo seco da curva de compactação correspondente a 10 golpes; Pi: perda de massa por imersão; e': coeficiente para determinação do comportamento laterítico ou não laterítico.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Figura 36 – Ábaco de classificação MCT pelo método de perda de massa por imersão para o solo e misturas solo+LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

De acordo com o apresentado na Tabela 6 - para ensaios realizados pelo método da perda de massa por imersão - todas as misturas (solo e solo+LETA) apresentaram comportamento laterítico argiloso e foram classificadas como LG'. Materiais com essa classificação apresentam granulometria típica de argilas e argilas arenosas, alta capacidade de suporte, baixa perda de massa por imersão, baixa expansão, média à alta contração, baixa permeabilidade e média à alta plasticidade.

Já, a Tabela 7 apresenta os índices de classificação obtidos nos ensaios pelo método das pastilhas, bem como a classificação MCT para o solo e para as misturas solo+LETA. Na Figura 37 são apresentados os resultados finais da classificação MCT, para o solo e para as misturas solo+LETA, pelo método das pastilhas.

Pela Tabela 7 - para ensaios realizados pelo método das pastilhas - todas as misturas de solo+LETA apresentaram comportamento laterítico argiloso e foram classificadas como LG', com as mesmas características já citadas anteriormente. O solo foi classificado como LA'-LG', caracterizando-o como areia argilosa laterítica e/ou uma argila ou argila arenosa laterítica. O comportamento desse material se assemelha aos comportamentos citados para a classificação LG'.

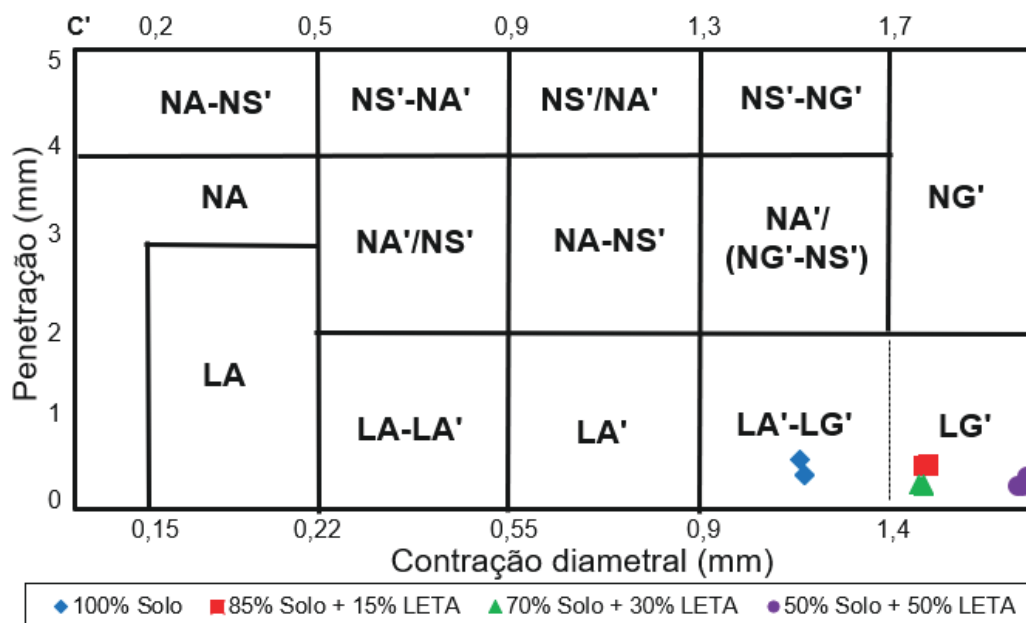
Tabela 7 – Índices para classificação MCT pelo método das pastilhas para o solo e misturas solo+LETA.

Mistura	AM	Método das Pastilhas		
		cd (mm)	Penetração (mm)	Classificação
Solo	1	1,15	0,56	LA' - LG'
	2	1,17	0,38	LA' - LG'
	3	1,17	0,39	LA' - LG'
85% Solo + 15% LETA	1	1,59	0,50	LG'
	2	1,57	0,50	LG'
	3	1,57	0,51	LG'
70% Solo + 30% LETA	1	1,56	0,27	LG'
	2	1,55	0,28	LG'
	3	1,54	0,29	LG'
50% Solo + 50% LETA	1	1,99	0,35	LG'
	2	1,96	0,25	LG'
	3	1,98	0,25	LG'

cd: contração diametral.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Figura 37 – Ábaco de classificação MCT pelo método das pastilhas para o solo e misturas solo+LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Ao analisar as Figuras 36 e 37, por meio dos resultados obtidos nas classificações MCT pelo método da perda por imersão e pelo método das pastilhas, respectivamente, fica evidente a correspondência entre os resultados, principalmente no que diz respeito ao caráter laterítico dos materiais.

Ressalta-se que não foi possível realizar o ensaio para o LETA, devido aos seguintes motivos: pelo método das pastilhas o material não apresentou plasticidade necessária para penetração da agulha do penetrômetro; pelo método de perda de massa por imersão pelo fato de não ser possível realizar a moldagem de um corpo de prova e classificar o material, pelas características distintas comparados a um solo.

4.3. ANÁLISE QUÍMICA

O objetivo principal da análise química foi para fins de avaliação do teor de matéria orgânica (MO), o potencial hidrogeniônico (pH), a capacidade de troca catiônica (CTC), a saturação de bases e alumínio e a presença de elementos químicos. Os resultados da análise química do solo, do LETA e das misturas solo+LETA são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo dos resultados de análise química para o solo, o LETA e misturas solo+LETA.

Mistura	Cátions Básicos			Acidez Potencial		CTC	Saturação		MO	pH
	Ca	K	Mg	Al	H + Al		Bases	Al		
	(cmolc/dm ³)						(%)			
Solo	0,4	0,045	0,4	1,1	8,7	9,5	8,8	56,6	0,0	4,8
LETA	1,4	0,047	0,2	0,1	4,4	6,0	27,2	5,7	3,6	5,1
85% Solo + 15% LETA	1,4	0,082	0,6	1,0	6,2	8,3	25,1	32,4	2,3	4,5
70% Solo + 30% LETA	1,3	0,075	1,0	0,6	5,5	7,9	30,2	20,2	3,9	4,5
50% Solo + 50% LETA	2,5	0,084	0,4	0,3	3,9	6,9	43,4	9,1	5,4	4,6

CTC: capacidade de troca catiônica; Al: alumínio; Ca: cálcio; MO: matéria orgânica; Mg: magnésio; K: potássio; H: hidrogênio; pH: potencial hidrogeniônico.

Pela Tabela 8 observa-se que o solo apresentou 8,8% de saturação por bases, caracterizando-o como um solo distrófico, ou seja, muito pouco fértil, característica de solos com saturação por bases menor que 20%. Percebe-se que o LETA e as misturas solo+LETA apresentaram valores de saturação por bases maiores se comparado com o solo (valores variando entre 25,1 e 43,4%), no entanto todos inferiores a 50%, o que caracteriza esses materiais como de média ou pouco fertilidade e sem reservas de nutrientes para vegetais. Quanto a saturação por alumínio, as misturas de solo+LETA e o LETA apresentaram valores inferiores a 50% (valores entre 5,7 e 32,4%), indicando uma quantidade de alumínio não tóxico para as plantas, característica de solos não álicos. Já, o solo é considerado álico, possivelmente tóxico para as plantas, pois apresentou 56,6% de saturação por alumínio (mais que 50% de saturação em alumínio).

A capacidade de troca catiônica (CTC), também apresentada na Tabela 8, para o solo foi de 9,5 cmolc (inferior a 10 cmolc), caracterizando o mesmo como uma argila de baixa atividade, com pouca ou nenhuma presença de matéria orgânica (constatado na Tabela 8 como MO = 0%). CTC com valores entre 3 cmolc e 15 cmolc indicam a presença do argilomineral caulinita, característico de solos não expansíveis. O LETA e as misturas solo+LETA apresentaram uma quantidade maior de matéria orgânica (de 2,3 até 5,4%) e uma redução na CTC (valores entre 6,0 cmolc e 8,3 cmolc), indicando que a adição do LETA no solo não provoca expansibilidade no mesmo.

Com relação ao pH, os valores obtidos (Tabela 8) foram bastante próximos, variando de 4,5 a 5,1%, indicando que o solo, o LETA e as misturas solo+LETA tem característica ácida. Esse parâmetro é comprovado pela acidez potencial ($H + Al$), que indica a presença de elementos que causam acidez ao solo. No solo, no LETA e nas misturas solo+LETA os valores variaram entre 3,9 cmolc e 8,7 cmolc, indicando potencial de acidez de média a alta.

Os teores de matéria orgânica – apresentados na Tabela 8 – para todos materiais foram considerados baixos (<13,8%), com valores variando entre 0,0 e 5,4%. O teor de MO encontrado nessa pesquisa para o LETA (3,60%) vai ao encontro do resultado obtido por Gastaldini et al. (2015) para a cinza de LETA da cidade de Santa Maria/RS, onde os autores encontraram 3,37% de matéria orgânica.

Uma observação importante a se fazer com relação a análise química básica do LETA é que talvez esse tipo de análise fique prejudicada pela elevada quantidade de alumínio e este ensaio seja aplicável somente a solos e não a resíduos. Essa

hipótese é abordada em função do baixo resultado de saturação por alumínio e pela baixa acidez potencial de alumínio, sendo que o material tende a apresentar elevada quantidade de alumínio em função do coagulante utilizado no tratamento.

Em complemento à análise química foram realizados ensaios de perda por ignição, para determinação do teor de matéria orgânica por perda de massa, com resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados de teor de matéria orgânica pelo ensaio de perda por ignição.

Mistura	PPI (%)			
	AM01	AM02	AM03	Média
Solo	3,32	3,30	3,28	3,30
LETA	29,38	30,95	29,72	30,02
85% Solo + 15% LETA	11,22	11,18	11,26	11,22
70% Solo + 30% LETA	14,45	14,45	14,41	14,44
50% Solo + 50% LETA	19,64	19,62	19,57	19,61

PPI: Perda de matéria orgânica por ignição.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Analisando a Tabela 9 é perceptível que o teor de matéria orgânica é maior no LETA se comparado ao teor presente no solo. Dessa forma, os valores de PPI são superiores conforme aumenta-se a inclusão de LETA nas misturas.

O teor de matéria orgânica presente no solo pode ser considerado muito baixo, visto que o método utilizado para determinação do PPI pode não corresponder somente às perdas por matéria orgânica, pelo fato de que podem ocorrer perdas de outras substâncias, tais como água de constituição e carbonatos, à medida que a temperatura da massa de solo se eleva. Se comparar o teor de matéria orgânica encontrada no ensaio de análise química (MO = 0,0%), pode-se considerar que a comparação dos resultados é válida, visto que o baixo teor de MO encontrado no ensaio de ignição pode corresponder a perda de água e/ou carbonatos ainda presentes na amostra.

O fato supracitado, comparando os teores de MO obtidos pela análise química e pelo ensaio de perda de massa por ignição, pode ser creditado também ao analisar o LETA e as misturas solo+LETA. A inconsistência dos resultados encontrados se dá

pelas diferentes metodologias de ensaio. Mas a validade dos resultados de PPI para o LETA e para as misturas solo+LETA pode ser creditada pelos resultados de outros trabalhos citados na revisão de literatura. Conforme resultados já apresentados no Capítulo 2, embora se saiba que há uma variabilidade muito grande nas características dos LETAs de estação para estação, em algumas pesquisas realizadas no país - Santos et al. (2000), Oliveira, Machado e Holanda (2004), Hoppen et al. (2005) e Tartari, Díaz-Mora e Mondénes (2011) - foram encontrados valores entre 16,93 e 49,79% de PPI para LETAs de diferentes regiões, que vem ao encontro do valor médio de PPI de 30,02% encontrado nesse estudo.

No intuito de complementar a análise química básica foi realizado o ensaio de fluorescência de raio X do solo, do LETA e das misturas solo+LETA. Os resultados da análise química por fluorescência de raio X são apresentados na Tabela 10. Ressalta-se que na referida tabela (10) os elementos em muito baixa concentração ou ausentes não foram apresentados.

Na Tabela 10 são apresentados dois valores correspondentes a porcentagem de cada elemento químico em cada mistura, onde os valores indicados com asterisco (*) correspondem aos corrigidos em função da perda de massa por ignição (PPI). Essa correção foi realizada em função do ensaio de fluorescência de raio X não conter os resultados de perda ao fogo.

De maneira geral, ao analisar a Tabela 10, é possível identificar no solo a presença de Silício, Ferro, Alumínio e Sódio. Além disso, há traços de Titânio, Fósforo, Enxofre e Potássio. Pela presença de Magnésio no LETA, as misturas solo+LETA também apresentaram traços do elemento, além dos anteriormente citados. O LETA e as misturas solo+LETA, embora em menores porcentagens, também apresentaram preponderância em Si, Fe, Al e Na.

Os resultados apresentados para o LETA vão ao encontro a alguns estudos apresentados na revisão de literatura, em termos de elementos presentes no material. O principal fato a se destacar é a presença de Silício, Alumínio e Ferro em maiores porcentagens. Santos et al. (2010), Oliveira, Machado e Holanda (2004), Hoppen et al. (2005) e Tartari, Díaz-Mora e Mondénes (2011) encontraram, para diferentes lodos do Brasil, também a presença de maior porcentagem dos elementos citados. No entanto, há se destacar novamente que cada LETA tem característica específica, havendo variação da porcentagem desses elementos presentes nas amostras.

Tabela 10 – Resumo dos resultados de fluorescência de raio X para o solo, o LETA e misturas solo+LETA.

Parâmetro	Material				
	Solo	LETA	85% Solo + 15% LETA	70% Solo + 30% LETA	50% Solo + 50% LETA
SiO ₂ (%)	34,47/33,33*	29,22/20,45*	28,07/24,92*	29,26/25,03*	29,04/23,35*
Fe ₂ O ₃ (%)	32,10/31,04*	22,13/15,49*	27,28/24,22*	25,56/21,87*	24,82/19,95*
Al ₂ O ₃ (%)	27,25/26,35*	21,07/14,74*	22,54/20,01*	22,46/19,22*	22,59/18,16*
Na ₂ O (%)	14,3/13,83*	19,00/13,30*	14,30/12,70*	15,60/13,35*	14,70/11,82*
MgO (%)	0,00/0,00*	2,10/1,47*	1,60/1,42*	1,60/1,37*	2,00/1,61*
TiO ₂ (%)	2,84/2,75*	0,78/0,55*	2,21/1,96*	1,95/1,67*	1,71/1,37*
P ₂ O ₅ (%)	1,08/1,04*	0,73/0,51*	1,17/1,04*	0,48/0,41*	1,34/1,08*
SO ₃ (%)	0,61/0,59*	1,91/1,34*	0,85/0,75*	0,99/0,85*	1,30/1,05*
Ki	2,15**/1,26***	2,36**/1,39***	2,12**/1,25***	2,21**/1,30***	2,19**/1,29***
Kr	1,23**/0,58***	1,41**/0,68***	1,20**/0,56***	1,28**/0,61***	1,29**/0,61***

*Valores corrigidos em função da perda por imersão (PPI); **Calculado com as equações 11 e 12;

***Calculado com as equações 13 e 14.

Fonte: Adaptado de Laboratório de Análises Químicas da UFSM – Laudos n°: 24875, 24876, 24879, 24880 e 24881 (2019).

Esse fato – variação de porcentagem de elementos químicos presentes – pode ser justificado ao comparar os resultados encontrados nessa pesquisa (Tabela 10) com os resultados encontrados em outras estações de tratamento de água: Lin, Wu e Ho (2005) analisaram um LETA de Taiwan e encontraram 53,60% de SiO₂, 20,90% de Al₂O₃ e 6,60% de FeO₃; Wolff, Schwabe e Conceição (2015) determinaram que um LETA de Belo Horizonte/MG possui 37,20% de SiO₂, 30,10% de Al₂O₃ e 12,30% de FeO₃; Mohammed et al. (2017) encontraram 33,08% de SiO₂, 48,94% de Al₂O₃ e 4,46% de Fe₂O₃ para um LETA da cidade de Rabat, em Marrocos. Os resultados citados, aliados ao dessa pesquisa, compravam a variação das características do material.

Destaca-se, especificamente, que os resultados obtidos nessa pesquisa, para o LETA, no ensaio de fluorescência de raio X, não vão ao encontro dos resultados encontrados por Gastaldini et al. (2015), onde os autores encontraram valor elevado de SiO_2 (66,2%), se comparados aos outros elementos presentes no material. Embora o LETA seja da mesma cidade, destaca-se que o material analisado pelos autores trata-se da cinza de LETA, a qual passou por processos de calcinação antes da análise, além de ser de diferentes lotes, podendo, assim, apresentar características diferentes.

Além disso, também pela Tabela 10, observa-se em todas as misturas pequenas quantidades de Potássio e Magnésio – em paralelo a altas porcentagens de Silício e Alumínio - que indicam a presença de argilomineral caulinita, ou seja, as misturas tem características não expansíveis. O Silício pode ser explicado pela presença do quartzo como mineral constituinte, tanto do solo como do LETA. Esses resultados corroboram com os já encontrados para análise química básica. As características do Si e do Al também vão ao encontro dos resultados de acidez das misturas, discutidas na análise química básica.

Nota-se ainda – Tabela 10 – que para o solo, o LETA e as misturas solo+LETA há predominância dos óxidos SiO_2 e FeO_3 , seguido pelo Al_2O_3 . O FeO_3 é o responsável pela coloração avermelhada do solo, sendo que a porcentagem desse óxido reduziu com a inclusão de LETA no solo.

Destaca-se, conforme Tabela 10, que os valores de K_i e K_r foram calculados, a fim de inferir-se sobre o estágio de intemperização dos solos. Os teores de óxidos em porcentagem obtidos pelo ataque sulfúrico permitem o cálculo dessas relações moleculares, os quais são utilizados como índices de intemperismo do solo (KEHRIG, 1949; MELO et al., 1995; EMBRAPA, 1997).

O índice k_i fornece uma estimativa do grau de intemperismo de solos tropicais e subtropicais, apresentando uma estimativa da relação caulinita e gibbsita nos solos. O índice k_r é semelhante ao k_i , porém é mais apropriado para indicar o grau de alteração dos minerais em solos e a alta taxa de formação de óxidos de ferro em contraste com os baixos teores de alumina (KEHRIG, 1949).

A interpretação dos valores de k_i e k_r , conforme EMBRAPA (2006), se verifica da seguinte forma:

- $k_i > 0,75$ e $k_r > 0,75$ sugerem solos cauliniticos;
- $k_i > 0,75$ e $k_r \leq 0,75$ sugerem solos cauliniticos-oxidicos;

- $k_r \leq$ sugere solos oxídicos (hematíticos);
- $k_i \leq 0,75$ e $k_r \leq 0,75$ sugerem solos gibbsíticos/oxídicos;

O valor de k_i é calculado pela Equação (11) e o k_r pela Equação (12).

$$k_i = \left(\frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3} \right) * 1,7 \quad (11)$$

$$k_r = \frac{\left(\frac{\%SiO_2}{0,6} \right)}{\left(\frac{\%Al_2O_3}{1,02} \right) + \left(\frac{\%Fe_2O_3}{1,6} \right)} \quad (12)$$

Ainda, a fim de complementar a análise, as relações moleculares de k_i e k_r permitem determinar a existência ou não de lateritas. Para essa análise, Harrassowitz (1926, apud OLIVEIRA, 2006) estabeleceu as Equações 13 e 14 para determinação, respectivamente, de k_i e k_r .

$$k_i = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3} \quad (13)$$

$$k_r = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3} \quad (14)$$

Com a utilização das Equações 13 e 14, Martin e Doyne (1927, apud NOGUEIRA JÚNIOR, 1985), assim como Medina (1970, apud FUMIÓ, 1982), propuseram os seguintes limites: quando $k_i < 1,33$: laterita verdadeira; k_i entre 1,33 e 2,00: solo laterítico; e $k_i > 2,00$: solo não laterítico.

Pelos resultados de k_i e k_r apresentados na Tabela 10 nota-se que em todos materiais em estudo – solo, misturas solo+LETA e LETA – os valores de k_i (obtidos pela Equação 11) foram superiores a 0,75, assim como os valores de k_r (Equação 12). Segundo os critérios da EMBRAPA (2006) todos os materiais são considerados caulíníficos, indo ao encontro dos resultados apresentados na análise química, onde para todos materiais analisados – em função da CTC - foi verificada a predominância do argilomineral caulinita.

Ao analisar as proposições impostas por Martin e Doyne - e por Medina - verifica-se que os valores de k_i e k_r , obtidas pelas Equações 13 e 14, para o solo, para as misturas solo+LETA e para o LETA, indicaram que todos materiais tem tendência de serem lateríticos. O solo e as misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA foram classificadas como lateritas verdadeiras ($k_i < 1,33$). Já o LETA foi classificado como um material laterítico ($1,33 < k_i < 2,00$). Esses resultados – do solo e misturas solo+LETA – corroboram com os resultados encontrados na classificação MCT, onde os materiais foram classificados como lateríticos.

4.4. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação foi determinado para o solo e para as misturas solo+LETA com a finalidade de obter os parâmetros mecânicos desses materiais, o peso específico aparente seco máximo e a respectiva umidade ótima. Na Tabela 11 são apresentados os parâmetros para as misturas estudadas na pesquisa.

De acordo com os dados da Tabela 11 o peso específico aparente seco máximo das amostras de todas as misturas apresentaram uma variabilidade aceitável, bem como os valores de umidade ótima. Para o solo obteve-se a umidade ótima, na energia de compactação intermediária, de cerca de 37,2%, com peso específico aparente seco máximo de 13,82 kN/m³. Este resultado confirma a tendência para solos típicos brasileiros, onde os solos argilosos siltosos podem apresentar baixo peso específico aparente seco (menor que 15 kN/m³) e altas umidades ótimas (acima de 25%). O solo apresentou o maior valor de peso específico aparente seco máximo entre todos materiais estudados.

Na Figura 38, para fins comparativo, é apresentada a curva de compactação média para cada uma das misturas em estudo.

Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor Intermediário.

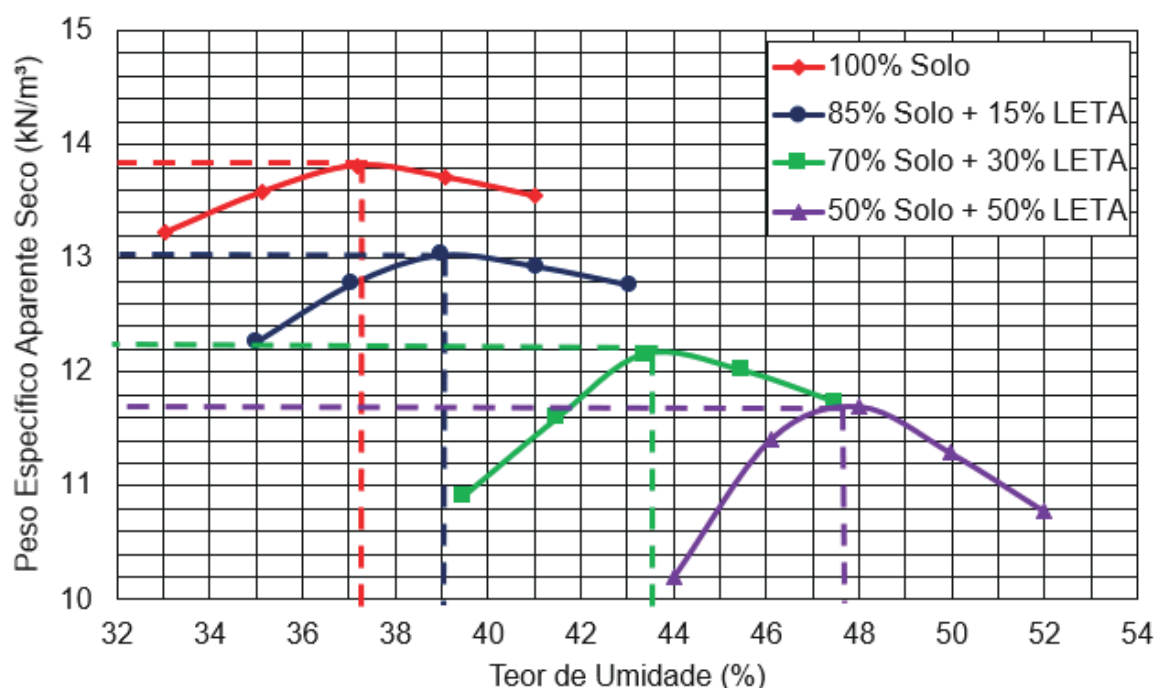
Mistura		$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	w _{ót} (%)
Solo	AM01	13,87	37,2
	AM02	13,80	37,3
	AM03	13,78	37,1
	Média	13,82	37,2
85% Solo + 15% LETA	AM01	13,03	38,9
	AM02	13,11	38,9
	AM03	12,95	39,1
	Média	13,02	39,0
70% Solo + 30% LETA	AM01	12,21	43,6
	AM02	12,09	43,4
	AM03	12,23	43,7
	Média	12,18	43,5
50% Solo + 50% LETA	AM01	11,70	47,6
	AM02	11,79	47,4
	AM03	11,62	48,1
	Média	11,70	47,7

$\gamma_{dm\acute{a}x}$: peso específico aparente seco máximo; w_{ót}: umidade ótima.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Percebe-se também – pela Tabela 11 e Figura 38 - que há uma tendência de redução do peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima conforme aumenta-se a porcentagem de LETA na mistura. Este fato pode ser creditado ao baixo peso específico real dos grãos do LETA e das misturas solo+LETA, já apresentado anteriormente, além do alto poder de absorção de água do LETA (justificada pela alta umidade natural do material). O menor valor de peso específico aparente seco máximo e, conseqüentemente, a maior umidade ótima foram obtidos para mistura 50% Solo + 50% LETA, com valores 11,70 kN/m³ e 47,7%, respectivamente.

Figura 38 – Curvas de compactação média na energia Proctor Intermediária para as misturas em estudo.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Essa redução no valor de peso específico aparente seco máximo ainda pode ser comprovado por meio do estudo de Xia (1994). O autor realizou o ensaio de compactação para diferentes LETAs e verificou que o peso específico aparente seco máximo variou de 5,40 kN/m³ até 14,54 kN/m³, podendo assim comprovar que a inserção de LETA no solo pode provocar uma diminuição no parâmetro.

Santos, Scapin e Pinheiro (2018) observaram redução no peso específico aparente seco e aumento na umidade ótima com o aumento do teor de LETA (de Santa Maria/RS). O solo de Santa Maria apresentou γ_d igual a 16,25 kN/m³ e as misturas 85% Solo + 15% LETA e 65% Solo + 35% LETA apresentam peso específico aparente seco máximo de 14,50 e 12,70 kN/m³, respectivamente. As umidades ótimas foram de 21% para o solo e 27,2% e 35,8% para as misturas com 15% e 35% de LETA, respectivamente.

Também, no estudo de Castilhos Júnior, Prim e Pimentel (2011) os autores verificaram que há uma tendência de redução no valor de peso específico aparente seco ao incorporar LETE, LETA e cal em misturas com solo. Os autores encontraram para mistura Solo+LETE+LETA+cal o peso específico aparente seco máximo de 12,30

kN/m^3 , sendo esse valor próximo aos encontrados para as misturas solo+LETA ensaiadas nesta pesquisa.

Os resultados expostos no certificado n° 111099-1 (UFSM, 2017b), apresentados na Tabela 12, realizado pelo LMCC da UFSM, mostram que o peso específico aparente seco do solo no estado indeformado (sem aplicação de processo de estabilização mecânica – compactação) varia de $10,16 \text{ kN/m}^3$ até $11,94 \text{ kN/m}^3$ e umidades naturais variando entre 35,8% e 44,3%. Portanto, no estado natural o solo apresentou menores valores de peso específico aparente seco, comprovando que a aplicação de estabilização mecânica tende a aumentar o parâmetro, retratado nos resultados desta pesquisa.

Tabela 12 – Peso específico aparente seco, umidade natural e índice de vazios de amostras do solo na condição indeformada.

Bloco	Corpos de Prova	γ_d (kN/m^3)	W_{nat} (%)	e
SP 19	AM01	10,69	44,30	1,72
	AM02	10,92	42,00	1,61
	AM03	10,16	43,40	1,86
	AM04	11,08	42,20	1,62
SP 20	AM01	11,09	40,90	1,62
	AM02	10,91	41,10	1,67
	AM03	10,71	36,10	1,71
	AM04	11,56	37,20	1,51
SP 21	AM01	11,59	37,10	1,50
	AM02	11,94	38,40	1,43
	AM03	10,84	42,90	1,68
	AM04	11,44	35,80	1,56

γ_d : peso específico aparente seco; w_{nat} : umidade natural; e: índice de vazios.

Fonte: (CERTIFICADO N° 111099-1 UFSM, 2017b).

4.5. PERMEABILIDADE

Os ensaios de permeabilidade seguiram as instruções apresentadas na metodologia, com a finalidade de determinar o coeficiente de permeabilidade do solo e das misturas solo+LETA, para amostras compactadas na energia intermediária. Os

valores de coeficiente de permeabilidade, obtidos pelas diretrizes da NBR 14545 (ABNT, 2000) e pela metodologia MCT, bem como os parâmetros de controle da compactação, são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Coeficientes de permeabilidade das misturas em estudo.

Mistura	Metodologia	Amostra	k (m/s)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	GC (%)	e
Solo	NBR 14545 (ABNT, 2000)	AM01	2,13E-09	13,78	36,67	99,71	0,96
		AM02	2,07E-09	13,87	37,25	100,36	0,95
		AM03	2,15E-09	13,80	37,29	99,86	0,96
		Média	2,12E-09	-	-	-	-
	MCT	AM01	1,86E-09	13,71	37,28	99,20	0,97
85% Solo + 15% LETA	NBR 14545 (ABNT, 2000)	AM01	7,83E-10	13,07	39,23	100,38	1,01
		AM02	7,72E-10	13,14	39,11	100,92	1,00
		AM03	7,90E-10	12,97	38,90	99,62	1,03
		Média	7,82E-10	-	-	-	-
	MCT	AM01	6,61E-10	13,09	39,23	100,54	1,01
70% Solo + 30% LETA	NBR 14545 (ABNT, 2000)	AM01	3,55E-09	12,23	43,61	100,41	0,97
		AM02	3,46E-09	12,14	43,37	99,67	0,98
		AM03	3,50E-09	12,17	43,50	99,92	0,98
		Média	3,50E-09	-	-	-	-
	MCT	AM01	4,47E-09	12,13	43,45	99,59	0,99
50% Solo + 50% LETA	NBR 14545 (ABNT, 2000)	AM01	2,56E-06	11,67	47,60	99,74	0,97
		AM02	2,42E-06	11,84	47,59	101,20	0,94
		AM03	2,48E-06	11,89	47,74	101,62	0,93
		Média	2,49E-06	-	-	-	-
	MCT	AM01	2,77E-06	11,81	47,69	100,94	0,94

k: coeficiente de permeabilidade; w: umidade; γ_d : peso específico aparente seco; GC: grau de compactação; e: índice de vazios.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Pela Tabela 13 percebe-se que o ensaio pelas duas metodologias estudadas – NBR 14545 (ABNT, 2000) e MCT – apresentaram resultados próximos, na mesma ordem de grandeza e com a mesma tendência nas misturas estudadas. Os resultados que serão discutidos e analisados são os obtidos pela normativa brasileira, pelo fato de ser constituído por uma média de 3 amostras.

Observa-se que o solo em estudo apresentou coeficiente de permeabilidade (k) médio de $2,12E-09$ m/s, que de acordo com Lambe e Whitman (1969) representam solos com permeabilidade muito baixa (k de 10^{-9} a 10^{-11} m/s). A permeabilidade do solo está de acordo com o esperado para materiais pertencentes ao mesmo grupo MCT, corroborando a descrição apresentada por Nogami e Villibor (1981) para solos com comportamento laterítico argiloso (LG').

Na mistura 85% Solo + 15% LETA, ao substituir 15% do solo por LETA, houve uma redução no valor de coeficiente de permeabilidade da mistura se comparado ao solo. O coeficiente de permeabilidade médio foi de $7,82E-10$ m/s. Embora o LETA apresente um comportamento distinto, acredita-se que nesse caso a inclusão do material ao solo provocou um melhor entrosamento das partículas, preenchendo a falta de material arenoso para uma distribuição granulométrica mais uniforme. A mistura 70% Solo + 30% LETA, por sua vez, apresentou um coeficiente de permeabilidade médio de $3,50E-09$ m/s. Assim como o solo, as misturas com 15% e 30% de LETA apresentaram comportamento característico de materiais com permeabilidade muito baixa.

Já, a mistura 50% Solo + 50% LETA, pela alta porcentagem de substituição de solo por LETA, apresentou coeficiente de permeabilidade médio de $2,49E-06$ m/s, característico de materiais com permeabilidade alta (k de 10^{-4} a 10^{-7} m/s). Esperava-se esse comportamento dessa mistura, visto as características distintas do LETA.

Os resultados apresentados para as misturas 85% Solo + 15% LETA e 70% Solo + 30% LETA vão ao encontro com os resultados obtidos por Gonçalves et al. (2017). O autor estudou misturas de solo argiloso com LETA, na proporção 1:0,5 e 1:1, e verificou uma melhoria no desempenho frente a permeabilidade, ou seja, o incremento do LETA diminuiu o valor de coeficiente de permeabilidade, deixando as misturas mais impermeáveis, se comparado ao solo natural.

Outros autores, Castilhos Júnior, Prim e Pimentel (2011), não identificaram uma variação significativa no coeficiente de permeabilidade de misturas de

solo+LETE+LETA+cal, mas as mesmas foram aplicáveis para camadas de cobertura de aterro, assim como o solo natural.

Os resultados encontrados nessa pesquisa vão ao encontro dos resultados encontrados por Santos, Scapin e Pinheiro (2018), onde os autores analisaram um solo siltoso-argiloso de Santa Maria/RS e misturas de solo+LETA, com o LETA também da cidade de Santa Maria/RS. Na análise os autores encontraram o coeficiente de permeabilidade para o solo de $3,843E-10$ m/s, para mistura 85% Solo + 15% LETA o k foi igual a $4,026E-10$ m/s e para mistura 65% Solo + 35% LETA obtiveram o valor de k igual a $2,053E-9$ m/s. Portanto, na pesquisa citada, ao adicionar 15% de LETA em substituição ao solo houve uma redução no valor de k e, quando adicionado 35% de LETA na substituição ao solo, houve um aumento no coeficiente de permeabilidade, fato semelhante ao ocorrido nesta pesquisa.

Por fim, pela Tabela 13, ressalta-se a qualidade dos resultados apresentados, pela pequena variabilidade dos resultados de coeficiente de permeabilidade das misturas, além da pequena variação dos parâmetros de controle de compactação (umidade e grau de compactação das misturas). Essa pequena variação se deu pelo fato de que no momento da compactação os parâmetros de peso específico aparente seco eram estimados e, se neste momento percebia-se uma grande variação no parâmetro, o corpo de prova era descartado e outro era compactado, até se obter melhores resultados.

4.6. CURVAS CARACTERÍSTICAS

A curva característica é a medida de capacidade de retenção de água no solo de acordo com a variação do teor de umidade, quando sujeito a vários níveis de sucção. Portanto, a curva característica relaciona a quantidade de fluido presente nos poros do solo e sua correspondente sucção.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos no ensaio, para determinação da curva característica, para o solo e misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA.

Ao observar a Tabela 14 nota-se que conforme aumenta a porcentagem de LETA nas misturas há tendência de aumento da porosidade da amostra, sendo que o solo apresentou o menor valor de porosidade (63,03%) e a mistura 50% Solo + 50% LETA apresentou a maior porosidade (71,69%). Esse fato era esperado, visto as

características distintas do LETA. Ao substituir solo por LETA há mudança na granulometria, que altera a porosidade do material.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de sucção – curva característica.

Mistura	AM	w (%)	Porosidade (%)			Umidade Gravimétrica (%)					
			Macro	Micro	Total	Sat	1 (kPa)	6 (kPa)	10 (kPa)	100 (kPa)	1500 (kPa)
Solo	AM01	37,12	9,20	54,58	63,78	63,78	59,61	54,58	51,93	46,61	35,34
	AM02	37,33	6,97	55,31	62,28	62,28	58,86	55,31	54,57	47,77	36,98
	Média	37,23	8,09	54,95	63,03	63,03	59,24	54,95	53,25	47,19	36,16
85% Solo + 15% LETA	AM01	39,21	7,86	60,83	68,69	68,69	66,84	60,83	57,74	49,37	38,87
	AM02	38,98	6,97	57,91	64,88	64,89	60,56	57,91	56,69	51,12	40,45
	Média	39,10	7,42	59,37	66,79	66,79	63,70	59,37	57,22	50,25	39,66
70% Solo + 30% LETA	AM01	43,38	3,22	64,00	67,22	67,22	66,84	64,00	61,61	55,41	46,09
	AM02	43,61	3,79	63,89	67,68	67,67	67,13	63,89	61,55	54,74	45,33
	Média	43,50	3,51	63,95	67,45	67,45	66,99	63,95	61,58	55,08	45,71
50% Solo + 50% LETA	AM01	47,51	6,91	63,34	70,25	70,24	67,95	63,34	60,27	54,21	47,21
	AM02	47,70	7,87	65,25	73,12	73,13	70,54	65,25	63,54	57,89	48,96
	Média	47,61	7,39	64,30	71,69	71,69	69,25	64,30	61,91	56,05	48,09

AM: amostra; w: umidade; Sat: saturado

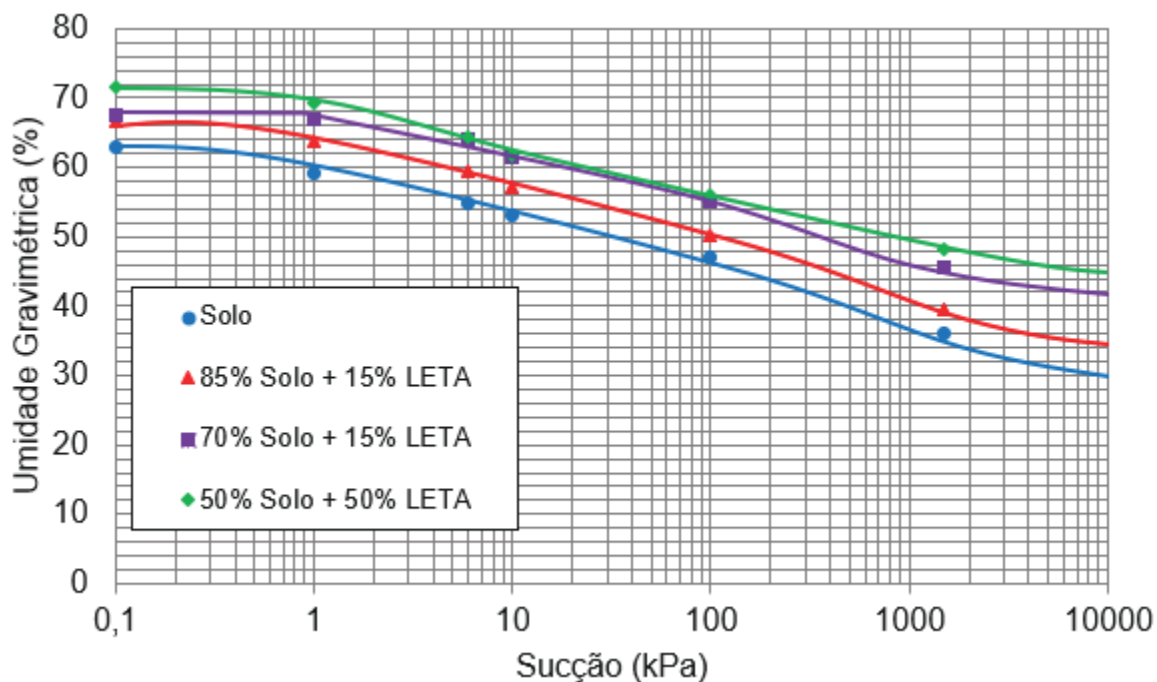
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

As curvas características do solo e das misturas solo+LETA em estudo foram ajustadas a partir do modelo apresentado por Van Genuchten (1980), de modo a evidenciar os dados apresentados. A Figura 39 representa as curvas características dos materiais em estudo.

Pela Tabela 14 e Figura 39 é possível observar que os valores de umidade gravimétrica do solo e das misturas solo+LETA vão diminuindo conforme aumenta a tensão aplicada. Essa situação se deve à saída de água dos poros, conforme se

aumenta a tensão. Portanto, pode-se afirmar que o aumento da umidade gravimétrica é inversamente proporcional ao efeito de sucção.

Figura 39 – Curvas características do solo e misturas solo+LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Para maior tensão ensaiada (1500 kPa), que se refere ao teor residual de umidade, tem-se uma variação nestes valores para os materiais analisados. O menor teor residual de umidade foi encontrado para o solo (36,16%) e a maior umidade residual foi da mistura 50% Solo + 50% LETA (48,09%). Ficou claro que conforme aumenta a quantidade de LETA há tendência de aumento da umidade residual. Dessa forma, as misturas solo+LETA absorvem mais água que o solo. Esses resultados corroboram com o poder de absorção de água do LETA e sua alta umidade natural, já citada anteriormente.

Fazendo uma análise da Figura 39, em termos das umidades ótimas de compactação, pode-se estimar a sucção de cada material nessa condição. Para o solo tem-se a sucção aproximadamente de 900 kPa, para mistura 85% Solo + 15% LETA em torno de 1500 kPa, para 70% Solo + 30% LETA próximo a 3000 kPa e para 50% Solo + 50% LETA aproximadamente 3100 kPa. Isso indica que conforme aumenta a porcentagem de LETA há um aumento da sucção para as umidades ótimas de

compactação, com menor poder de absorção de água do solo e maior da mistura 50% Solo + 50% LETA.

Por fim – pela Figura 39 - fica claro que em todas tensões aplicadas houve uma tendência de aumento do valor de sucção e de umidade gravimétrica conforme o aumento de LETA na mistura. Isso indica, em uma possível utilização dos materiais em camadas evapotranspirativas, que os materiais que contém LETA teriam melhor desempenho frente a absorção de água, se comparado ao solo.

4.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram as instruções descritas na metodologia, sendo os resultados e os parâmetros de controle da compactação apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples em amostras não saturadas.

Mistura		RCS (kPa)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	GC (%)	e
Solo	AM01	429	13,72	37,06	99,31	0,97
	AM02	439	13,84	37,22	100,16	0,95
	AM03	417	13,94	37,32	100,84	0,94
	Média	428	-	-	-	-
85% Solo + 15% LETA	AM01	541	12,95	38,90	99,46	1,03
	AM02	543	13,01	39,10	99,93	1,02
	AM03	530	13,14	39,02	100,96	1,00
	Média	538	-	-	-	-
70% Solo + 30% LETA	AM01	545	12,03	43,29	98,77	1,00
	AM02	573	12,33	43,67	101,21	0,95
	AM03	536	12,21	43,41	100,23	0,97
	Média	551	-	-	-	-
50% Solo + 50% LETA	AM01	508	11,88	47,91	101,52	0,93
	AM02	479	11,65	47,71	99,61	0,97
	AM03	492	11,53	47,47	98,54	0,99
	Média	493	-	-	-	-

RCS: resistência à compressão simples; w: umidade; γ_d : peso específico aparente seco; GC: grau de compactação; e: índice de vazios.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

Pela Tabela 15 nota-se que o solo apresentou a RCS média de 428 kPa (0,428 MPa) valor esse coerente com a resistência à compressão simples de solos argilosos. A substituição de solo por LETA, em todas misturas, apresentou um acréscimo da RCS se comparado ao solo, sendo que o melhor desempenho foi apresentado pela mistura de 70% Solo + 30% LETA, com RCS de 551 kPa (0,551 MPa), com 28,73% de resistência média superior ao solo. As misturas de 85% Solo + 15% LETA e 50% Solo + 50% LETA apresentaram 25,70% e 15,18% de RCS média superior ao solo, respectivamente.

As substituições de solo por LETA possibilitaram o acréscimo de RCS. Esta situação possivelmente se deu pelo comportamento distinto do LETA, que tende aumentar o atrito entre as partículas e, em consequência, aumentar a resistência à compressão das misturas.

Esse fato vai ao encontro do estudo de Pereira (2012), onde o autor incorporou LETE, nas proporções de 5%, 10%, 20% e 30% em mistura de solo-cimento (não se alterou a porcentagem de cimento com intuito de analisar apenas a influência do LETE). Ressalta-se que embora na referida pesquisa foi utilizado LETE, o mesmo tem características semelhantes ao LETA (essa situação foi identificada ao longo da pesquisa bibliográfica). O autor verificou que o acréscimo de lodo de ETE na mistura tendeu a aumentar a RCS se comparado ao solo. E, na maior proporção de LETE, houve uma pequena redução no parâmetro, mas ainda se mantendo superior ao solo natural. Situação essa também observada nesta pesquisa.

De maneira idêntica ao já considerado no ensaio de permeabilidade, para os ensaios de RCS ressalta-se a qualidade dos resultados apresentados, pela pequena variabilidade dos resultados de RCS das misturas, além da pequena variação dos parâmetros de controle de compactação (umidade e grau de compactação das misturas). Essa pequena variação se deu pelo fato de que no momento da compactação os parâmetros de peso específico aparente seco eram estimados e, se neste momento percebia-se uma grande variação no parâmetro, o corpo de prova era descartado e outro era compactado, até se obter melhores resultados.

4.8. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

4.8.1. Ensaio de cisalhamento direto

Conforme mencionado na metodologia, os corpos de prova foram moldados de forma semi-estática, em moldes metálicos de 5 cm x 5 cm x 2 cm (comprimento x largura x altura). Na Tabela 16 são apresentados os parâmetros de controle de compactação para os CPs moldados para os ensaios de cisalhamento direto, nas condições natural (umidade ótima) e inundada, para todas misturas em estudo.

Posterior a moldagem, os corpos de prova foram ensaiados, a fim de obter a resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito interno e coesão) das misturas em estudo. Também, os resultados posteriormente serão comparados com os obtidos pelo ensaio de compressão triaxial. As Figuras 40, 41, 42 e 43 apresentam as curvas de tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal e variação volumétrica *versus* deslocamento horizontal, para os ensaios realizados nas duas condições (natural e inundada), para todas as misturas em estudo.

Com relação as Figuras 40, 41, 42 e 43 é possível fazer as seguintes considerações:

- Para os ensaios na condição natural (umidade ótima), o solo e a mistura 85% Solo + 15% LETA, nas curvas de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal, não apresentaram picos nítidos de ruptura, situação característica de argilas plásticas. Já, as misturas 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA apresentaram picos nítidos de ruptura, comportamento característico de argilas rijas a duras ou areias compactas. Na condição inundada, o solo e as misturas 85% Solo + 15% LETA e 70% Solo e 30% LETA não apresentaram picos nítidos, enquanto a mistura 50% Solo + 50% LETA apresentou ruptura frágil;

- Com relação a curva de variação volumétrica, na condição natural (umidade ótima), o solo apresentou uma variação volumétrica inicial de compressão, seguida de um pequeno aumento de volume para tensões mais baixas. As misturas solo+LETA apresentaram uma pequena variação volumétrica inicial de compressão, seguida de um aumento de volume considerável. Quanto maior a porcentagem de LETA no solo, maior foi o aumento de volume, para as tensões mais baixas. Essa elevada variação volumétrica, portanto, pode ser creditada ao LETA incorporado ao solo;

Tabela 16 – Parâmetros de compactação para os ensaios de cisalhamento direto para as misturas em estudo.

Mistura	Amostra	Condição	γ_d (kN/m ³)	w (%)	GC (%)	e
Solo	AM01 (25 kPa)	NAT	13,77	37,30	99,64	0,96
		IN	13,86	37,36	100,29	0,95
	AM02 (50 kPa)	NAT	13,84	37,13	100,14	0,95
		IN	13,77	37,04	99,13	0,97
	AM03 (100 kPa)	NAT	13,88	37,35	100,43	0,95
		IN	13,71	37,32	99,20	0,97
85% Solo + 15% LETA	AM01 (25 kPa)	NAT	13,00	39,12	99,85	1,02
		IN	13,13	39,19	100,84	1,00
	AM02 (50 kPa)	NAT	13,06	38,97	100,31	1,01
		IN	12,90	38,81	99,08	1,04
	AM03 (100 kPa)	NAT	12,78	38,82	98,92	1,04
		IN	13,01	39,16	99,92	1,02
70% Solo + 30% LETA	AM01 (25 kPa)	NAT	12,16	43,44	99,84	0,98
		IN	12,12	43,50	99,51	0,99
	AM02 (50 kPa)	NAT	12,14	43,67	99,67	0,98
		IN	12,12	43,62	99,51	0,99
	AM03 (100 kPa)	NAT	12,06	43,32	99,01	1,00
		IN	12,27	43,33	100,74	0,96
50% Solo + 50% LETA	AM01 (25 kPa)	NAT	11,67	47,86	99,74	0,97
		IN	11,67	47,72	99,74	0,97
	AM02 (50 kPa)	NAT	11,66	47,57	99,66	0,97
		IN	11,79	47,54	100,77	0,95
	AM03 (100 kPa)	NAT	11,76	47,72	100,51	0,95
		IN	11,59	47,81	99,06	0,98

w: umidade; γ_d : peso específico aparente seco; GC: grau de compactação; e: índice de vazios; NAT: natural (umidade ótima); IN: inundada.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2020).

Figura 40 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento e variação volumétrica x deslocamento do solo (a) natural e (b) inundada.

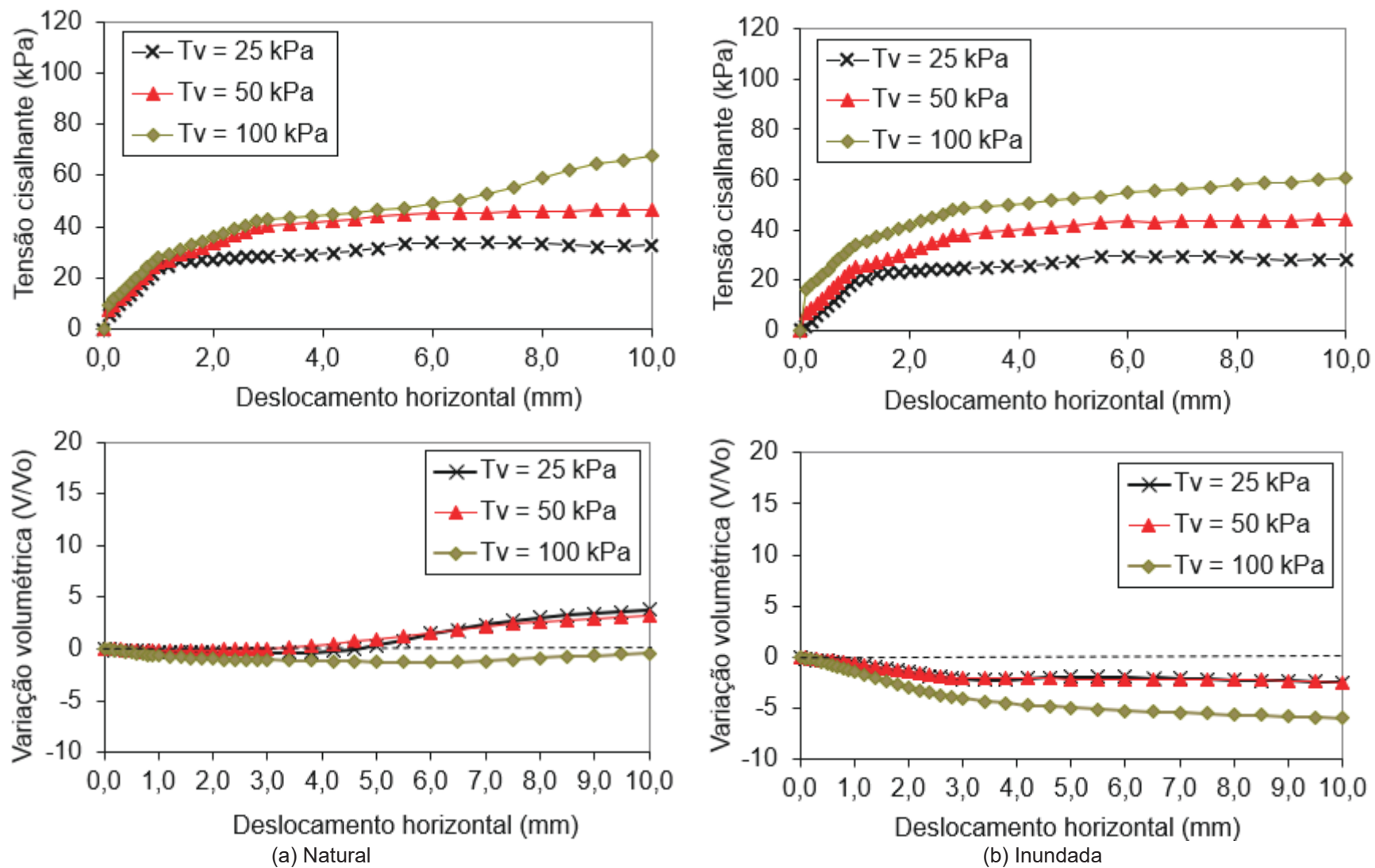


Figura 41 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento e variação volumétrica x deslocamento da mistura 85% Solo + 15% LETA (a) natural e (b) inundada.

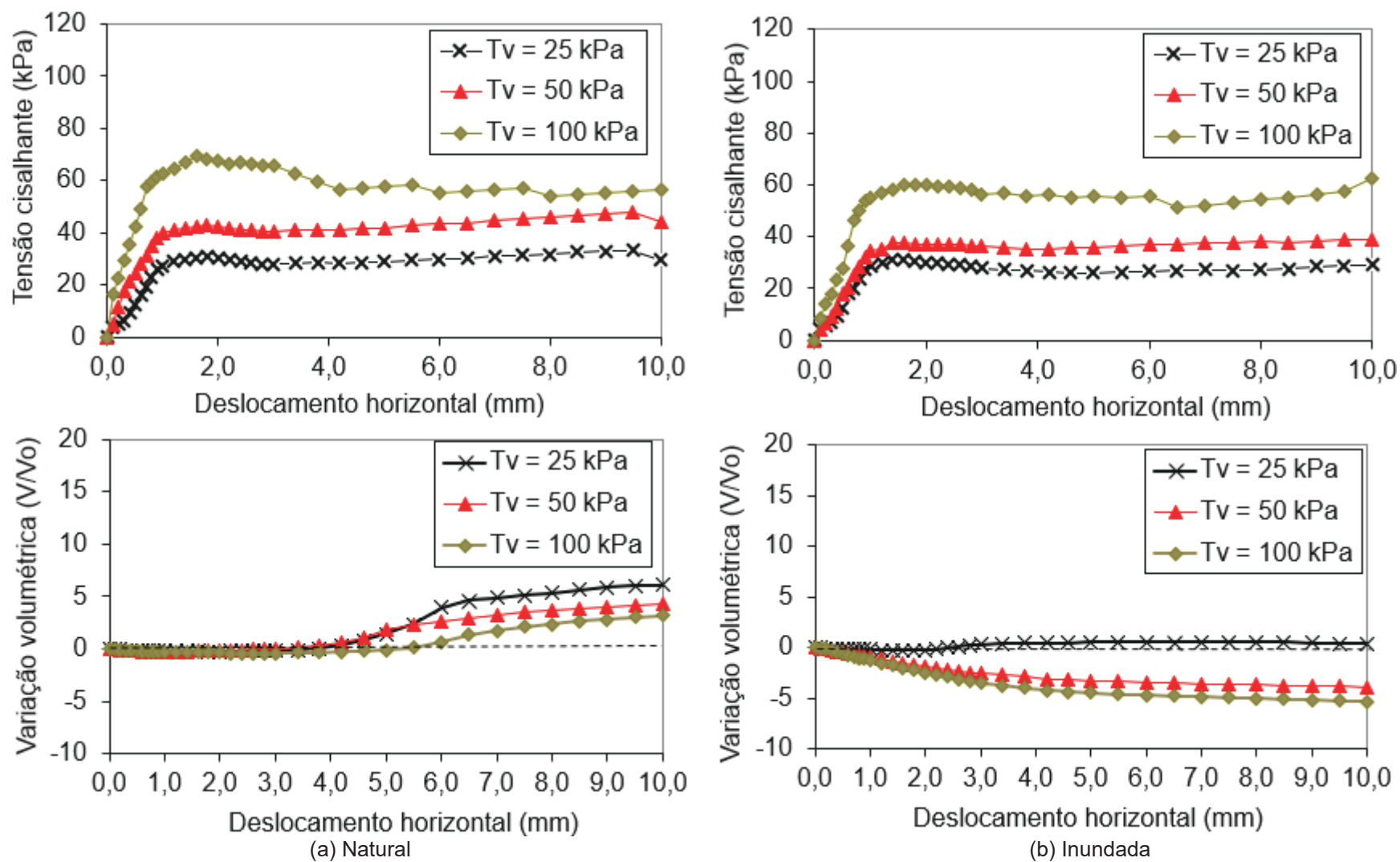
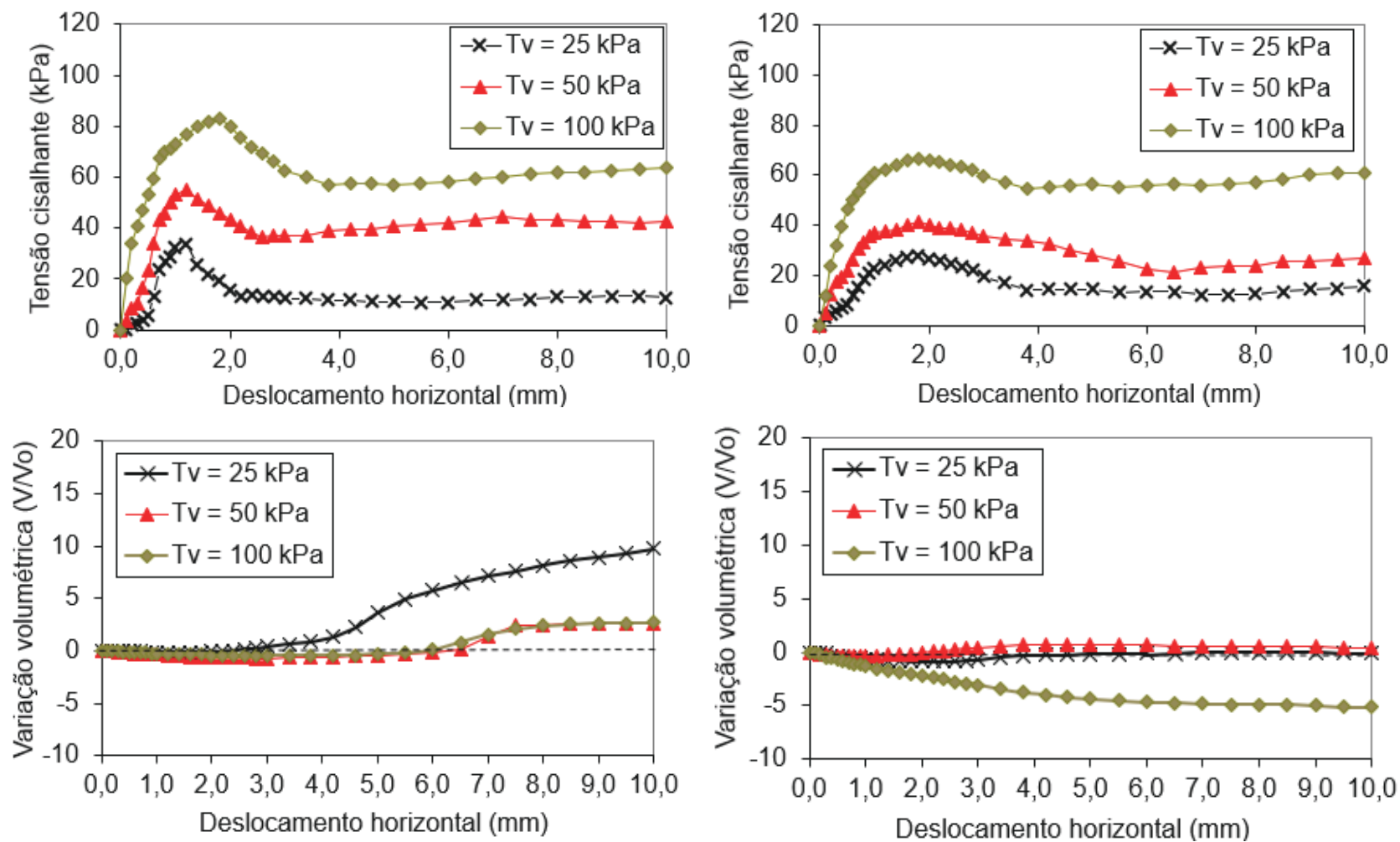


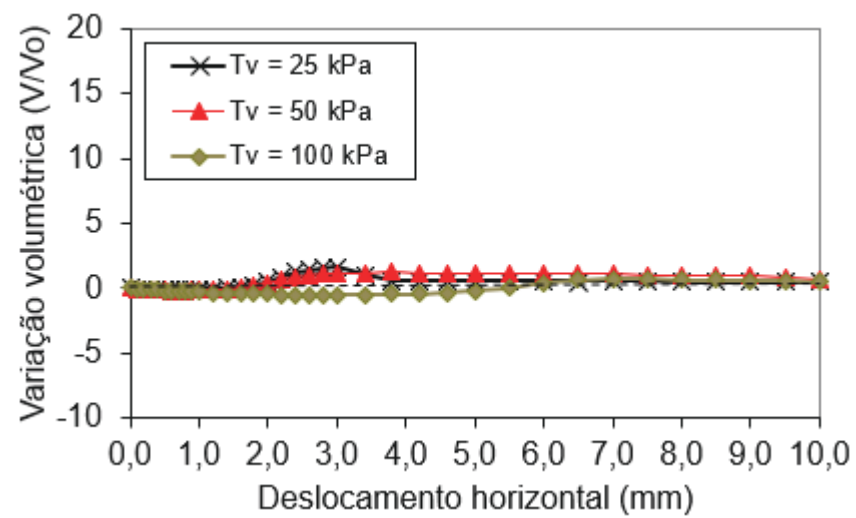
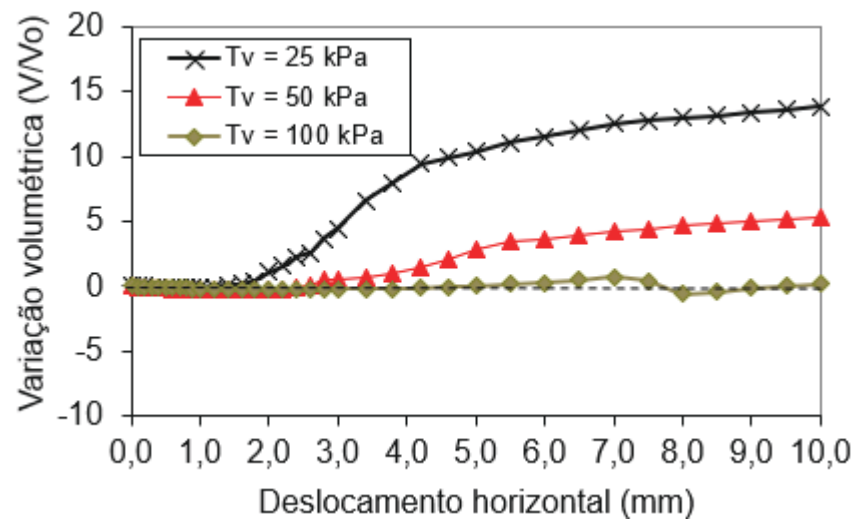
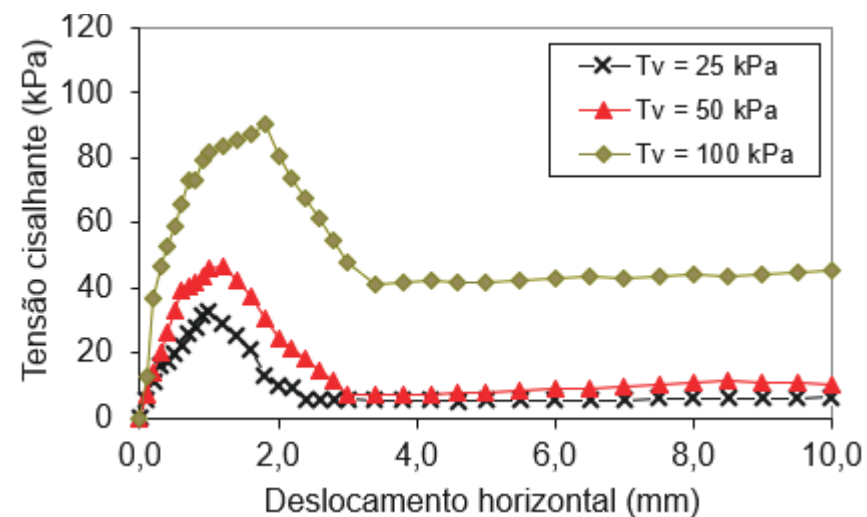
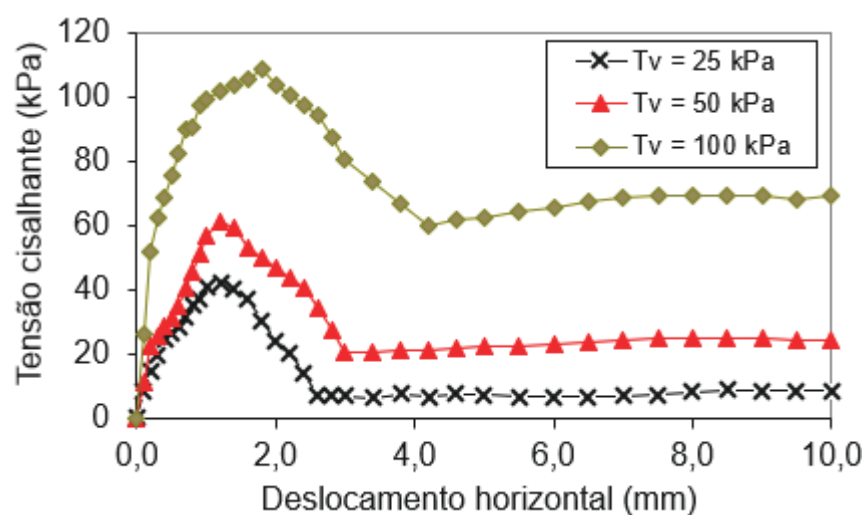
Figura 42 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento e variação volumétrica x deslocamento da mistura 70% Solo + 30% LETA (a) natural e (b) inundada.



(a) Natural

(b) Inundada

Figura 43 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento e variação volumétrica x deslocamento da mistura 50% Solo + 50% LETA (a) natural e (b) inundada.



(a) Natural

(b) Inundada

- Ainda, com relação a curva de variação volumétrica, na condição inundada o solo apresentou variação volumétrica somente de compressão. A mistura 85% Solo + 15% LETA apresentou variação volumétrica de compressão seguida de um pequeno aumento de volume para menor tensão aplicada (25 kPa) e para as maiores tensões (50 kPa e 100 kPa) ocorreu somente compressão das amostras. A mistura 70% Solo + 30% LETA apresentou variação volumétrica de compressão para maior tensão (100 kPa) e uma pequena dilatação para menores tensões aplicadas (25 kPa e 50 kPa). A mistura 50% Solo + 50% LETA apresentou pequenas variações de compressão e dilatação ao decorrer do ensaio;

- Para todos materiais em estudo, na condição inundada, houve uma redução da tensão de cisalhamento máxima para todos os níveis de tensões aplicados nos ensaios (25 kPa, 50 kPa e 100 kPa), se comparada a condição natural.

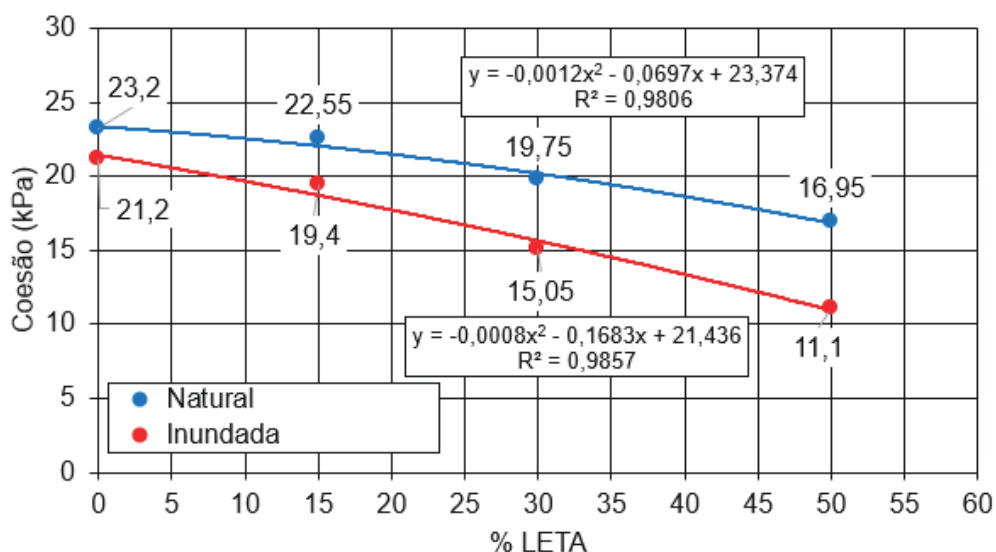
Após a compilação dos dados, foi montada a Tabela 17, a qual apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto com os valores de coesão e ângulo de atrito interno, nas condições natural (umidade ótima) e inundada, dos materiais em estudo. Também, para complementar, são apresentadas as Figuras 44 e 45 que apresentam a variação da coesão com a porcentagem de LETA e do ângulo de atrito com a porcentagem de LETA, respectivamente.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas em estudo.

Mistura	Condição	c (kPa)	ϕ (°)
Solo	NAT	23,20	24,18
	IN	21,20	22,08
85% Solo + 15% LETA	NAT	22,55	25,36
	IN	19,40	22,89
70% Solo + 30% LETA	NAT	19,75	32,74
	IN	15,05	27,28
50% Solo + 50% LETA	NAT	16,95	41,97
	IN	11,10	37,95

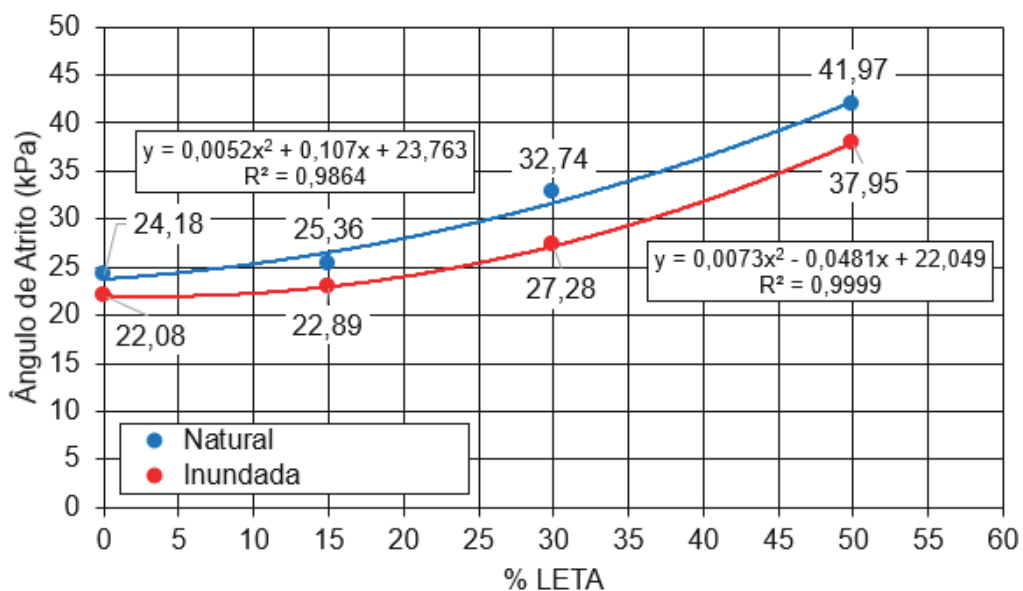
c: coesão; ϕ : ângulo de atrito interno; NAT: natural (umidade ótima); IN: inundada.

Figura 44 – Coesão *versus* porcentagem de LETA para o ensaio de cisalhamento direto das misturas em estudo.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2020).

Figura 45 – Ângulo de atrito *versus* porcentagem de LETA para o ensaio de cisalhamento direto das misturas em estudo.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2020).

Ao analisar a Tabela 17 – e Figuras 44 e 45 - nota-se, primeiramente, que em todos materiais estudados os valores de ângulo de atrito interno e coesão reduziram para as amostras ensaiadas na condição inundada. Esse fato era evidente ao verificar

a redução da tensão cisalhante para esta condição, isso acontece em função da saturação no processo de ruptura, ocorrendo perda de tensão por sucção.

Pela Tabela 17 – e Figuras 44 e 45 - também observa-se a redução no valor de coesão conforme se incrementa LETA ao solo, ou seja, quanto maior a quantidade de LETA, menor a coesão do material. Em consequência, pela distinta característica do LETA, conforme se aumenta a porcentagem de lodo no solo, aumenta-se o ângulo de atrito interno do material. Tanto na condição natural (umidade ótima) como na inundada o maior valor de coesão foi para o solo (23,20 kPa para condição natural e 21,20 kPa para condição inundada) e o maior valor de ângulo de atrito interno foi para a mistura 50% Solo + 50% LETA (41,97° para condição natural e 37,95° para condição inundada).

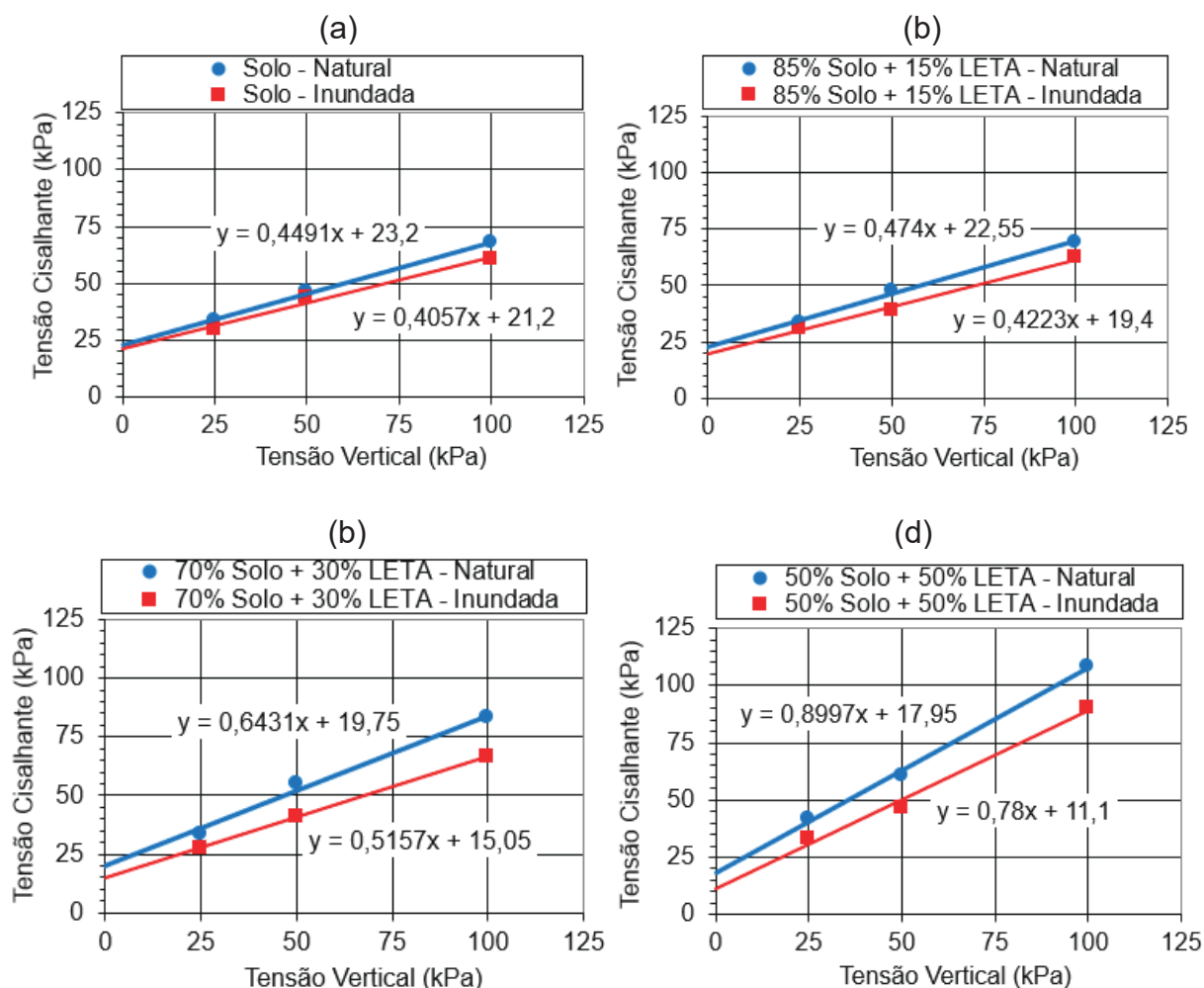
Destaca-se que neste capítulo não serão aprofundadas as análises e discussões da resistência ao cisalhamento, sendo melhor explorada no item 4.8.2 (ensaio de compressão triaxial) desta pesquisa.

Por fim, a Figura 46 apresenta as envoltórias de ruptura obtidas nos ensaios de cisalhamento direto (CD), para todas misturas em estudo, nas condições natural (umidade ótima) e inundada.

Ao analisar as Figuras 44, 45 e 46 – nota-se que para um mesmo valor de tensão normal, a tensão de cisalhamento é maior para os ensaios na condição natural (umidade ótima), se comparado ao ensaio na condição inundada. Conforme já comentado esse comportamento era esperado, pois com o decréscimo da umidade há um aumento da sucção, acarretando um ganho de resistência nos materiais ensaiados na condição natural.

Nessa mesma ideia, ao analisar a influência da sucção nos materiais, pode-se fazer uma comparação entre os ensaios de cisalhamento direto e de sucção (curva característica). Ao analisar as Figuras 44, 45 e 46, em paralelo com os resultados apresentados na Tabela 17, há uma maior diferença entre as envoltórias (e entre os resultados de coesão e ângulo de atrito interno) conforme se aumenta a porcentagem de LETA no solo. Isso, indica que a maior sucção tende a ocorrer na mistura 50% Solo + 50% LETA e a menor sucção no solo natural. Esse fato vai ao encontro dos resultados de sucção, já apresentados no item 4.6 desta pesquisa.

Figura 46 – Envoltória de ruptura de cisalhamento, pelo ensaio de cisalhamento direto, para (a) o solo, misturas (b) 85% Solo + 15% LETA, (c) 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2019).

4.8.2. Ensaio de compressão triaxial – CD (Consolidado Drenado)

O ensaio de compressão triaxial seguiu os procedimentos detalhados na metodologia. Inicialmente, na Tabela 18 são apresentados os parâmetros de controle de compactação para os CPs moldados para os ensaios de compressão triaxial, para todas misturas em estudo. Os ensaios das misturas 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA, para validação dos resultados do ensaio de compressão triaxial, foram repetidos nas três tensões confinantes ensaiadas, portanto, para estes serão apresentados dois resultados, possibilitando, ao final, obter as médias da coesão efetiva e do ângulo de atrito efetivo dessas misturas.

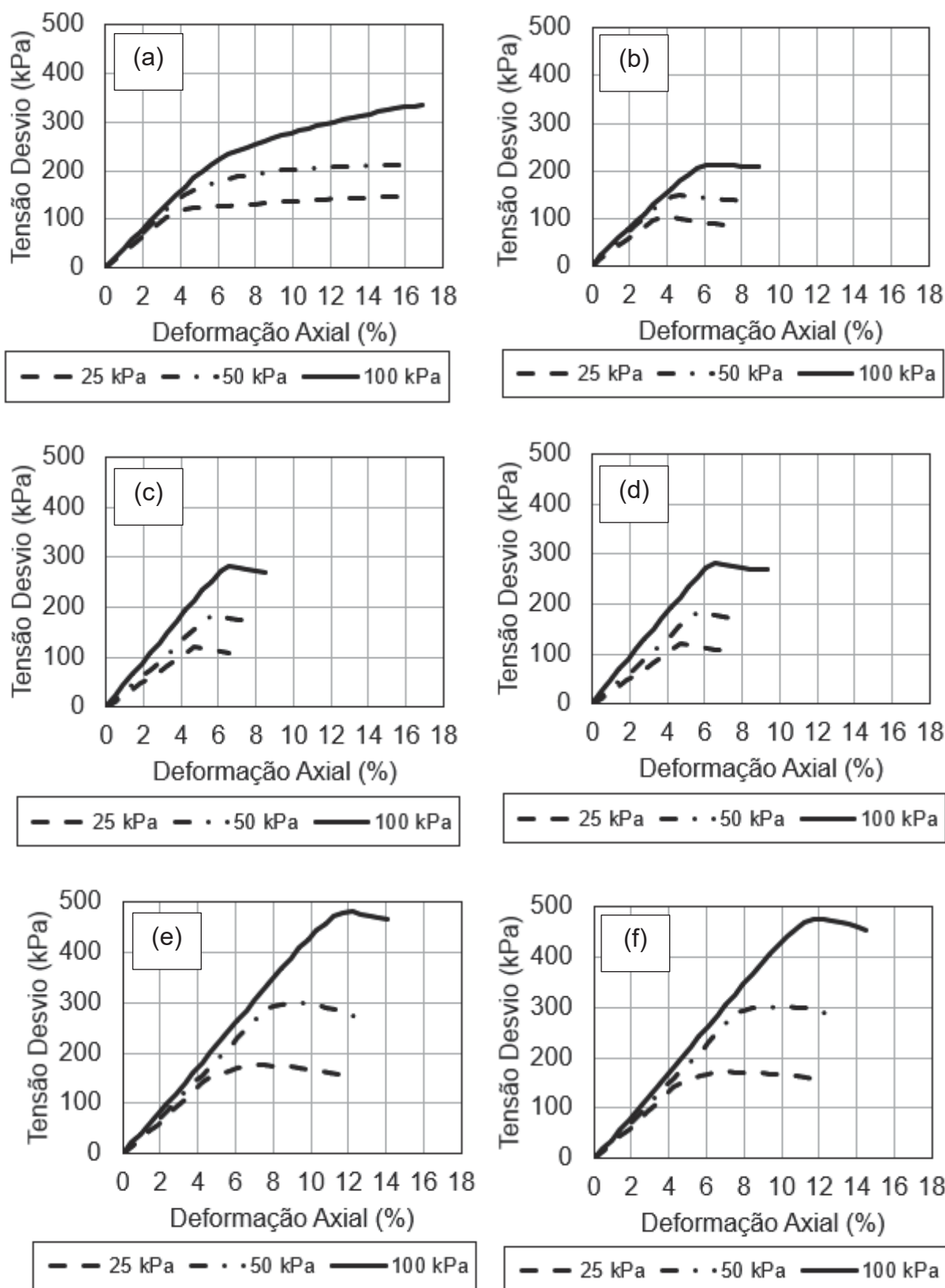
Com a realização dos ensaios foi possível obter, além dos valores de coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo por meio da trajetória de tensões e da envoltória de ruptura, outros resultados que também serão aqui apresentados e discutidos. A Figura 47 apresenta as curvas tensão-deformação para as misturas em estudo, para as pressões de confinamento de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa. Já na Figura 48 são apresentadas as curvas tensão-deformação normalizadas. Em ambas Figuras (47 e 48) o gráfico (c) se refere ao ensaio 1 da mistura 70% Solo + 30% LETA e o gráfico (d) ao ensaio 2 da mistura 70% Solo + 30% LETA. Da mesma forma, os gráficos (e) e (f) se referem aos ensaios 1 e 2, respectivamente, da mistura 50% Solo + 50% LETA.

Tabela 18 – Parâmetros de compactação para os ensaios de compressão triaxial para as misturas em estudo.

Mistura	Amostra	γ_d (kN/m ³)	w (%)	GC (%)	E
Solo	AM01 (25 kPa)	13,56	37,40	98,15	0,99
	AM02 (50 kPa)	13,92	37,25	100,71	0,94
	AM03 (100 kPa)	13,73	38,14	99,35	0,97
85% Solo + 15% LETA	AM01 (25 kPa)	12,88	39,00	98,90	1,04
	AM02 (50 kPa)	12,89	38,82	99,03	1,04
	AM03 (100 kPa)	12,92	39,06	99,21	1,03
70% Solo + 30% LETA	AM01 (25 kPa)	12,01	43,20	98,58	1,01
	AM02 (50 kPa)	12,06	43,77	99,04	1,00
	AM03 (100 kPa)	12,10	43,51	99,36	0,99
	AM04 (25 kPa)	12,25	43,71	100,57	0,97
	AM05 (50 kPa)	12,04	43,59	98,85	1,00
	AM06 (100 kPa)	12,12	43,18	99,51	0,99
50% Solo + 50% LETA	AM01 (25 kPa)	11,60	47,52	99,12	0,98
	AM02 (50 kPa)	11,49	47,79	98,21	1,00
	AM03 (100 kPa)	11,49	47,57	98,20	1,00
	AM04 (25 kPa)	11,68	47,85	99,83	0,97
	AM05 (50 kPa)	11,80	47,88	100,85	0,95
	AM06 (100 kPa)	11,55	47,65	98,72	0,99

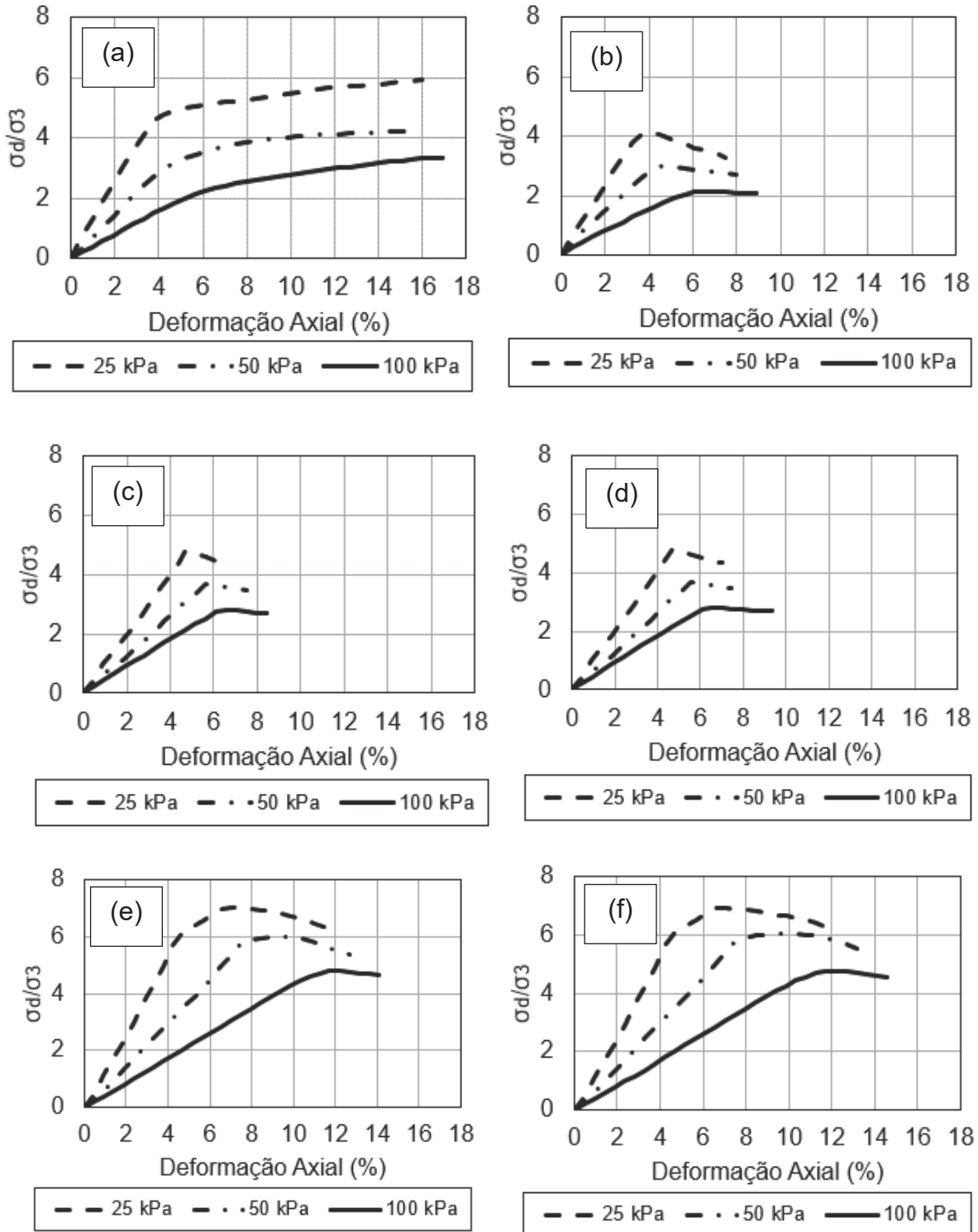
w: umidade; γ_d : peso específico aparente seco; GC: grau de compactação; e: índice de vazios; AM01, AM02 e AM03: ensaio 1; AM04, AM05 e AM06: ensaio 2.

Figura 47 – Curvas tensão-deformação das misturas (a) 100% solo, (b) 85% Solo + 15% LETA, (c) e (d) 70% Solo + 30% LETA, (e) e (f) 50% Solo + 50% LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2020).

Figura 48 – Curvas tensão-deformação normalizadas das misturas (a) 100% solo, (b) 85% Solo + 15% LETA, (c) e (d) 70% Solo + 30% LETA, (e) e (f) 50% Solo + 50% LETA.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2020).

Ao analisar as Figuras 47 e 48, para todas misturas em estudo, é possível fazer as seguintes considerações:

- Os valores apresentados para tensão de ruptura seguem a proporcionalidade da tensão de confinamento, ou seja, quanto maior essa tensão, maior é a resistência do conjunto. Além disso, é importante destacar que o solo apresentou ruptura por deformação, ou seja, ruptura plástica. Já, as misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA apresentaram ruptura por cisalhamento, com superfície de ruptura bem definida (ruptura frágil);

- A ruptura plástica apresentada pelo solo é característica de solo argiloso normalmente adensado, ou também de argila de consistência plástica. Já, o comportamento frente à ruptura das misturas solo+LETA, que apresentaram pico de ruptura definido, são características de materiais compactados, como uma argila sobreadensada (rija à dura) ou uma areia compacta. A forma de ruptura dos materiais compostos por solo e LETA podem ser atribuídas a uma maior proximidade das partículas, devido, possivelmente, a inclusão do lodo de estação de tratamento de água. Nestes casos, para determinação das envoltórias, se obtém a resistência de pico;

- Para o solo em estudo os dados da curva tensão-deformação foram apresentados para deformação de em torno 15% de cada CP, que se refere ao limite do ensaio. No entanto, nessa situação – ruptura por deformação ou ruptura plástica – utilizou-se dos conceitos apresentados por De Campos e Carrillo (1995) para determinação da envoltória. Os autores destacam que quando a curva tensão-deformação não apresenta pico, ou seja, a tensão desviadora continua a aumentar com o crescimento das deformações, deve-se estabelecer um critério para obtenção das tensões de ruptura. Nesse caso, os autores sugerem uma condição limite, sendo a ruptura assumida quando a curva tensão-deformação passa a ter uma inclinação constante, ou ainda, quando há mudança na inclinação da curva. Portanto, para o solo, foi utilizado o critério da mudança de inclinação da curva para obtenção da tensão de ruptura e posterior determinação das envoltórias;

- Com relação as curvas tensão-deformação normalizadas – especificamente relacionado a Figura 48 - pode-se verificar a tendência de comportamento semelhante das curvas nas 3 tensões confinantes aplicadas (25 kPa, 50 kPa e 100 kPa), em todos materiais estudados. Nota-se que as tensões desviadoras são proporcionais às tensões confinantes, de forma que as ordenadas indicam as tensões desviadoras

divididas pela tensão confinante. Esse tipo de representação é denominado gráfico normalizado. Percebe-se, que nesse tipo de gráfico, as curvas se invertem, ou seja, para uma menor tensão confinante há um valor maior da razão entre a tensão desvio e a tensão confinante. Essa situação é comumente encontrada na literatura, podendo se destacar o estudo de Lemos (2019), onde em ensaios triaxiais a autora identificou o mesmo comportamento apresentado nesta pesquisa;

- A repetição dos ensaios, em todas tensões confinantes, para as misturas 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA, validaram os resultados do equipamento, visto a proximidade dos resultados obtidos.

Por fim, a partir das tensões de ruptura obtidas nos ensaios triaxiais de resistência ao cisalhamento foi possível traçar as trajetórias de tensões e envoltórias de resistência de cada material estudado. Nas Figuras 49, 50, 51 e 52 são apresentadas as trajetórias de tensões e a envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ para as misturas em estudo, bem como os diagramas de tensão normal \times tensão cisalhante das misturas em estudo.

Em específico, na Figura 51 os gráficos (a) e (b) se referem ao ensaio 1 e os gráficos (c) e (d) se referem ao ensaio 2 da mistura 70% Solo + 30% LETA. Da mesma forma, os gráficos (a) e (b) da Figura 52 se referem ao ensaio 1 e os gráficos (c) e (d) do ensaio 2 da mistura 50% Solo + 50% LETA.

Ainda, a Tabela 19 apresenta a compilação de todos os resultados encontrados a partir da trajetória de tensões no diagrama $q \times p'$ e do diagrama de tensão normal \times tensão cisalhante.

Figura 49 – (a) Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ e (b) diagrama tensão normal \times tensão cisalhante e envoltória de ruptura para o solo.

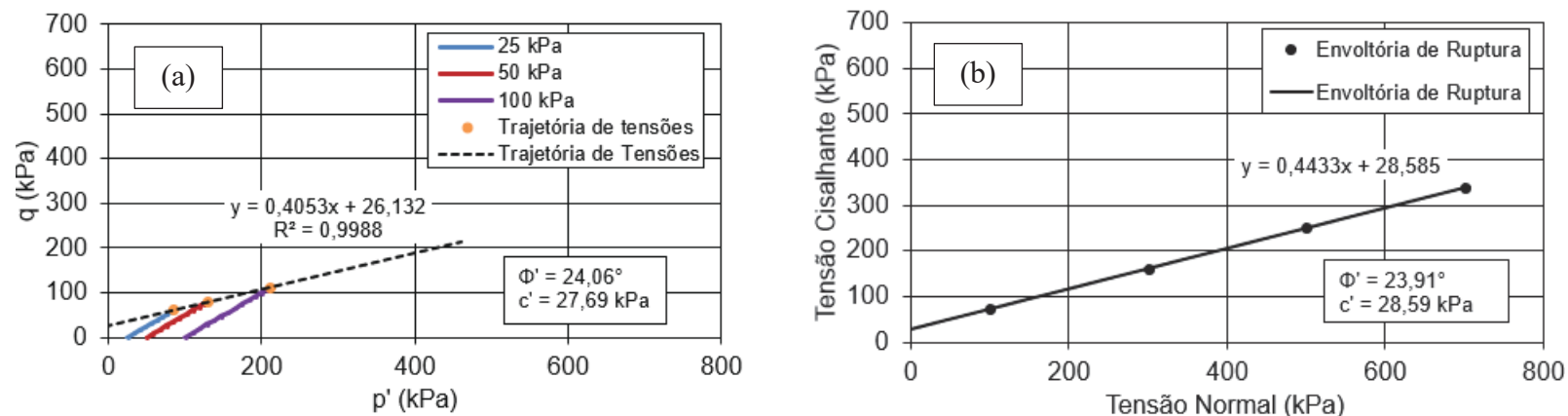


Figura 50 – (a) Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ e (b) diagrama tensão normal \times tensão cisalhante e envoltória de ruptura para a mistura 85% Solo + 15% LETA.

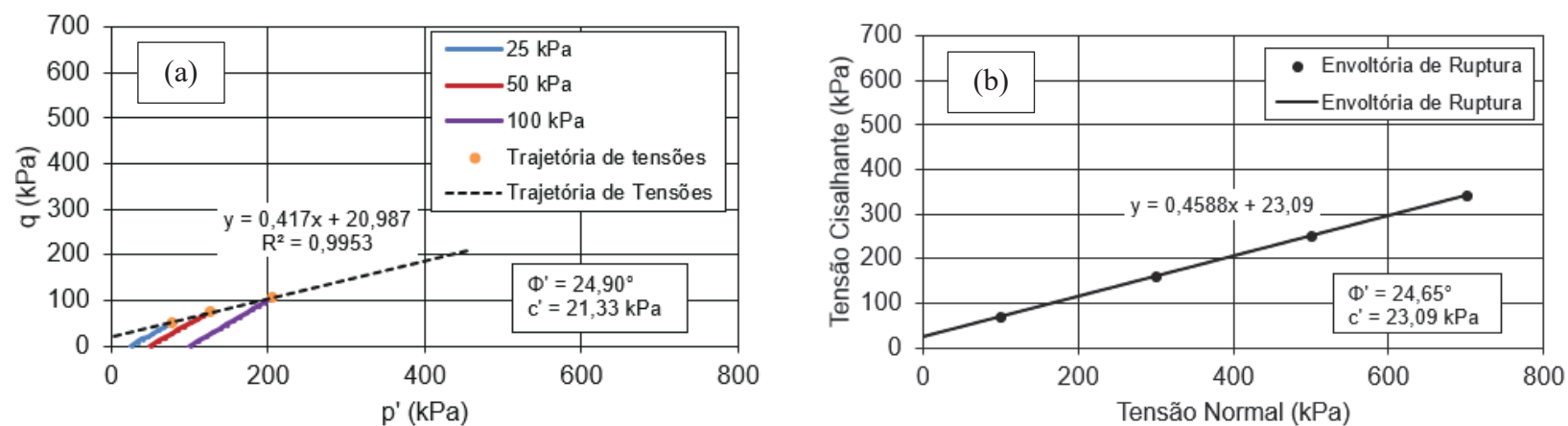


Figura 51 – (a) e (c) Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ e (b) e (d) diagrama tensão normal \times tensão cisalhante e envoltória de ruptura para a mistura 70% Solo + 30% LETA.

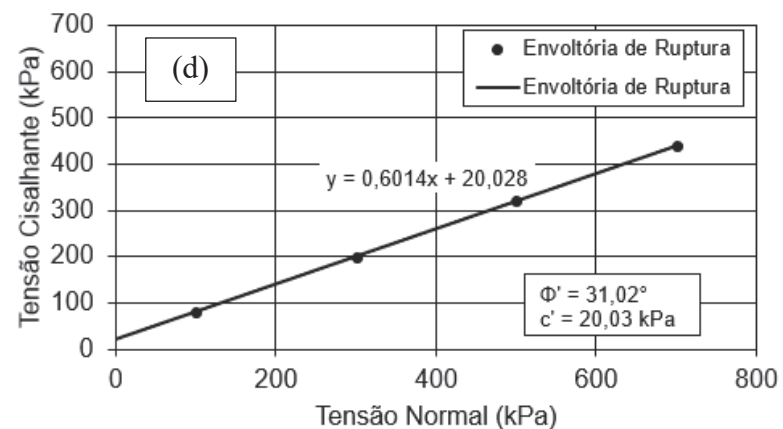
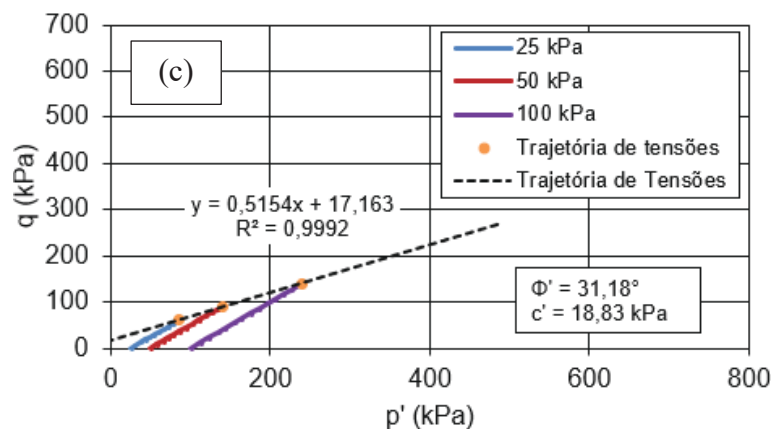
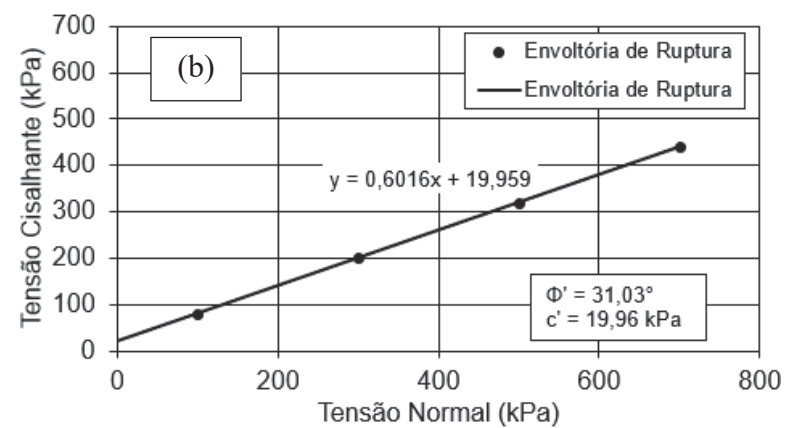
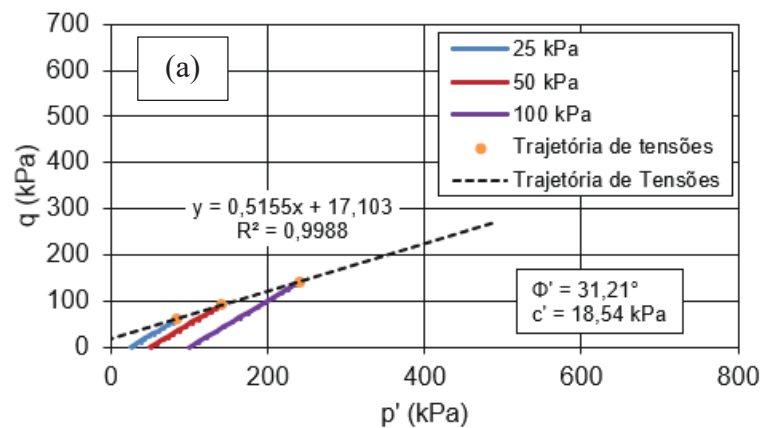


Figura 52 – (a) e (c) Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento no diagrama $q \times p'$ e (b) e (d) diagrama tensão normal \times tensão cisalhante e envoltória de ruptura para a mistura 50% Solo + 50% LETA.

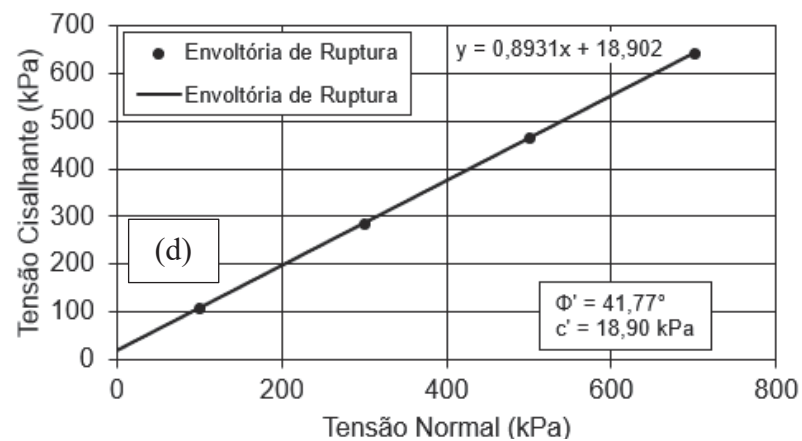
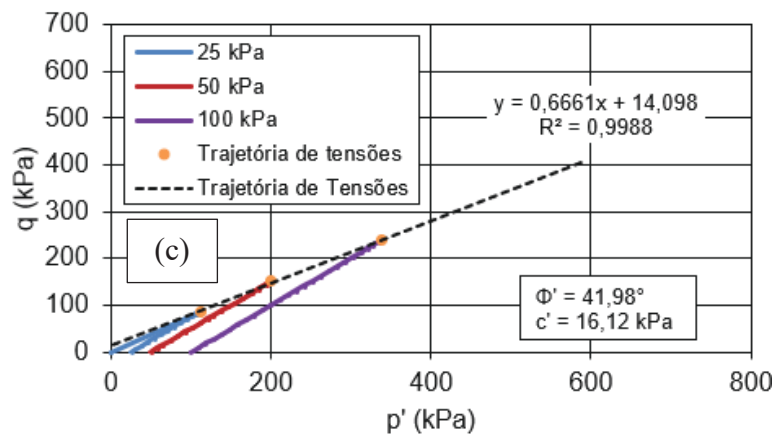
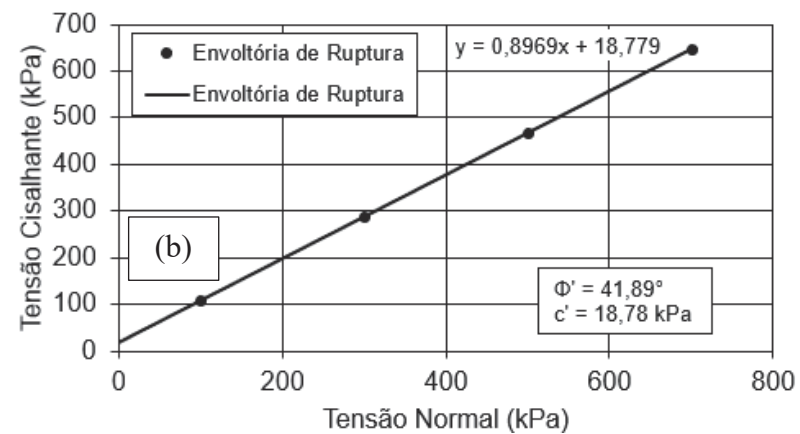
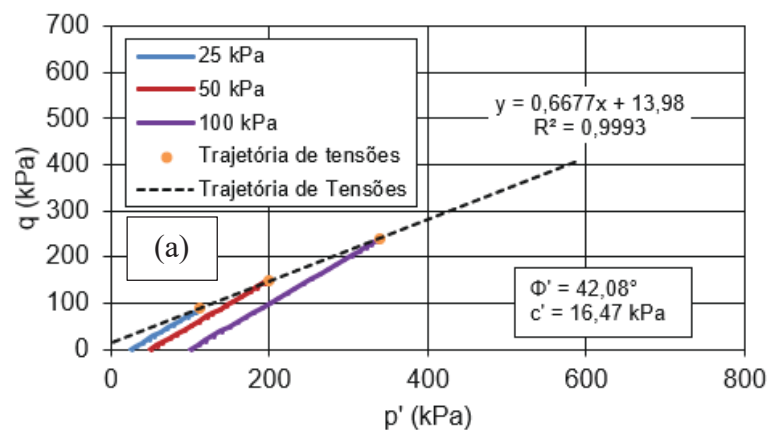


Tabela 19 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensão efetiva para as misturas em estudo.

Mistura	Ensaio n°	Trajetória de Tensões			Envoltória de Ruptura	
		c' (kPa)	ϕ' (°)	R ²	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo	1	27,69	24,06	0,9988	28,59	23,91
85% Solo + 15% LETA	1	21,33	24,90	0,9953	23,09	24,65
	1	18,54	31,21	0,9988	19,96	31,03
70% Solo + 30% LETA	2	18,83	31,18	0,9992	20,03	31,02
	Média	18,69	31,20	-	20,00	31,03
50% Solo + 50% LETA	1	16,47	42,08	0,9993	18,78	41,89
	2	16,12	41,98	0,9988	18,90	41,77
	Média	16,30	42,03	-	18,84	41,83

c': coesão efetiva; ϕ' : ângulo de atrito interno efetivo.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2020).

Pela Tabela 19 é possível fazer as seguintes considerações, com relação a resistência ao cisalhamento obtida pela trajetória de tensões por meio do diagrama q x p' :

- Ao comparar os ensaios de compressão triaxial e de cisalhamento direto, embora apresentem princípios diferentes, os resultados foram próximos, com pequena variação entre as duas metodologias, dando credibilidade aos ensaios realizados e os resultados obtidos na pesquisa. Pela proximidade dos resultados, uma análise mais aprofundada, bem como a discussão dos resultados de resistência ao cisalhamento, será feita ao longo desse capítulo;

- Os parâmetros de resistência ao cisalhamento definidos por meio da trajetória de tensões do diagrama p x q' são consistentes com os resultados obtidos através da envoltória de ruptura do diagrama tensão normal x tensão cisalhante, indicando uma boa qualidade dos mesmos, pela proximidade dos valores;

- O resultado de resistência ao cisalhamento encontrado para o solo é característico do material. O solo é argiloso-siltoso (com fração de areia fina) no ensaio com defloculante e siltoso-arenoso (com areia fina) no ensaio sem defloculante. As frações de silte e areia não o caracterizam como um solo argiloso puro, portanto, fazem com que além de um valor de coesão efetiva característico de uma argila média, também apresente um valor de ângulo de atrito efetivo característico de areias e siltes. Portanto, os valores de c' igual a 27,69 kPa e Φ' igual a 24,06° são justificados pelas frações de argila, silte e areia presentes no material;

- O maior ângulo de atrito efetivo foi encontrado para a mistura com 50% Solo + 50% LETA (42,03°). As misturas de 85% Solo + 15% LETA e 70% Solo + 30% LETA apresentaram ângulo de atrito efetivo de 24,90° e 31,20°, respectivamente. Esses valores são maiores do que o encontrado para o solo ($\Phi' = 24,06^\circ$), portanto, a inclusão de LETA no solo propiciou o aumento do ângulo de atrito efetivo, sendo maior quanto maior a quantidade de LETA incorporado. Este fato pode ser creditado ao LETA, visto a característica distinta do material;

- Com relação a coesão efetiva, todas as misturas com LETA apresentaram redução no parâmetro se comparado ao solo. O solo apresentou c' de 27,69 kPa, enquanto as misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA apresentaram coesão efetiva de 21,33 kPa, 18,69 kPa e 16,30 kPa, respectivamente;

- A redução da coesão efetiva e o aumento do ângulo de atrito efetivo, conforme se adiciona LETA ao solo, fazem com que as misturas tenham característica de solos arenosos-siltosos, em termos de resistência ao cisalhamento, se comparada ao solo. Mas, mesmo assim, é importante destacar que todas as misturas apresentam também parcela de coesão efetiva na resistência ao cisalhamento;

- O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo, melhor ele se ajusta à amostra. Portanto, é possível observar que os valores de R^2 de todas as misturas em estudo foram maiores que 0,99, se aproximando muito de 1, o que demonstra a qualidade e credibilidade dos resultados;

- Os gráficos de variação volumétrica não foram gerados e apresentados, para os ensaios triaxiais, pois no ensaio de forma manual, sem fazer adaptações, não se

teve precisão suficiente para realizar as leituras na bureta do equipamento, não sendo possível a verificação da variação volumétrica do CP. Mas pode-se ter uma estimativa desse variação pelos resultados apresentados no ensaio de cisalhamento direto.

Também, é possível comparar os resultados de resistência ao cisalhamento com outros estudos. Os resultados encontrados para o solo na condição indeformada e coletados na profundidade de 3,0 m, de acordo com o certificado de ensaio n° 111099-2 (UFSM, 2017c), realizado no Laboratório de Geotecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), apresentaram valores de coesão efetiva entre 1,0 e 4,0 kPa e ângulo de atrito efetivo entre 28,1° e 33,0°. O resultado de ângulo de atrito efetivo obtido neste estudo para o solo compactado vai ao encontro do resultado obtido para o solo coletado na profundidade de 3,0 m. Por outro lado, os valores de coesão efetiva divergem, o que pode se dar pelo baixo peso específico aparente seco máximo do material indeformado (já apresentado anteriormente).

Montalvan (2016) realizou ensaios de compressão triaxial em misturas solo+LETA, nas proporções 3:1, 4:1 e 5:1 (solo:LETA). O autor identificou que nas amostras de solo+LETA, se comparadas ao solo, há uma tendência de aumento do ângulo de atrito efetivo e redução na coesão efetiva. O solo estudado pelo autor apresentou ângulo de atrito de 34° e coesão de 22 kPa, enquanto para as misturas solo+LETA os valores de coesão efetiva variaram entre 10 kPa e 17 kPa, e o ângulo de atrito efetivo variou de 34° a 37°. A mesma tendência, de redução da coesão efetiva e aumento do ângulo de atrito efetivo foi identificada nesta pesquisa, justificando os resultados encontrados.

Outro estudo que pode ser comparado é o de Wang et al. (1992). Os autores avaliaram a resistência ao cisalhamento de diferentes LETAs, encontrando valores de coesão efetiva entre 6,9 e 8,3 kPa e ângulo de atrito efetivo entre 42 e 44°. O'Kelly e Quille (2008) e O'Kelly e Quille (2010) também aplicaram estudos de resistência ao cisalhamento para diferentes LETAs e obtiveram coesão efetiva igual a 0 kPa e ângulo de atrito efetivo variando entre 39 e 44°. Portanto, o LETA tende a apresentar baixa (ou nenhuma) coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo elevado. Se adicionado a um solo, o LETA tende a reduzir a coesão efetiva e aumentar o ângulo de atrito efetivo do material, fato ocorrido nesta pesquisa.

4.9. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DAS MISTURAS EM CAMADAS DE ATERRO SANITÁRIO

Neste item buscou-se fazer uma análise da aplicação dos materiais em estudo em camadas de aterros sanitários. Para isso, fez-se uma compilação dos requisitos – obrigatórios de normas e desejáveis apontados por outras pesquisas – já apresentados na revisão da literatura. Então, pelas condições impostas, foi realizado um *check list* para verificar a possibilidade de aplicação de cada um dos materiais.

Para facilitar essa análise os requisitos identificados na literatura foram compilados em um Quadro (24). Neste estão apresentados os requisitos de normativas e também os requisitos mais críticos de outras pesquisas, além da verificação de aplicação de cada um dos materiais em aterros sanitários.

Antes da análise do Quadro 24 cabe destacar que as normativas citadas, bem como as pesquisas analisadas, não apresentam requisitos de resistência ao cisalhamento, resistência à compressão simples e de sucção para as camadas de aterros sanitários. No entanto, esses parâmetros serão analisados em conjunto a análise dos requisitos apresentados no Quadro 24.

Com relação ao Quadro 24 podem ser feitas as seguintes considerações:

- O solo em estudo apresentou bom desempenho frente aos parâmetros analisados. O material atendeu requisitos obrigatórios e desejáveis, exceto o coeficiente de permeabilidade imposto pela norma Alemã;
- Com relação aos requisitos obrigatórios das normas citadas, a mistura que apresentou melhor desempenho foi a composta de 85% de Solo + 15% de LETA, atendendo, inclusive, os requisitos mais críticos de coeficiente de permeabilidade. Essa mistura apenas não atende requisitos desejáveis, de PP#200 e da classificação SUCS;
- A mistura composta de 70% de Solo + 30% LETA atende os requisitos obrigatórios das normas apresentadas, exceto o coeficiente de permeabilidade imposto pela norma Alemã. Portanto, frente a permeabilidade, essa mistura apresentou aumento no k, em função da maior inclusão de LETA, se comparado a mistura 85% Solo + 15% LETA;
- Já a mistura com 50% de lodo de ETA não atendeu nenhum dos requisitos obrigatórios em termos de permeabilidade;

Quadro 24 – Verificação dos materiais em estudo para aplicação em camadas de aterros sanitários.

Camada de Cobertura Convencional ou Evapotranspirativa	Parâmetro	Condição para aplicação	Requisito		Material/Verificação da Aplicação			
			O	D	SOLO	85/15	70/30	50/50
	k (NBR) [m/s]	$\leq 5 \times 10^{-7}$	X		SIM	SIM	SIM	NÃO
	k (USEPA) [m/s]	$\leq 10^{-7}$	X		SIM	SIM	SIM	NÃO
	k (Alemã) [m/s]	$\leq 5 \times 10^{-10}$	X		NÃO	SIM	NÃO	NÃO
	PP#200 (USEPA) [%]	≥ 30	X		SIM	SIM	SIM	SIM
	PP#200 [%]	≥ 40		X	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
	LL (USEPA) [%]	≥ 30	X		SIM	SIM	SIM	SIM
	LL [%]	≥ 30		X	SIM	SIM	SIM	SIM
	IP [%]	10 a 50		X	SIM	SIM	SIM	SIM
	SUCS	CL/CH/SC/OH		X	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Camada de Base	Parâmetro	Condição para aplicação	Requisito		Material/Verificação da Aplicação			
			O	D	SOLO	85/15	70/30	50/50
	k (NBR) [m/s]	$\leq 10^{-8}$		X	SIM	SIM	SIM	NÃO
	k (USEPA) [m/s]	$\leq 10^{-9}$	X		SIM	SIM	SIM	NÃO
	k (Alemã) [m/s]	$\leq 10^{-10}$	X		NÃO	SIM	NÃO	NÃO
	k [m/s]	$\leq 10^{-9}$		X	SIM	SIM	SIM	NÃO
	PP#200 [%]	≥ 30		X	SIM	SIM	SIM	SIM
	LL [%]	≥ 30		X	SIM	SIM	SIM	SIM
	IP [%]	≥ 15		X	SIM	SIM	SIM	SIM
	SUCS	CL/CH/SC/OH		X	SIM	NÃO	NÃO	NÃO

O: obrigatório (normativas); D: desejável (pesquisas); SIM: Aplicável; NÃO: Não aplicável; 85/15: 85% Solo + 15% LETA; 70/30: 70% Solo + 30% LETA; 50/50: 50% Solo + 50% LETA; k: coeficiente de permeabilidade; LL: limite de liquidez; IP: Índice de plasticidade.

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2020).

- Com relação à norma brasileira, que somente apresenta requisito de coeficiente de permeabilidade, todos materiais, exceto a mistura 50% Solo + 50% LETA, poderiam ser aplicadas em camadas de base e de coberturas de aterros sanitários. A substituição de 50% de solo por LETA fez com que a mistura se tornasse altamente permeável, impedindo sua aplicação em aterros sanitários.

Ainda, em conjunto com os resultados acima discutidos, bem como os demais obtidos na pesquisa, pode-se fazer as seguintes considerações:

- As análises químicas realizadas nessa pesquisa mostraram que todos os materiais tendem a apresentar caulinita em sua composição, fazendo com que nenhum material tivesse o impedimento da aplicação em camadas de aterros sanitários em função de possíveis problemas de expansibilidade;

- A resistência à compressão simples das misturas solo+LETA apresentaram melhoria se comparadas ao solo. O melhor desempenho neste quesito se deu na mistura 70% Solo + 30% LETA. No entanto, a mistura de 85% Solo + 15% LETA apresentou bom desempenho na RCS e, em conjunto com os requisitos apresentados no Quadro 24, apresenta-se como a mais favorável para aplicação em camadas de base e de cobertura de aterros sanitários;

- Em termos de resistência ao cisalhamento as misturas solo+LETA apresentaram melhoria no ângulo de atrito se comparado ao solo, reduzindo a coesão da mistura. Em conjunto com os requisitos obrigatórios do Quadro 24, a mistura composta de 85% Solo + 15% LETA apresenta-se como mais favorável para aplicação em camadas de aterros sanitários. Essa situação pode ser justificada em função de que este material teve um aumento no ângulo de atrito e teve a menor redução na coesão efetiva, se comparado ao solo, além de ser o material mais impermeável.

- Ao analisar o ensaio de sucção, ou seja, a capacidade do material reter água, em função da quantidade de LETA, a mistura 50% Solo + 50% LETA apresentou melhores resultados, com maior poder de absorção de água. Isso também foi comprovado nos ensaios de cisalhamento direto, nas condições natural (umidade ótima) e inundada. No entanto, a mistura não é passível de utilização em camadas de cobertura e base de aterros sanitários. Em função do conjunto de todos os requisitos obrigatórios, aliados ao ensaio de sucção, a mistura 85% Solo + 15% LETA apresenta melhor desempenho para aplicação como camada evapotranspirativa.

É importante destacar que, fazendo uma análise somente com os requisitos da norma brasileira, o solo e as misturas 85% Solo + 15% LETA e 70% Solo + 30% LETA atendem aos requisitos mínimos da mesma, portanto, sendo passível de utilização em camada de base e cobertura de aterro sanitário. Nesta análise em específico, o material com melhor desempenho é a mistura 70% Solo + 30% LETA, pelos seguintes motivos: atende o coeficiente de permeabilidade; apresenta a maior resistência à compressão simples entre todas as misturas; apresenta melhor desempenho frente a

sucção entre as 3 misturas possíveis de aplicação pela NBR; e apresenta aumento de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito) se comparado ao solo.

Indica-se também o uso dos materiais em estudo como camadas intermediárias (diárias), visto que não há requisitos e recomendações para estas. Autores citados na revisão de literatura indicam a utilização de RCC, compostos orgânicos, LETA e LETE para essas camadas, portanto, a utilização das misturas (principalmente a mistura 50% Solo + 50% LETA) seria benéfica, em função da redução da exploração de recursos naturais (solo) e da redução do passivo ambiental com a utilização de LETA.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo são expostas as principais conclusões obtidas através do programa experimental proposto. Ao final, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados de caracterização clássica da Mecânica dos Solos, o solo foi caracterizado como um material argiloso. Conforme aumenta a substituição do solo por LETA há redução nas frações de silte e argila e, em consequência, um aumento na fração arenosa. Segundo classificação MCT o solo e todas misturas solo+LETA apresentaram comportamento laterítico (LG' e LA'-LG'), com boa capacidade de suporte, baixa expansão e baixa permeabilidade.

O material mais impermeável foi a mistura 85% Solo + 15% LETA com k igual a $7,82E-10$ m/s, seguido da mistura 70% Solo + 30% LETA e do solo. Já, a mistura 50% Solo + 50% LETA apresentou coeficiente de permeabilidade alto ($2,49E-6$ m/s), característico de solo arenoso, em função da alta porcentagem de LETA.

Na resistência ao cisalhamento, com ensaios executados nos equipamentos de cisalhamento direto e de compressão triaxial, foi possível definir que o material com mais finos (solo) apresentou ruptura dúctil, visto que o mesmo rompeu por deformação. Já, as misturas solo+LETA apresentaram ruptura por cisalhamento, se caracterizando como materiais frágeis. O ângulo de atrito aumentou conforme aumentou-se a porcentagem de LETA no solo, reduzindo, assim, a coesão dos materiais. Do solo para mistura 50% Solo + 50% LETA houve uma redução na coesão efetiva de 41,13% e um aumento no ângulo de atrito efetivo de 74,68%.

Em termos gerais definiu-se a mistura composta de 85% Solo + 15% LETA como a melhor para aplicação em camadas de base e cobertura de aterros. Ainda, concluiu-se que a mistura 50% Solo + 50% LETA não é passível de utilização nas camadas de base e topo de aterros sanitários.

No entanto, ressalta-se que a utilização das misturas, em especial a 50% Solo + 50% LETA, em camadas diárias (intermediárias) seria uma alternativa ambientalmente benéfica. Essas aplicações trariam vantagens na destinação do LETA e redução de consumo de recursos naturais (solo).

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar as misturas desta pesquisa em diferentes energias de compactação, normal e modificada;
- Verificar a influência na resistência ao cisalhamento realizando o ensaio consolidado não drenado;
- Utilizar diferentes solos e diferentes porcentagens de LETA a fim de avaliar o comportamento de diferentes misturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHOU, T.; LANGONI, G.; TAWFIC, K. **Assessment of alternative earthen final covers for Florida landfills**. State University System of Florida. 2003. 107 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3080/2011**. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of ASTM Standards, 2011.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residual**. New York, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12770**: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13600**: Solo coesivo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13896**: Aterro de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14545**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9604**: Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Problemática dos metais nos resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água. **Anais...** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa: ABES, 2001.

BASIM, S. C. **Physical and geotechnical characterization of water treatment plant residuals**. Doctor Thesis – New Jersey Institute of Technology. New Jersey. 104 p., 1999.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 357**: dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 17 mar. 2005.

CARNEIRO, C. et al. **Caracterização do Lodo de ETA gerado no Estado do Paraná**. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estações de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas. Curitiba: SANEPAR, p. 131-178, 2013.

CASTÃO, E. S. et al. Reuso do lodo de estação de tratamento de água (E.T.A.) na fabricação de tijolos cerâmicos. In: Congresso ABES FENASAN 2017. **Anais...** São Paulo/SP, 2017.

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

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. 316 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2008.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Resíduos sólidos industriais**. 2. Ed. São Paulo, SP. 1993. 233 p.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO (CORSAN). **Relatório da Administração - 2017**. Estado do Rio Grande do Sul, 2017.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO (CORSAN). **Relatório de Gestão – PNQS - 2010**. Estado do Rio Grande do Sul, 2011.

CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs**. In: REALI, M. A. P. (Ed.). Noções gerais de tratamento e disposição final

de lodos de estações de tratamento de água. 1ª Ed. Rio de Janeiro, RJ, ABES, p. 1-19, 1999.

CORDEIRO, J. S. **Processamento de lodos de estações de tratamento de águas (ETAs)**. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). Aproveitamento de lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos. Curitiba: PROSAB, p. 121-144, 2001.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos**. 2015. 144 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2015.

DANIEL, D. E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Boston, MA: Springer US, 1993.

DECAGON DEVICES. **Operator's manual version 1.3 WP4-T DEWPOINTMETER**. Pullman, 2000. 70p.

DE CAMPOS, T. M. P; CARRILLO, C. W. **Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro**. Alonso & Delage eds, Unsaturated Soils. Balkema Publishers. ISBN 90 5410 583 6. 1 st. International Conference on Unsaturated Soils – Paris – Vol. 1. pp. 31 – 38. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 228/94**: Solos compactados com equipamento miniatura. Rio de Janeiro, RJ, DNER, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 256/94**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, RJ, DNER, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 258/94**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, RJ, DNER, 1994c.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. Ed 2. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos, SP, LDiBe, 2012.

DOURADO-NETO, D. et al. **Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00)**. Scientia Agrícola, vol. 57, n.1, p. 191-192, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Embrapa solos. 3ª ed. Revisada e ampliada, Brasília, DF, 2017. 10 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos: 4ª aproximação**. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 169 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos. 2ª ed**, Rio de Janeiro, RJ, 2006. 306 p.

FERRARI, A. A. P. **Viabilidade da utilização de silte compactado como material de impermeabilização em aterros de resíduos**. 2005. 118 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2005.

FERREIRA FILHO, S. S.; WAELKENS, B. E. **Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.14, n.3, p. 317-326, 2009.

FIGUEIREDO, F. F.; NUVOLARI, A. Uso do lodo de estação de tratamento de água na fabricação de tijolos cerâmicos maciços. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. **Anais...** Costão do Santinho, Florianópolis/SC. 2004.

FOURIE, A.B.; MOONSAMMY, M. **Store and release covers for landfills in semi-arid climates**. Unsaturated Soils, Recife, PE. 2002, p. 823-826.

FREDLUND, D. G. **Recent research on the soil-water characteristic curve and its application in engineering**. University of Saskatchewan, Saskatoon, Sack, Canadá, 1996.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de saneamento**. 3 ed. revisada. Brasília/DF: Funasa, 2006.

GASTALDINI, A. L. G. et al. **The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition**. Construction and Building Materials. N° 94. p. 513 – 520. 2015.

GONÇALVES, F. et al. **Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário**. Revista DAE, SABESP, São Paulo, SP. 2017.

GOOGLE EARTH – MAPAS. Disponível em: <<http://mapas.google.com>>. Acesso em: fev. 2019.

GRANATO, T. C. Biosolids land application by the metropolitan water reclamation district of greater Chicago: an overview of the program, its benefits, and environmental impacts. In: Simpósio Interamericano de Biossólidos...**Anais...**Campinas, SP, 2010.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JÚNIOR, A. D. Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de água. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...**Natal, RN, ABES, v.2, p. 324-341, 1993.

GUNEY, Y. et al. **Utilization of sepiolite materials as a bottom liner material in solid waste landfills**. Waste Management, v34, p. 112-124, 2014.

HARRASSOWITZ, H. **Laterit**. Material und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung – Fortschritte der Geologie und Paläontologie. Berlin. 1926. In: OLIVEIRA, E. P. Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica. 2006. 197 p.

HOPPEN, C. et al. **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental**. Revista Cerâmica. v. 51, n. 3018, p. 85-95, 2005.

HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria Development for Water Treatment Plant Residual Monofills**. American Water Works Association, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ, 2001.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Manual de gerenciamento integrado**. Lixo Municipal: 2. Ed. São Paulo. 2000. 29 p.

IZZO, R. L. S.; MAHLER, C. F.; ROSE, L. **Barreira capilar construída com resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. V. 18, n. 4, 2013, p. 303-312.

JANUÁRIO, G. F. **Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos de estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo**. 2005. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 2005.

KAWAI, M. et al. **Biodegradability and methane productivity during anaerobic co-digestion of refractory leachate**. International Biodeterioration & Biodegradation. v72, pag. 46-51, 2012.

KEHRIG, A. G. **As relações k_i e k_r no solo**. Boletim do Instituto de Química Agrícola. n° 13. Rio de Janeiro: IQA. 1949. 67 p.

KIZINIEVIC, O.; ZURAUŠKIENE, R.; KIZINIEVIC, V.; ZURAUŠKAS, R. **Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products**. In: Construction and Building Materials, v. 41, p. 464–473, April, 2013.

KNOP, A. **Estudo do comportamento de liners atacados por ácido sulfúrico**. 2007. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2007.

KONDAGESKI, J. H.; CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. **Pesquisas Interdisciplinares e a Estruturação dos Estudos da rede Interinstitucional de**

Pesquisa em Lodo de Água. In: CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estação de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas. Curitiba, Sanepar, 2013. p. 47-66.

LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLOS E TECIDOS VEGETAIS. **Laudos n° 821116:** análise química básica do solo de Giruá/RS. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Frederico Westphalen/RS, 2018.

LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLOS E TECIDOS VEGETAIS. **Laudos n° 821137:** análise química básica do resíduo da Estação de Tratamento de Água de Santa Maria/RS. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Frederico Westphalen/RS, 2018.

LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLOS E TECIDOS VEGETAIS. **Laudos n° 822000:** análise química básica da amostra 50% Solo + 50% LETA. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Frederico Westphalen/RS, 2019.

LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLOS E TECIDOS VEGETAIS. **Laudos n° 822001:** análise química básica da amostra 85% Solo + 15% LETA. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Frederico Westphalen/RS, 2019.

LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLOS E TECIDOS VEGETAIS. **Laudos n° 822002:** análise química básica da amostra 70% Solo + 30% LETA. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Frederico Westphalen/RS, 2019.

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS. **Laudos n°s 24875, 24876, 24879, 24880 e 24881:** ensaio de fluorescência de raio X do solo de Giruá/RS, do LETA de Santa Maria/RS e das misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria/RS, 2019.

LABORATÓRIO DE MATERIAIS CERÂMICOS. **Laudos n° 01:** granulometria a laser do solo de Giruá/RS, do LETA de Santa Maria/RS e das misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre/RS, 2019.

LAMBE, T. S.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics.** New York: John Wiley, 553 p., 1969.

LeBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R. P. **Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management:** moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN – HABITAT), 2008.

LEMOS, M. B. **Ensaio Triaxiais Multi-Estágios em Solo Residual.** 2019. Dissertação (Mestrado) em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo/SP. 185 p. 2019.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. Ed 3. Campinas: Átomo, 2010.

LIN, C-F.; WU, C-H; HO, H-M. **Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials**. Waste Management. N° 26. p. 970-978. 2005.

LOCASTRO, J. K.; DE ANGELIS, B. L. D. **Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. V20, pag. 200-210, 2016.

LUCIANO, S. Y. et al. Trababilidad de los lodos producidos em la potabilización del água. In: XXVI Congresso Intramericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental. Lima, Peru. **Anais...**Lima: AIDIS, 1998.

MAHLER, C, F.; HUSE, K. Estudos da adição de bentonita ao solo de cobertura de aterros sanitários. In: VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2015. **Anais...** CT/UFC, Fortaleza/CE, 2015. p. 339-344.

MARIANO, O. H. M. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. 2008. 232 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2008.

MARTIN, J. F. DOYNE, J. C. **Laterite and lateritic soils in Sierra Leone**, Journal of Agricultural Science. 1927. IN: NOGUEIRA JÚNIOR, J. Lateritas. Boletim Técnico de Geociências. Universidade de São Paulo, SP, 1985, 46 p.

MEDINA, J. **Solos residuais**. Seminários sobre propriedades mecânicas do solo. Instituto Alberto Luiz Coimbra Rio de Janeiro. 1970. In: FUMIÓ, B. L. C. Barragens de terra sobre solos porosos: análise de soluções de drenagem na fundação. Dissertação (Mestrado). Universidade do Rio de Janeiro - Instituto Alberto Luiz Coimbra Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 1982. 90 p.

MELARE, A. V. S. et al. **Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review**. Waste Management, 2017, vol. 59, p. 567-584.

MELO. V. F. et al. **Reserva mineral e caracterização mineralógica de alguns solos do Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, SP, v. 19, p. 159-164, 1995.

MOHAMMED, D. et al. **Synthesis and characterization of drinking water treatment plant sludge-incorporated Portland cement**. J Mater Cycles Waste Manag. N° 20. p. 891-901. 2017.

MONTALVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo de estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP**. 2016. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade

de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, SP, 134 p., 2016.

MONZÓ, J. et al. **Use of saeage sludge ash (SSA)-ciment admixtures in mortars.** Cement and Concrete Research, v. 26, n. 9, p. 1389-1398, 1996.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais. In: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. **Anais...**Foz do Iguaçu, PR. v.4, 1994, pp. 1293-1300.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D.F. Uma nova classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias. **Anais...** Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, v. 1, pp. 30-41, 1981.

NORMA ALEMÃ. **TA siedlungsabfall:** technishe anleitung zur verwertung, behandlung und sonstigen entsorgung von siedlungsabfällen. Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: BAnz. NR. 99^a. 65 seiten. vom 1993.

O'KELLY, B. C. Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporation a coagulant. **Canadian Geotechnical Journal.** v. 455, n. 5, p. 715-725, 2008.

O'KELLY, B. C.; QUILLE, M. E. Compressibility and consolidation of water treatment residues. **Proceedings of the ICE-Waste and Resource Management.** v. 162, n. 2, p. 85-97, 2008.

O'KELLY, B. C.; QUILLE, M. E. Shear strength properties of water treatment residues. **Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering.** v. 163, n. 1, p. 23-35, 2010.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica, v. 50, p. 324 – 330, 2004.

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. Estudo de barreiras capilares por meio de simulação de chuva em coluna de solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., 2007. **Anais...** Salvador/BA.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2012.

PONTES, A. B.; CARVALHO, W. O.; MAZIERO, T. A. **Projeto Águas Novas – Estudo de Caso do Sistema de Reuso de Águas de Lavagem de Filtros e Decantadores e Tratamento de Lodo de Água Juturnaíba.** 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves, RS, 2012.

QASIM, S. R.; CHIANG, W. **Sanitary landfill leachate: generation, control, and treatment.** Lancaster, Pa: Technomic Pubb. Co, 1994.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of a landfill design and construction**. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 2002.

RAMOS, J. R. C. **Avaliações técnico-operacionais em estações de tratamento de água dos municípios das regiões leste e dos lagos do Estado do Rio de Janeiro, com propostas de melhorias para futura implantação de sistema de gestão ambiental baseado nas normas ISO 14.000**. 2008. 204 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2008.

REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamentos de água**. Rio de Janeiro, RJ, ABES, Projeto PROSAB, 250 p., 1999.

REBELO, K. M. W. **Resistência de interface entre geomembranas e solos através do ensaio de Ring Shear**. 2003. 216 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2003.

REGADÍO, M. et al. **Containment and attenuating layers: na affordable strategy that preserves soil and water from landfill pollution**. Waste Management, v46, p. 408-419, 2015.

RICHTER, C. A. **Resíduos das estações de tratamento de água**. Disposição final dos lodos. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: Edgar Blucher LTDA. 2001.

ROCCA, A. C. C.; IACOVONE, A. M. M.; BARROTTI, A. J. **Resíduos sólidos industriais**. 2 ed. São Paulo, SP, CETESB, 1993.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da incorporação do lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento**. Revista Cerâmica n° 59. 2013. pp. 551 – 556.

ROQUE, A. J.; CARVALHO, M. Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material. Proceedings of the 5th International Congress on Environmental Geotechnics. **Anais...**2006.

SANEPAR. **Sistema Corporativo de Controle Industrial**. Foz do Iguaçu, PR. 2014.

SANTOS, E. F.; SCAPIN, J.; PINHEIRO, R. J. B. **Estudo das misturas de solo com adição de lodo de estação de tratamento de água para uso em aterro sanitário**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador, Bahia. 2018.

SANTOS, I. S. et al. Caracterização e identificação do resíduo: lodo de tratamento do município de São Leopoldo. **Anais...**Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental, 27. ABES, 2000.

SCAPIN, J. **Avaliação da utilização de lodo de estação de tratamento de água como material de cobertura e de fundo em aterros sanitários urbanos**. 2020. Tese (Doutorado) em Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, São Maria/RS. 2020. Não publicado.

SILVA JR, A. P.; ISAAC, R. DE L. Adensamento por gravidade de lodo de ETA gerado em decantador convencional e decantador laminar. **Anais...Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental**, 28. FEMISCA, 2002.

SIMON, F. G.; MÜLLER, W. W. **Standard and alternative landfill capping design in Germany**. *Environmental Science & Policy*, Vol. 7, Issue 4, 2004, p. 277-290.

SOLOTEST. **Certificado de Calibração nº 44452-17**: Anel dinamométrico nº série 3542 – Capacidade de 50 kg. Laboratório de Calibração da Solotest. São Paulo/SP, 2017.

SOUZA, M. R. **Estudo do Lodo Gerado na Estação de Tratamento de Água de Buíque-PE: Caracterização, Quantificação e Identificação de Oportunidades de Minimização de Resíduos**. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2009.

SUN, J.; YUEN, S. T. S.; FOURIE, A. B. **The effect of using a geotextile in a monolithic (evapotranspiration) alternative landfill cover on the resulting water balance**. *Waste Management. Journal Homepage*. v. 30, p. 2074-2083, 2010.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MONDÉNES, A. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivos em argila para cerâmica vermelha**. Parte I: Caracterização de lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. *Revista Cerâmica*. V. 57, n. 343, p. 288-293. 2011.

TAVARES, R. G. **Problemas operacionais da indústria da água: consumo excessivo de cloro na linha tronco de distribuição do sistema Gurjaú e lodos gerados pelas 6 maiores estações de tratamento de água da Região Metropolitana do Recife**. 2003. 145 p. Dissertação (Mestrado) - Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2003.

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*, v. 53, n. 4, p. 561-565, out. 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet**. Solid Waste and Emergency Response. EPA 542-F-03-015. Agency (5102G). 2003. Disponível em: <<http://www.epa.gov/tio/download/remed/epa542f03015.pdf>> Acesso em: abr. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Guidance for Design and Installation of Final Covers**. 40 CFR 258.2. 1998.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers**. Office of solid waste and emergency response. EPA-540-R-04-007. Washington DC.: USEPA, 2004. 421 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM). **Certificado de ensaio nº 111099**: ensaios de caracterização. Solo da Companhia Rio Grandense de Valorização de Resíduos. Central de Tratamento de Resíduos de Giruá. Laboratório de Materiais de Construção Civil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria/RS, 2017a.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM). **Certificado de ensaio nº 111099-1**: índices físicos e avaliação do potencial de colapso. Solo da Companhia Rio Grandense de Valorização de Resíduos. Central de Tratamento de Resíduos de Giruá. Laboratório de Materiais de Construção Civil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria/RS, 2017b.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM). **Certificado de ensaio nº 111099-2**: ensaio triaxial CIU. Solo da Companhia Rio Grandense de Valorização de Resíduos. Central de Tratamento de Resíduos de Giruá. Laboratório de Materiais de Construção Civil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria/RS, 2017c.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Cavernas no Rio Grande do Sul**: mapa geomorfológico do Rio Grande do Sul. Disponível em < <http://www.ufrgs.br/paleotocas/RioGrandedoSul.htm>>. Acesso em: ago. 2019.

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

VANDERMYDEN, C.; CORNWELL, D. A. **Nonmechanical Dewatering of Water Plant Residuals**. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 1998.

VAZ COELHO, R. et al. **Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária**. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil. Vol. 10, Nº 2, p. 11-22, 2015.

VIEIRA, A. M. **Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos**. 2005. 287 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

VILLIBOR, D. F; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo, Arte & Ciência, 2009.

WANG, M. C. et al. **Engineering behavior of water treatment sludge**. Journal of Environmental Engineering. v. 118, n. 6, p. 8448-864, 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. *Geo-Frontiers 2011. Advances in Geotechnical Engineering. Anais...ASCE*, 2011.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. **Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics.** *Journal of Cleaner Production*. N° 96. p. 282-289. 2015.

XIA, Z. **Geotechnical characterization of water treatment plant residuais.** Master Dissertation. New Jersey Institute of Technology. New Jersey, 88 p., 1994.

ZHANG, W.; SUN, C. **Parametric analyses of evapotranspiration landfill covers in humid region.** *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Journal Homepage*. v. 6, p. 356-365, 2014.

ZORNBERG, J. G.; LAFOUNTAIN, L.; CALDWEL, J. A. **Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003. V. 129, n.6, p. 427 – 438.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL (EQUIPAMENTO WILLE GEOTECHNIK DO LMCC DA UFSM)

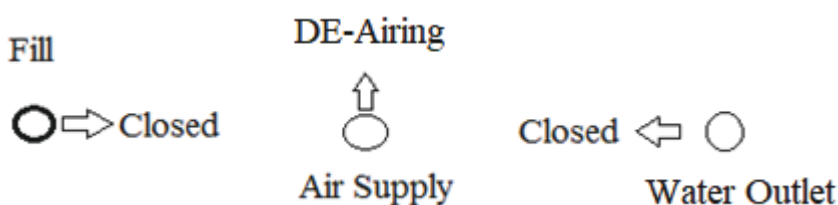
A1. Procedimentos de moldagem do corpo de prova (CP)

- Para amostra indeformada: usar berço metálico e torno até obter uma amostra de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.
- Determinar umidade com as raspas da moldagem (duas ou três cápsulas).
- Nos pequenos vazios superficiais do CP completar com solo remoldado.
- Para amostra deformada: usar molde tripartido, compactando a amostra em três camadas, as quais deverão ser escarificadas nas interfaces.
- Após moldagem, deve-se pesar a amostra e obter no mínimo 3 medidas espaçadas de altura e 3 medidas de diâmetro em diferentes quadrantes.

A2. Procedimentos para encher o “DE-AERADOR”

- Conectar mangueira do “FILL” no encanamento hidráulico instalado na sala do laboratório (o sistema puxa água destilada de um reservatório localizado na sala de estudos do LMCC, sendo que este deverá estar sempre abastecido).
- Girar a válvula do meio para “DE-AIRING” para aplicação de vácuo, conforme esquema mostrado na Figura A1.

Figura A1 – Posição das válvulas no “DE-AERADOR” para aplicação do vácuo.



- Dar em “ON”, no botão verde.
- Abrir válvula do encanamento hidráulico.
- Esperar o manômetro de vácuo estabilizar próximo a 0,8 bar.
- Girar a válvula da esquerda para indicação “FILL”. Neste momento, começa o abastecimento do “DE-AERADOR”.

- Deixar o nível da água do reservatório no mínimo na metade de sua capacidade. No entanto, cuidar para que não fique muito cheio (deixar aproximadamente 10 cm de folga).
- Após encher o reservatório desligar o botão verde, virar a válvula da esquerda para “CLOSED” e a válvula do meio para “AIR SUPPLY” (esse procedimento deve ser realizado para não ficar vácuo no sistema do “DE-AERADOR”). A Figura A2 mostra a posição das válvulas do “DE-AERADOR” após o enchimento do mesmo.

Figura A2 – Posição das válvulas do “DE-AERADOR” após processo de enchimento do mesmo.



- Para fins explicativos, a Figura A3 mostra as mangueiras de entrada e saída de água do “DE-AERADOR”.

Figura A3 – Conexões de entrada e saída de água do “DE-AERADOR”.



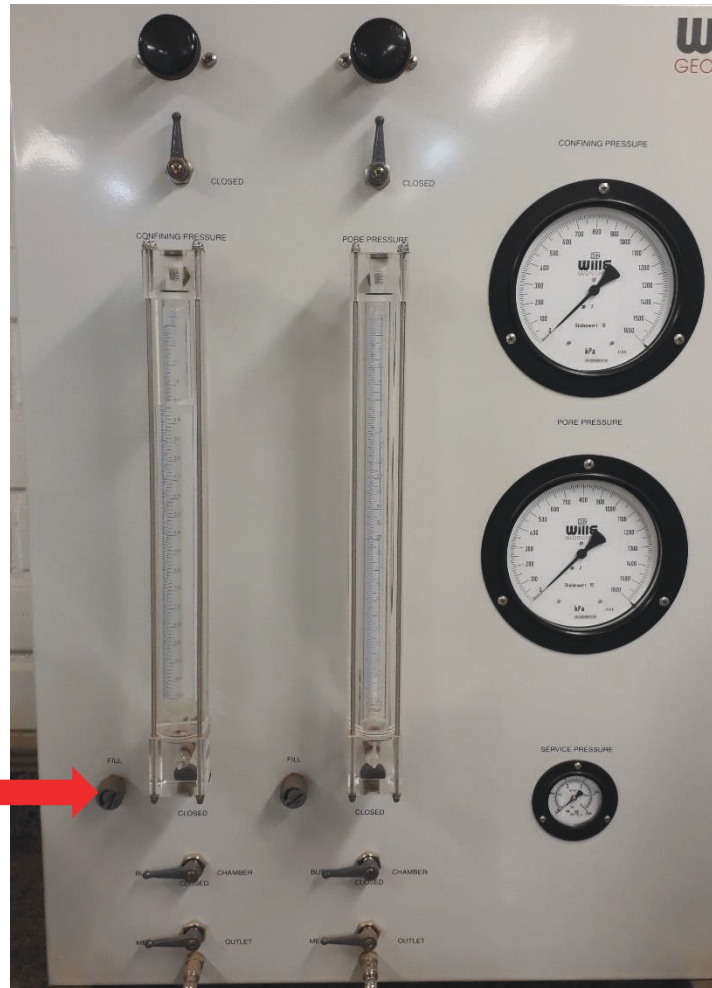
A3. Procedimento para encher a bureta do hidro-pneumático

- Atenção! A bureta que deverá ser abastecida com água é a bureta correspondente a tensão confinante. A bureta correspondente a poropressão não é abastecida com água, pois a mesma é somente para passagem de ar.
- Conectar a mangueira “Water Outlet” do “DE-AERADOR” na conexão “Water Supply” do hidro-pneumático (Figura A4).
- Abrir a válvula de liberação de água do DE-AERADOR (Water Outlet) e abrir a válvula do controle de vazão da bureta da tensão confinante (FILL) para que comece o abastecimento. Não encher totalmente a bureta, deixar uma folga de uns 10 mm aproximadamente e fechar novamente a válvula do controle de vazão (Figura A5).

Figura A4 – Indicação do local (Water Supply) de conexão da mangueira no hidro-pneumático para enchimento da bureta.



Figura A5 – Indicação da válvula de controle de vazão no hidro-pneumático.

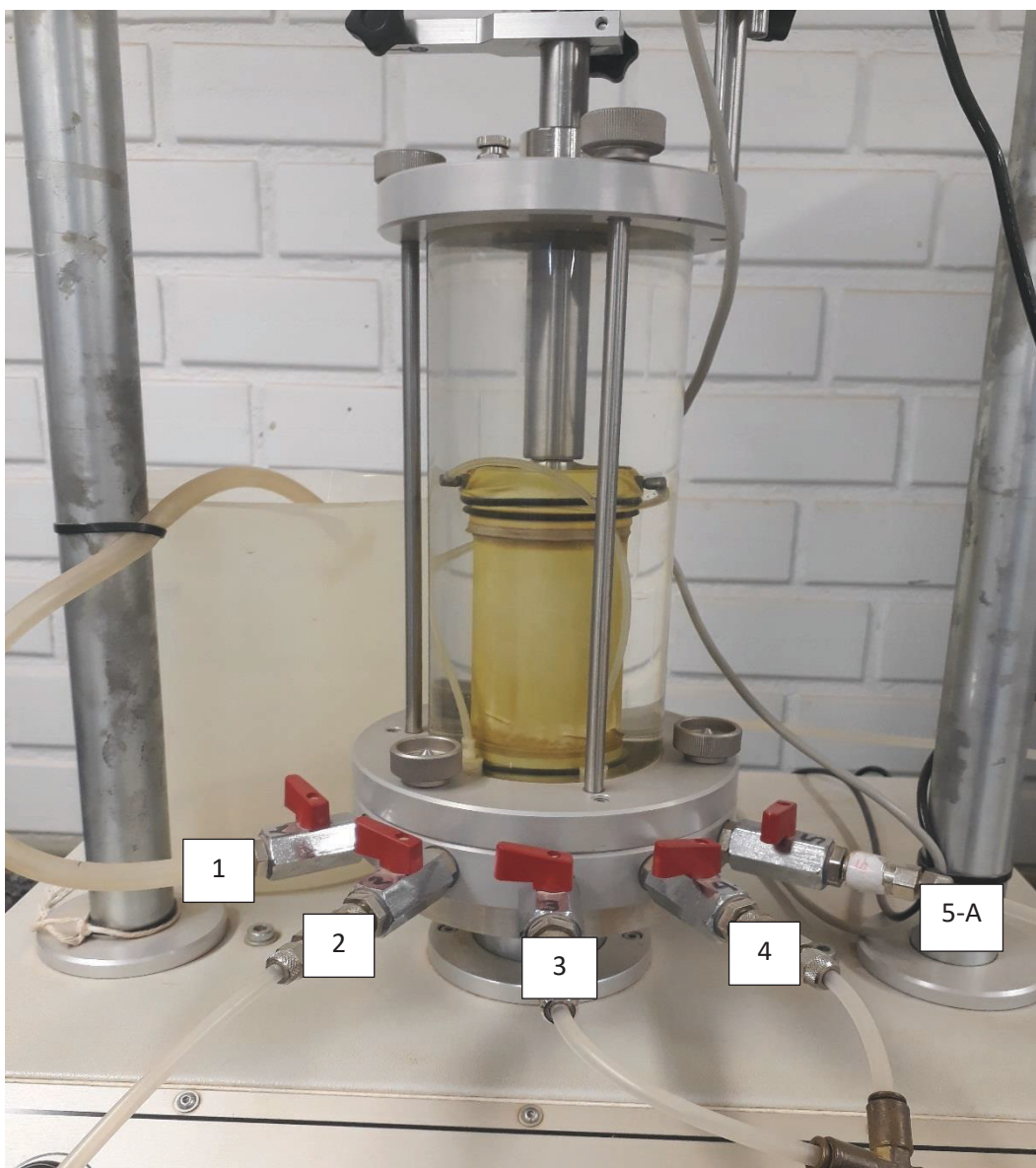


- Fechar a válvula de liberação de água do “DE-AERADOR” e desconectar a mangueira.

A4. Procedimento de instalação da amostra na prensa triaxial

- A partir desse processo é importante o conhecimento da nomenclatura da câmara, a qual é demonstrada nas Figuras A6 e A7.

Figura A6 – Elementos na parte frontal da câmara.



- Nas Figuras A6 e A7 os elementos da câmara são assim denominados:

- 1 – Saída de água do topo.
- 2 – Aplicação da tensão confinante.
- 3 – Poropressão da base.
- 4 – Poropressão do topo.
- 5a e 5b – Ligação com o transdutor de pressão para medição da tensão confinante.
- 6 – Ligação com a poropressão.
- 7 – Transdutor de pressão (mede a poropressão e a tensão confinante).

Figura A7 – Elementos na parte traseira da câmara.



- Antes de instalar a amostra na prensa, deve-se tirar o “o-ring” que fica na base, onde é ajustada a campânula. Deve-se lavar o “o-ring” para retirada de possíveis partículas de solo que possam ter migrado durante ensaios anteriores. Esse processo é realizado para evitar um possível vazamento de água da câmara durante ensaio.
- Saturar com água destilada os orifícios da base onde a amostra será instalada (Figuras A8 e A9). Durante o processo deverão estar abertas as válvulas 5a, 5b, 6 e o registro do transdutor de pressão.

Figura A8 – Identificação dos orifícios da base onde será instalada a amostra.

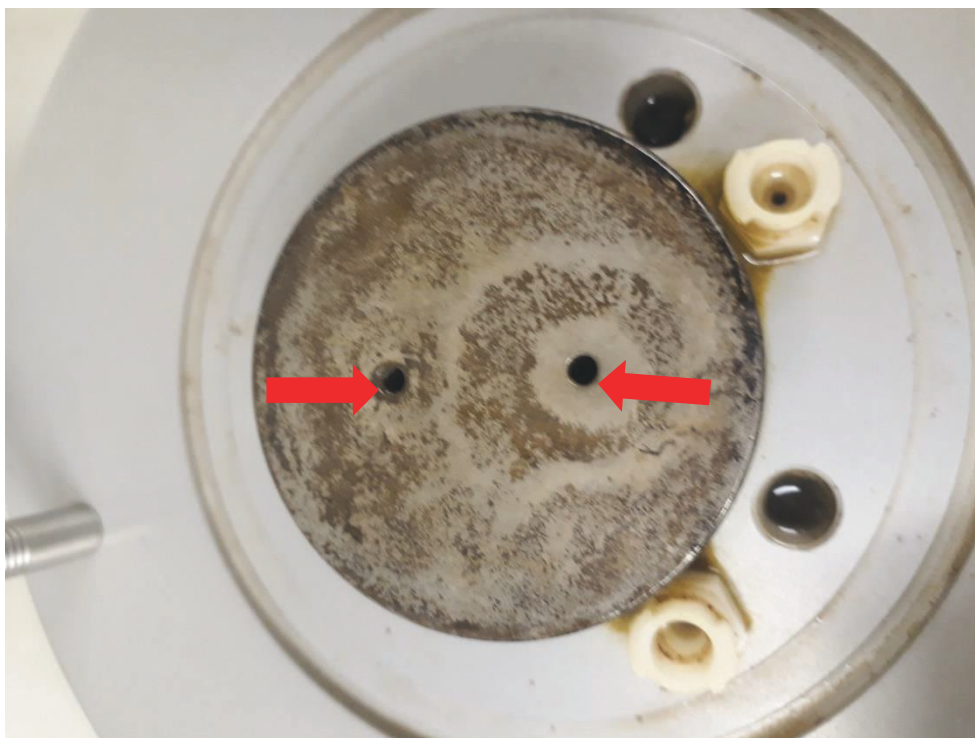
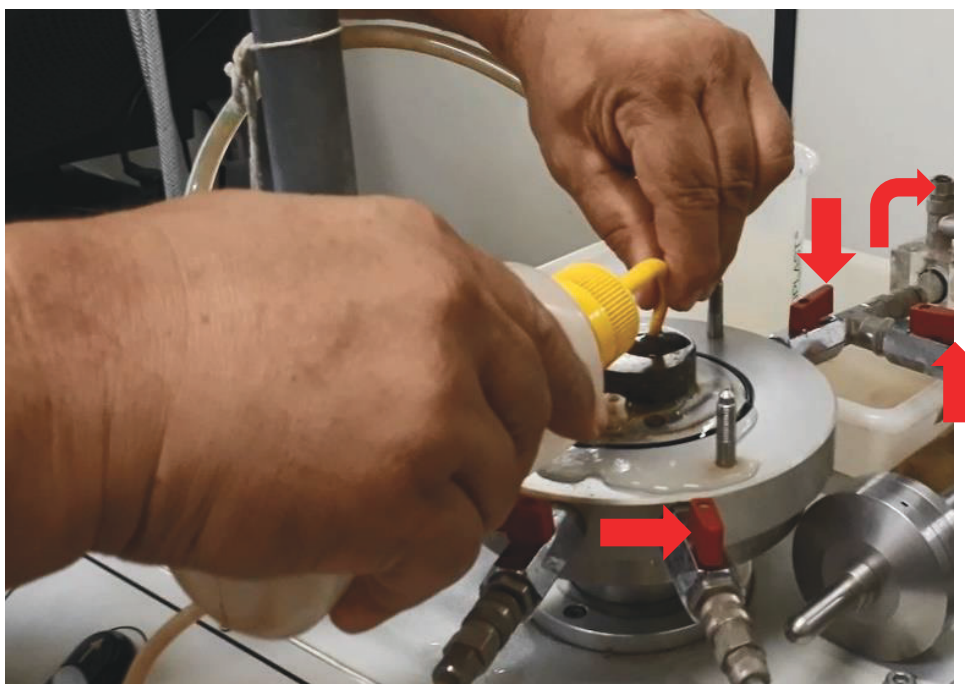
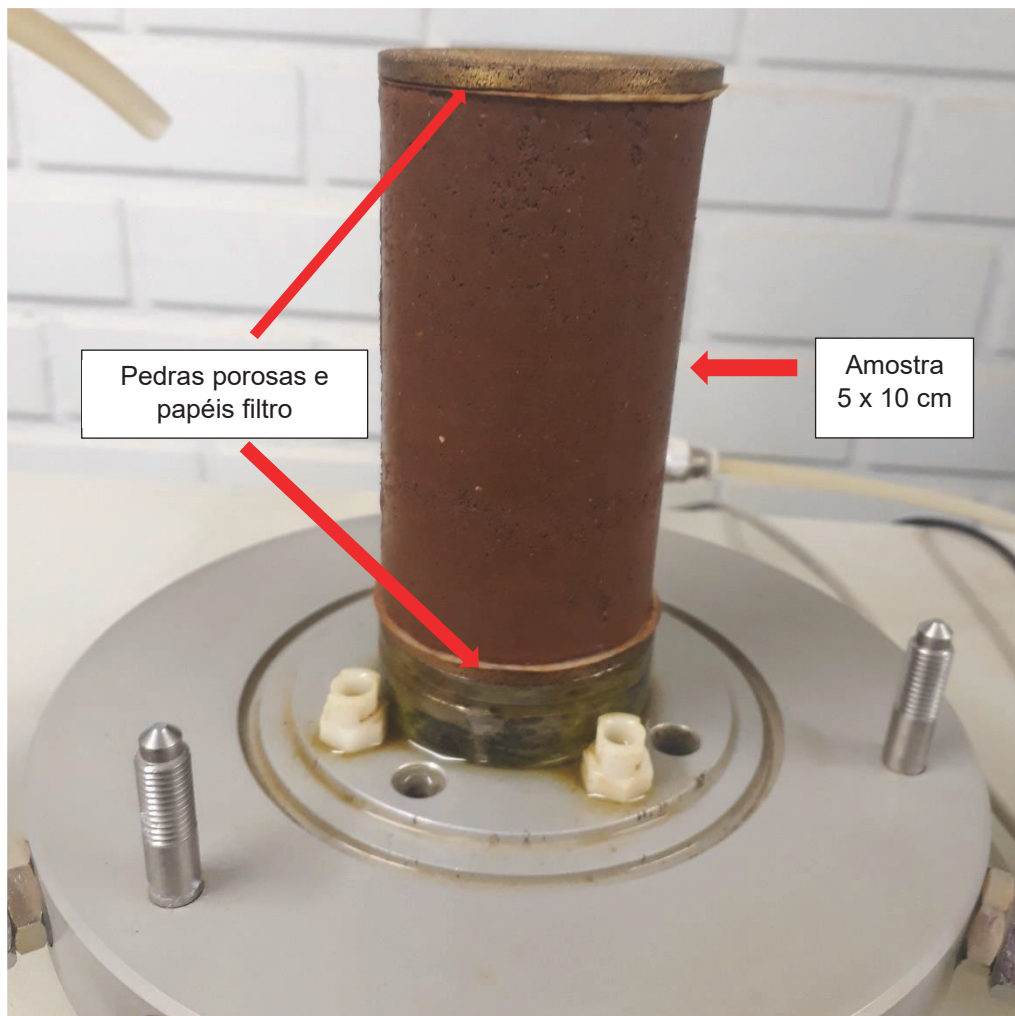


Figura A9 – Saturação dos orifícios da base onde será instalada a amostra e demonstração da posição das válvulas.



- Após a saturação dos orifícios, fechar as válvulas e o registro do transdutor.
- Secar com pano o excesso de água que ficar na base da câmara e recolocar o “o-ring” (secá-lo se estiver molhado).
- Colocar uma pedra porosa na base (as pedras porosas devem ser saturadas previamente por 24 hs imersas em água destilada ou, ainda, fervidas em água por 10 minutos). **OBS.:** Na instalação das pedras porosas, a parte plana, ou seja, de menor granulometria, deve ficar voltada para a amostra. A razão disso se dá pois se alguma partícula de solo migrar para a pedra, ela não ficará retida na mesma.
- Colocar o papel filtro. Este deverá ser saturado previamente em água destilada (a água livre presente no mesmo deve ser removida). Instalar a amostra sobre o papel filtro e no topo da mesma colocar também papel filtro e pedra porosa (Figura A10).

Figura A10 – Instalação da amostra, pedras porosas e papéis filtros na base da câmara.



- Com auxílio de um molde cilíndrico revestir a amostra com membrana látex (Figura A11).

Figura A11 – Colocação da membrana látex para revestir a amostra.



- Com auxílio do molde cilíndrico colocar um “o-ring” na base, onde repousa a amostra, (há um rebaixo indicando onde o “o-ring” deverá ficar instalado) para vedar a membrana na mesma.
- Colocar no topo da amostra (sobre a pedra porosa) o “top cap” de acrílico e colocar mais dois “o-rings”, vedando a membrana ao mesmo. Deixar os “o-rings” aproximadamente na metade da altura do “top cap”.
- Conectar as mangueiras do “top cap” nos encaixes da base da câmara (Figura A12).

Figura A12 – Demonstração do encaixe das mangueiras do “top cap” na base da câmara.



- Instalar a campânula na prensa. Apertar os 3 parafusos ao mesmo tempo para evitar desnível com a base. Do contrário poderá vazar água da câmara durante o ensaio.
- Para preencher a câmara com água deve-se conectar a mangueira de fornecimento de água do “DE-AERADOR” na conexão 2, girar a válvula do “DE-AERADOR” para opção “Water Outlet”, abrir o registro do topo da campânula e abrir válvula da conexão 2 (Figura A13).

Figura A13 – Representação do enchimento da câmara com água.

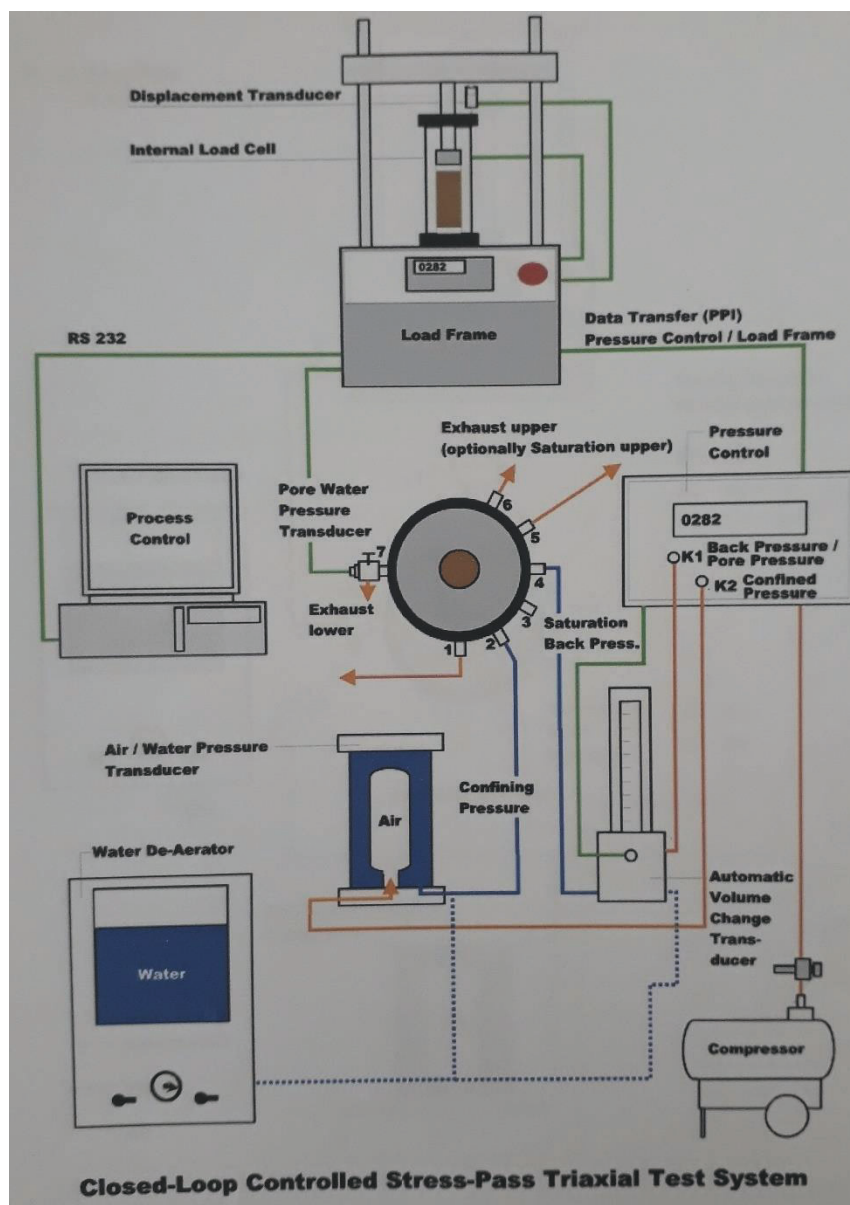


- **OBS.:** Acompanhar o enchimento da câmara, pois, quando a mesma enche completamente, o registro superior deve ser rapidamente fechado, já que o mesmo esguicha água pelo orifício, podendo molhar o equipamento.
- O equipamento triaxial da WILLE GEOTECHNIK foi projetado para ser usado tanto no modo automático, com uso de software, quanto no modo manual. Na sequência estão descritos os passos para o uso com diferentes modos.

A5. Operação do equipamento no modo automático

- A Figura A14 apresenta um fluxograma sistemático da instalação do equipamento para o modo automático.

Figura A14 – Fluxograma sistemático da instalação do equipamento para o modo automático.



A5.1 Instalação da célula de carga, do LVDT e do pistão

- A célula de carga deve estar instalada na parte superior da prensa, deixando uma pequena folga para que a mesma fique com um pouco de flexibilidade. Importante

deixar a folga para que na fase de cisalhamento a célula de carga possa melhor se ajustar ao centro do pistão.

- O leitor de deslocamento vertical (LVDT) deverá estar instalado no topo da câmara.
- Deixar uma folga de aproximadamente 2 mm entre pistão e “top cap”. Quando passar para a fase de cisalhamento, ao subir a prensa, o “top cap” se acomodará ao pistão e conseqüentemente o pistão se acomodará na célula de carga. Quando começar a aplicação de carga serão iniciadas as leituras.

A5.2 Ligar prensa UL-60

- Para ligar a prensa girar botão vermelho.
- No visor da prensa apertar o botão com seta para baixo (Figura A15) até a opção MANUAL 50.0000 mm/min para operar a câmara manualmente.

Figura A15 – Visor da prensa UL-60.



- Nos botões F1 e F2 do visor consegue-se ajustar a velocidade de ruptura da amostra a ser usada no ensaio. F1 aumenta a velocidade e F2 diminui. Para solos argilosos, recomenda-se aplicar uma baixa velocidade de ruptura, cerca de 0,01 a 0,05 mm/min.
- No botão preto (à esquerda do visor) as teclas “UP” e “DOWN” sobem e descem respectivamente a câmara. Subir a câmara até deixar aproximadamente 2 mm de

espaçamento entre o pistão e a célula de carga (só vai ser totalmente encostado na fase do cisalhamento). Apertar “STOP” e realizar o procedimento para zerar a célula de carga.

A5.3 Zerar a célula de carga e transdutor de pressão

- Para zerar o transdutor de pressão deve-se ir no visor da prensa e apertar o botão com seta para baixo até encontrar a opção “ext. analog max load”. Depois, é preciso abrir o registro do transdutor de pressão celular, retirando a válvula do mesmo para posteriormente o encher com água destilada. Esse procedimento é apresentado nas Figuras A16, A17 e A18.

Figura A16 – Visor da prensa UL-60 na opção “ext. analog max load”.

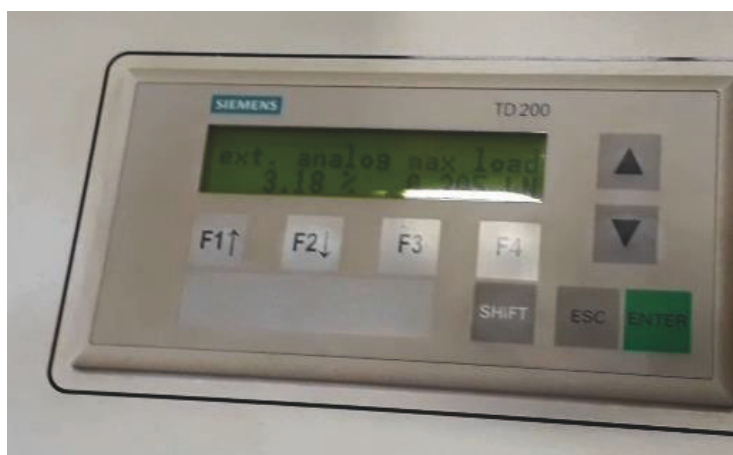


Figura A17 – Abertura do registro do transdutor de pressão celular.

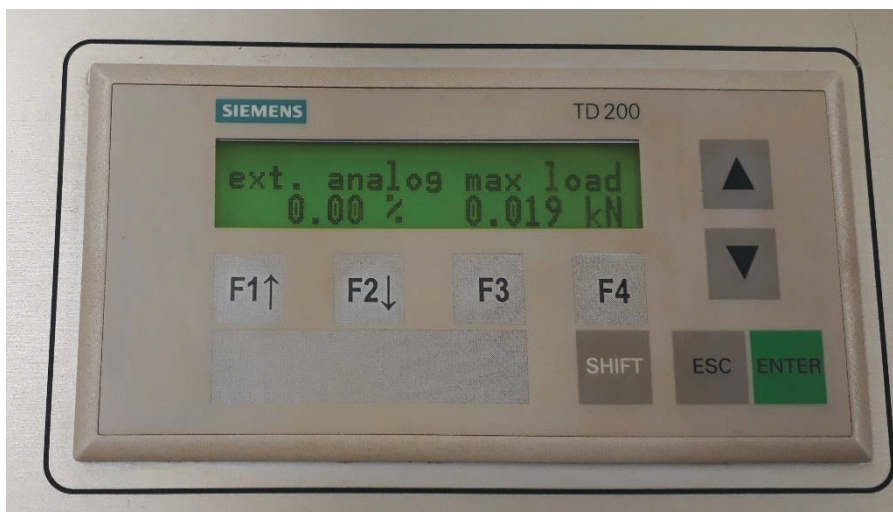


Figura A18 – Preenchimento do transdutor de pressão celular com água destilada.



- Após encher o transdutor de pressão com água, ainda com o registro aberto, clicar ao mesmo tempo em “SHIFT + F2” no visor da prensa, para zerar o transdutor (0,00%). O transdutor de pressão dá o valor em porcentagem do “range” de 16 bar, que é a capacidade máxima dele. Isso quer dizer que quando estiver em 100% a pressão será de 16 bar. A representação do transdutor de pressão zerado é mostrada na Figura A19.

Figura A19 – Representação do transdutor de pressão zerado.

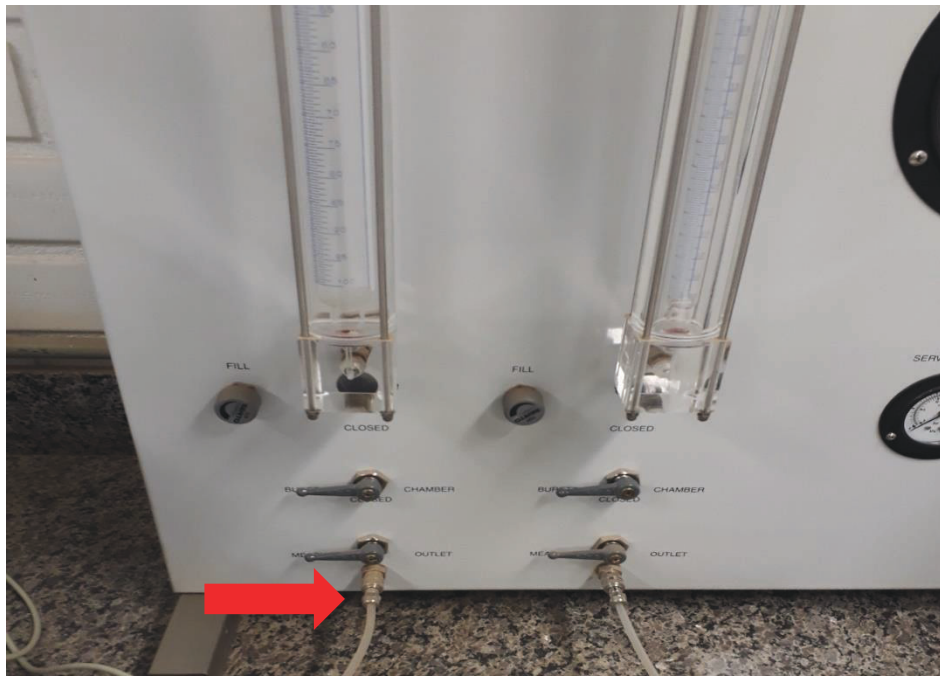


- Ir até opção MANUAL 50.0000 mm/min e apertar ao mesmo tempo em “SHIFT + F2” e a célula de carga irá zerar (0.000 kN).
- Fechar o transdutor de pressão.

A5.4 Passos para fase de percolação de água na amostra

- Ligar o compressor de ar. ATENÇÃO! O compressor é de 110 V, portanto, deverá estar ligado em um transformador de 110 V – 220 V. O compressor fornece ar para o hidro-pneumático carregando o manômetro à uma pressão de aproximadamente 10 bar. Após o fornecimento, o compressor se auto desligará e voltará a suprir ar para o equipamento quantas vezes se façam necessárias durante o ensaio.
- Na conexão 2 da câmara (tensão confinante) deve-se conectar mangueira com saída para a conexão correspondente a bureta de tensão confinante no hidro-pneumático (Figura A20).

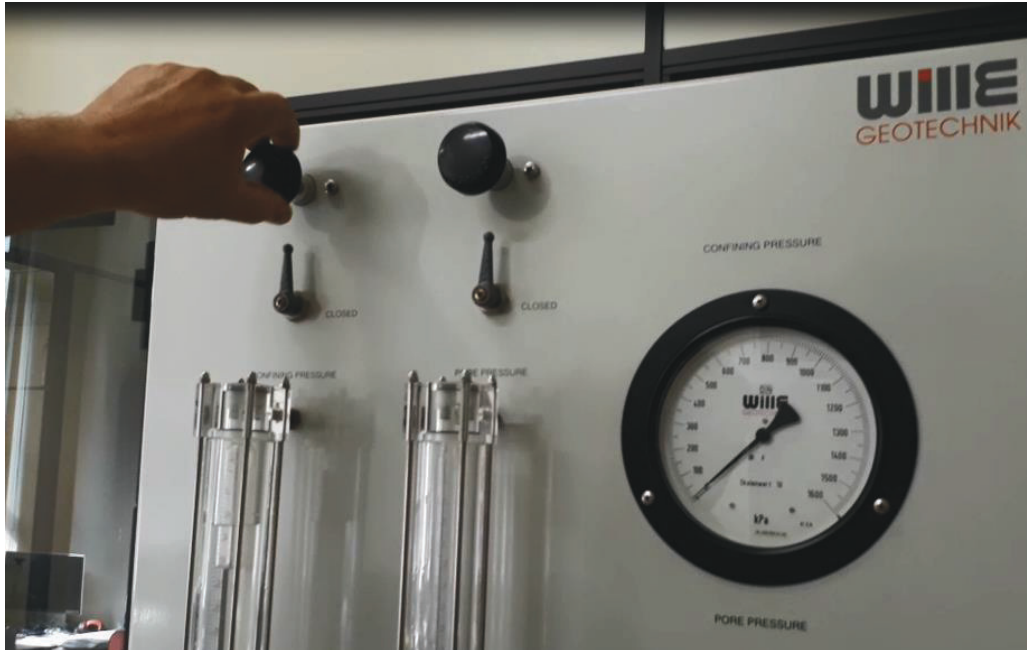
Figura A20 – Demonstração da conexão no hidro-pneumático para fase de percolação.



- **OBS.:** As quatro alavancas abaixo das buretas deverão estar viradas para o lado anti-horário, conforme demonstrado também na Figura A20.
- Para fazer a percolação na amostra, primeiramente, deve-se aplicar uma tensão confinante na amostra. Sendo assim, gira-se no sentido horário o registro

correspondente a bureta da tensão confinante (ver Figura A21) até alcançar a pressão desejada.

Figura A21 – Aplicação da tensão confinante no hidro-pneumático.



- **OBS.:** Há uma certa imprecisão de fábrica no controle das pressões pelo DS 15 (oscilações em torno de 5 kPa para mais ou para menos durante ensaio) e essa diferença pode ser significativa para amostras submetidas a baixas pressões. Por esse motivo o equipamento está montado de forma a utilizar o aplicador manual de pressões (hidro-pneumático) já que este tem um melhor controle de pressão. No entanto, o uso do DS 15 é indispensável para o uso do programa. Nessas condições de montagem, torna-se dispensável o uso do blader (câmara com bexiga).
- Sugere-se aplicar no hidro-pneumático, aproximadamente, 50 kPa de pressão confinante para essa fase da percolação. Posteriormente, deve-se abrir a válvula da conexão 2 da câmara (tensão confinante) para que esta pressão seja aplicada na amostra.
- Conectar a mangueira correspondente a “Water Outlet” do “DE-AERADOR” na conexão de ligação T na câmara (conexões 3 e 4, conforme Figura A22), abrir a válvula de saída d’água do “DE-AERADOR” (Water Outlet), abrir a válvula 3 da câmara (poropressão da base) e abrir saída do topo (válvula conexão 1). A partir desse momento dá-se início a percolação.

Figura A22 – Detalhe da conexão da mangueira do “DE-AERADOR” na ligação T.



- **OBS.:** Recomenda-se fazer a percolação ascendente (válvula 3). No entanto, para solos muito argilosos pode-se fazer a percolação por baixo e por cima, nesse caso, abrir as válvulas 3 e 4.
- Após abrir a saída do topo começará a sair água na mangueira. Deixar essa mangueira aproximadamente na altura da amostra para evitar entrada de ar.
- **OBS.:** Deve-se deixar um recipiente com medidas na saída da mangueira para coletar a água percolada na amostra. Ao tratar-se de solos mais permeáveis, recomenda-se percolar duas ou três vezes o volume da amostra para tentar retirar o ar inicial presente na mesma.
- Anotar o horário de início e final da percolação.
- Abrir o registro do transdutor de pressão da câmara.
- Abrir a válvula da conexão 5a.
- Fechar o registro do transdutor de pressão.
- Abrir válvula da conexão 5b. Observar no visor da prensa que começa a ler em porcentagem o valor equivalente a pressão aplicada.
- **OBS.:** Com uma regra de 3 pode-se fazer uma verificação dessa leitura, já que a pressão máxima de 1600 kPa equivale a 100% e o valor em porcentagem lido no visor está para x (kPa).

- Ao interromper a percolação, fechar todas as válvulas da câmara e desligar prensa por segurança.
- Conectar a mangueira da conexão "Cell" da bureta na ligação T (3 e 4) da câmara para ir para a fase da saturação.

A5.5 Passos para fase de saturação usando o software

- Com a prensa e o DS 15 (equipamento de aquisição de dados) desligados, ligar o computador e abrir o programa Triax 2003.
- Manter todas válvulas da câmara fechadas e ligar a prensa.
- Abrir registro do transdutor de pressão da câmara e ligar o DS 15.
- Na prensa deve ser verificado se a célula de carga está zerada. Do contrário, zerar, conforme procedimento já citado anteriormente.
- No visor da prensa buscar a opção "ext. analog máx load" e verificar se está com 0,00% de leitura do transdutor de pressão.
- Fechar o registro do transdutor de pressão.
- Deixar a opção "Actual" (automático) no visor da prensa.
- No software clicar em "SCAN" e esperar os 30 segundos, esse processo é necessário para que o software scaneie os transdutores do equipamento.
- Após os 30 segundos, clicar em "G1".
- Quando abrir a tela de leituras dos transdutores, em "analog 3" clicar em "Start" para conferir a calibração da bureta. Se o valor lido no programa for o mesmo na bureta (nível de água) clicar em "STOP" no "analog 3" e, após, clicar em "Speichem e Exit" e prosseguir para os passos do programa no item A5.5.2.
- Do contrário, deve-se obrigatoriamente calibrar a bureta conforme procedimento descrito no item A5.5.1.

A5.5.1 Calibração da bureta

- Na prensa, ir até opção "ext. analog máx load". Após, encher com água destilada o transdutor de pressão da câmara e com a saída do mesmo ainda aberta clicar em "shift + F2" para zerar o mesmo (0,00%).
- Fechar o registro do transdutor de pressão da câmara.
- Na prensa ir até MANUAL 50.0000 mm/min e clicar no "shift + F2" e o valor da célula de carga irá zerar (0.000 kN).

- Abrir o programa, clicar em “SCAN” e esperar 30 segundos para o equipamento realizar as leituras dos transdutores.
- Clicar na opção “G1” e na tela que irá abrir ir até a opção “Drucksteuerung Analog Input” e “analog 3” e clicar em “START”. O valor lido em “analog 3” deverá corresponder ao valor lido na bureta. Do contrário deve-se calibrar a mesma.
- Para calibrar a bureta deve-se usar a mangueira “Water Outlet” do “DE-AERADOR” e conectar à mesma na entrada “Water Supply” da bureta (Figura A23). As válvulas da bureta deverão estar na posição “BURETE” e “MEASURING”, respectivamente. Liberar também a válvula de saída d’água do “DE-AERADOR” (Water Outlet).

Figura A23 – Conexão da mangueira na bureta (entrada “Water Supply”).

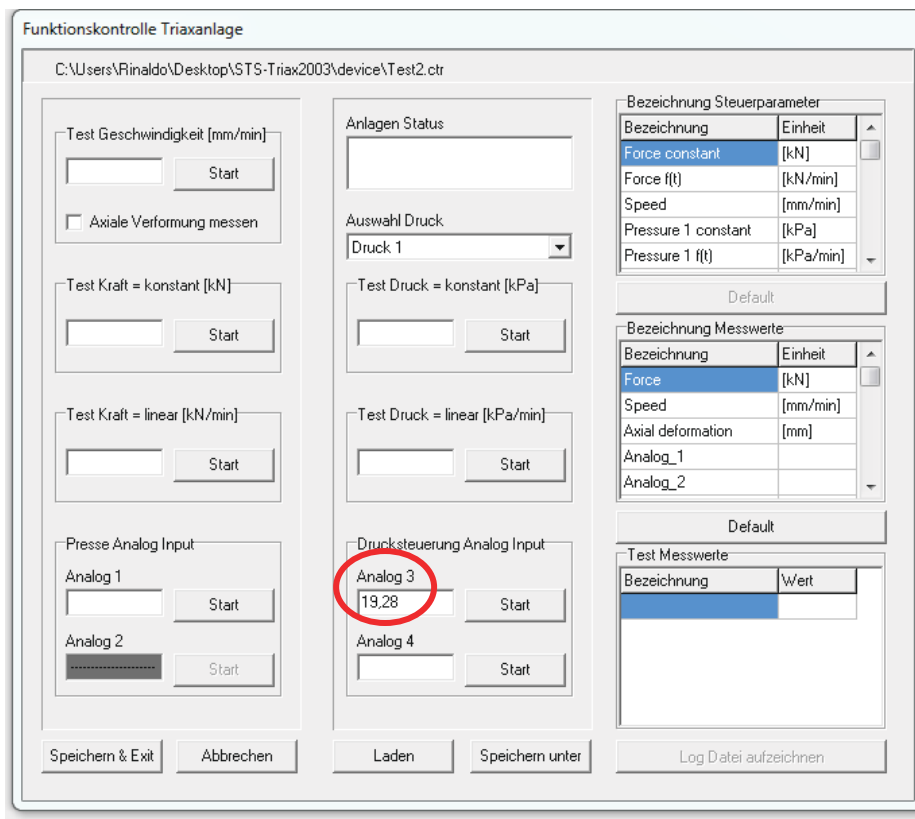


- Girar o registro de controle de vazão da bureta (Figura A24) até que o nível d’água alcance 5 ml (valor usado para calibração).
- Ir no programa, clicar dentro da janela do “analog 3” e colocar o valor 5 na caixa superior. Após, clicar em “START”, esperar alguns segundos para que o programa reconheça o valor e clicar em “STOP” (Figura A25).

Figura A24 – Identificação da válvula de controle de vazão da bureta.



Figura A25 – Janela “analog 3” do software para calibração da bureta.



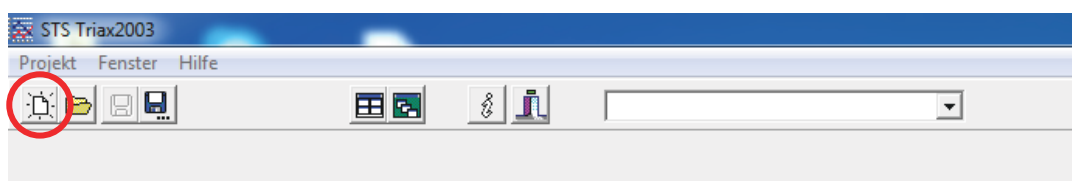
- Na bureta colocar a válvula na posição “OUTLET” para liberar água da bureta (deve-se colocar um recipiente na saída da mangueira). Deixar descer água até 90 ml (valor de calibração) e então colocar a válvula novamente em “MEASURING”.

- No programa, colocar o valor de 90 ml (segunda caixa), dar “START” e esperar alguns segundos para que o valor seja reconhecido pelo programa. Dar “STOP” e clicar em “Übernehmen”.
- Na bureta encher a mesma até 20 ml.
- No programa, dar “START” e “STOP” no “analog 3”. O valor lido deverá corresponder ao valor calibrado na bureta (20 ml).
- Clicar em “Speichern e Exit” e a bureta estará calibrada.
- Após calibração, desconectar a mangueira do “DE-AERADOR” (Water Outlet) da bureta.

A5.5.2 Passos do programa

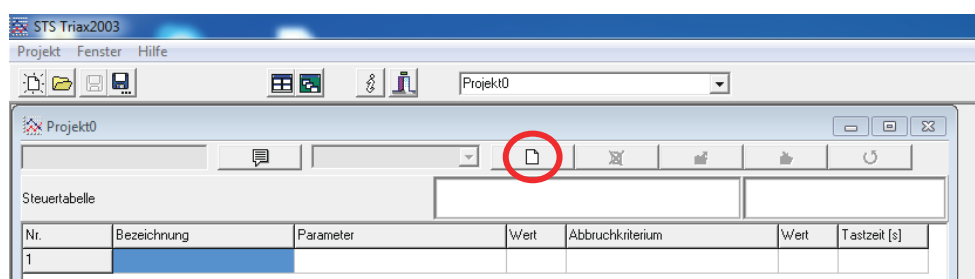
- Clique em “New” (Figura A26).

Figura A26 – Janela inicial do software STS Triax2003.



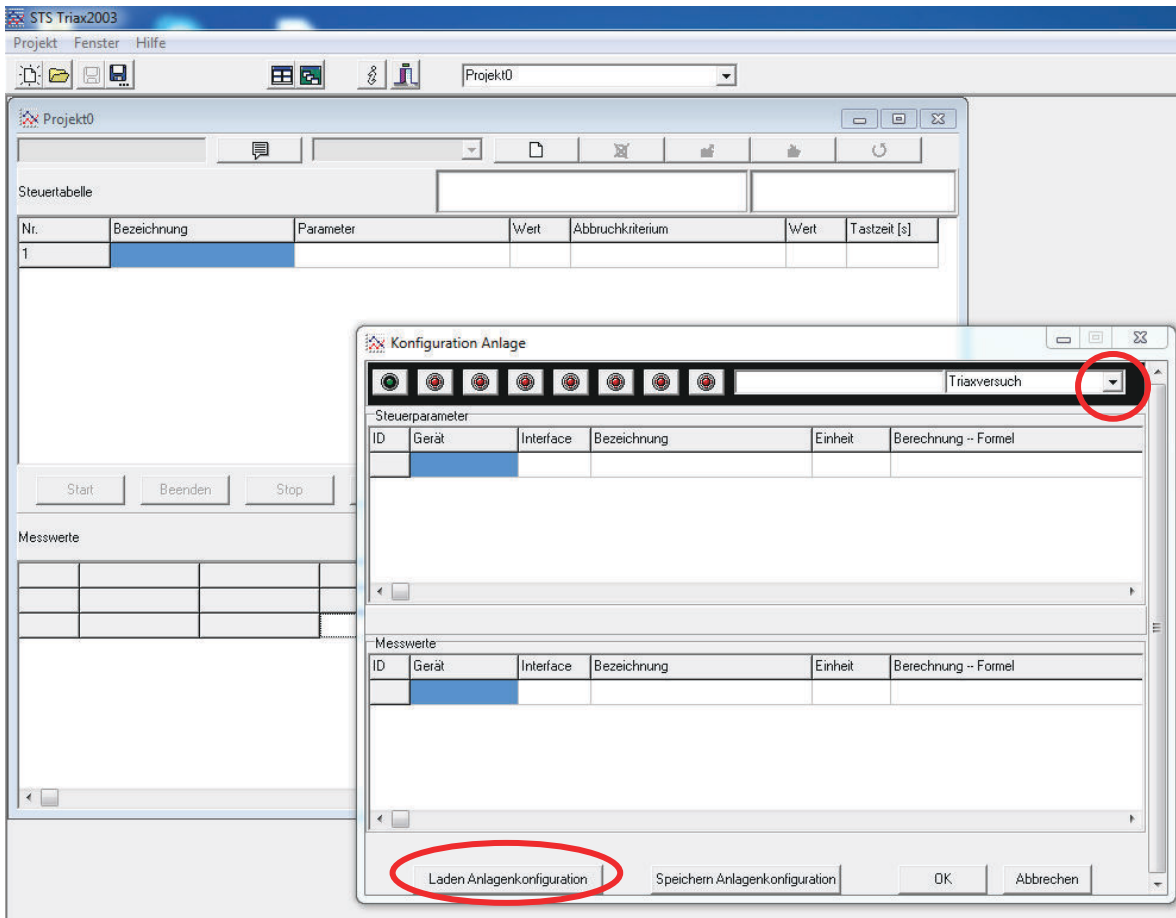
- Na tela com nome “Projekt0”, clicar no ícone da folha branca em “Neuer Versuch” (Figura A27).

Figura A27 – Janela “Projekt0”.



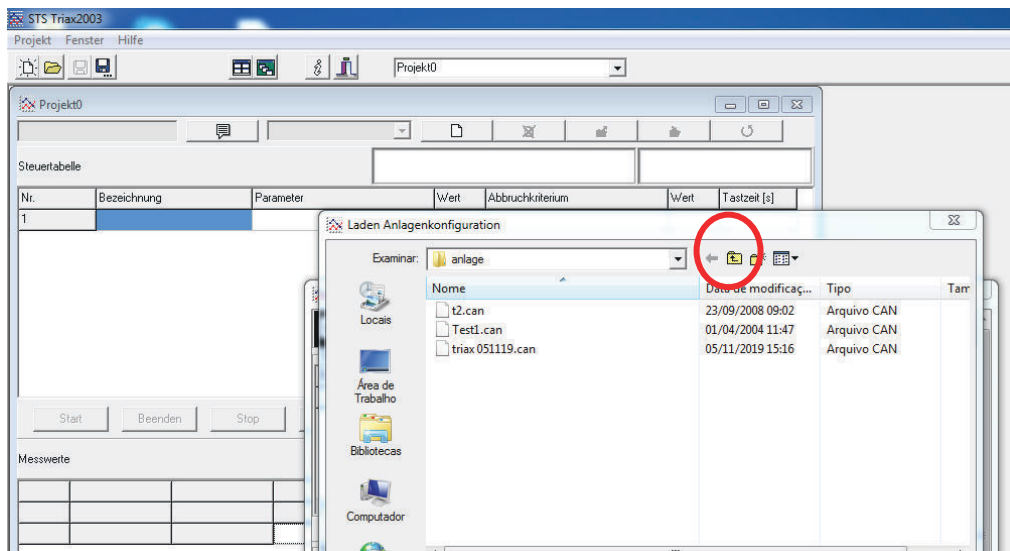
- Na tela que irá abrir deve-se clicar em “Auswahl der Versuchsanordnung” (Figura A28) e selecionar “triaxversuch”. Após, clicar em “Laden Anlagenkonfiguration” (Figura A28).

Figura A28 – Janela “konfiguration Anlage” – Passo 1.



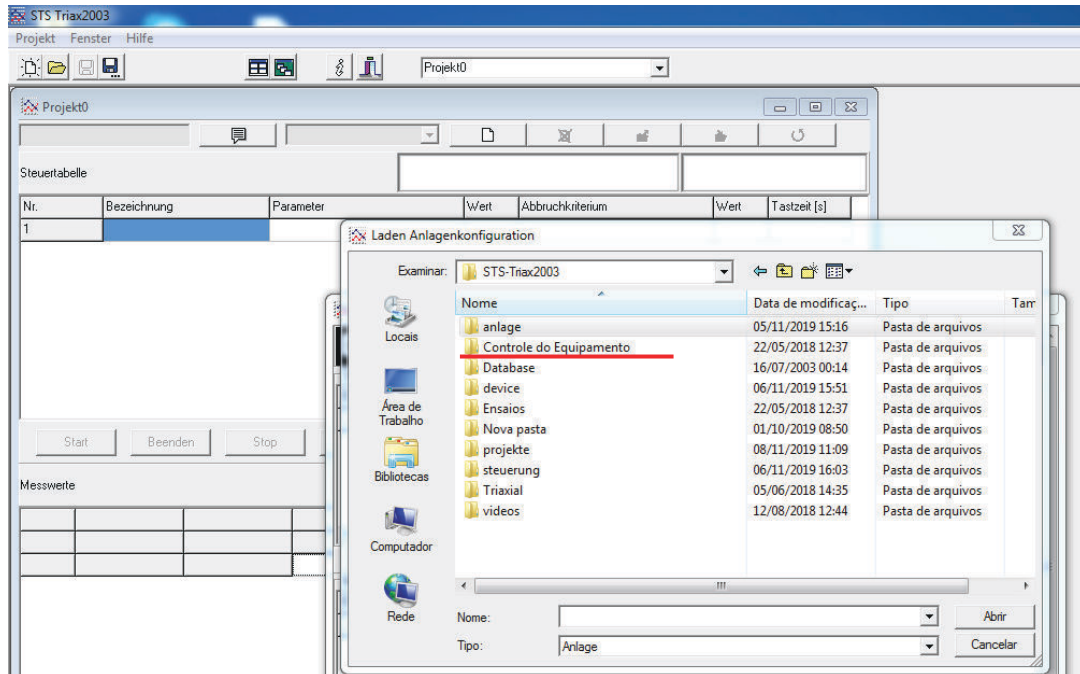
- Na tela “Laden Anlagenkonfiguration” deve-se clicar no ícone indicado na Figura A29.

Figura A29 – Janela “Laden Anlagenkonfiguration” – Passo 1.



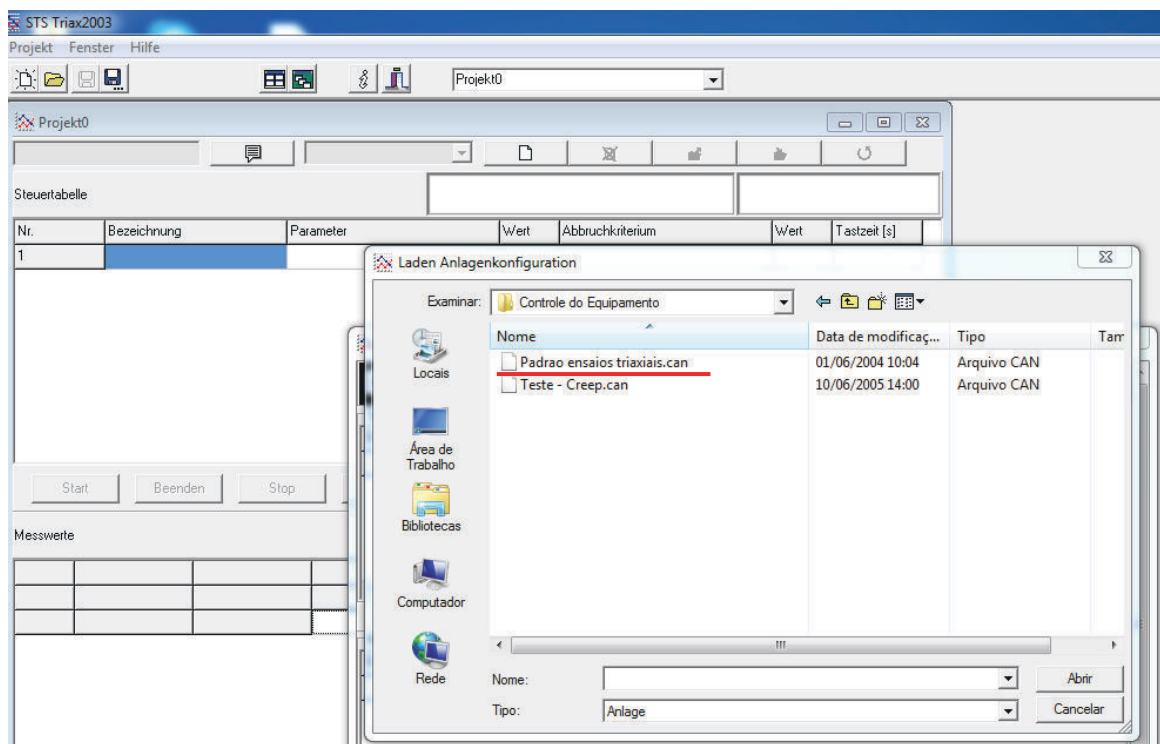
- Clicar em “controle do equipamento” (Figura A30).

Figura A30 – Janela “Laden Anlagenkonfiguration” – Passo 2.



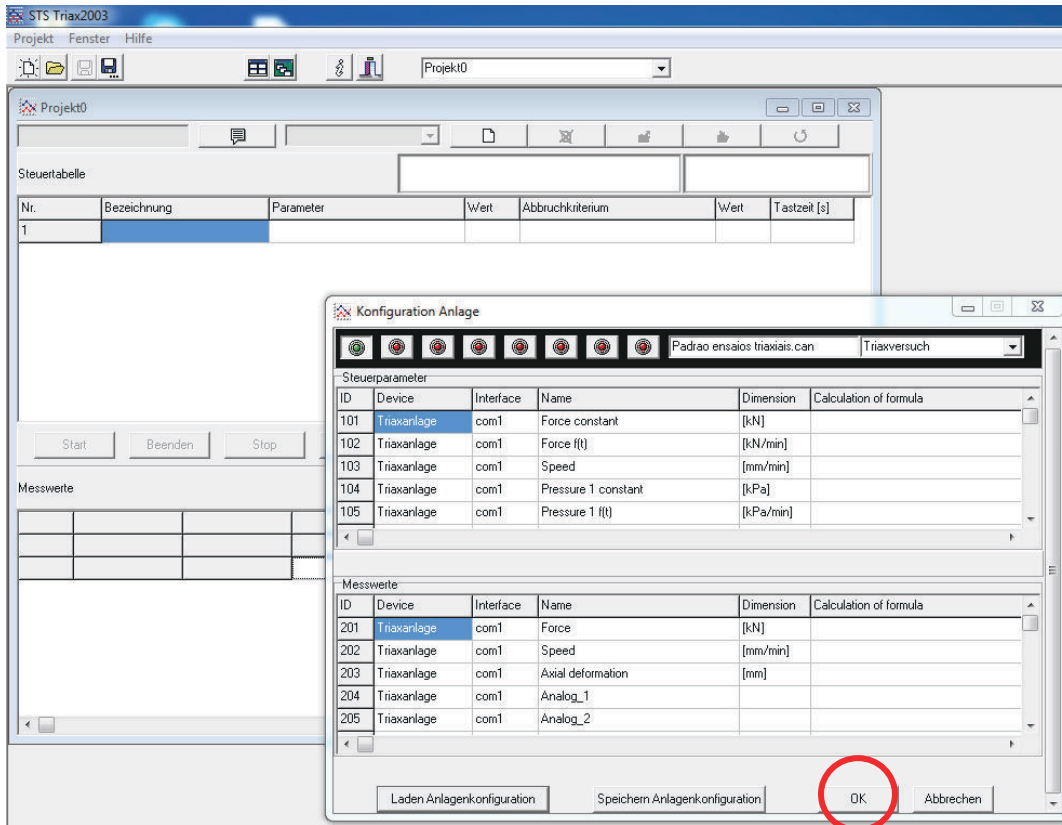
- Na próxima tela clicar em “padrão ensaios triaxiais”, conforme Figura A31.

Figura A31 – Janela “Laden Anlagenkonfiguration” – Passo 3.



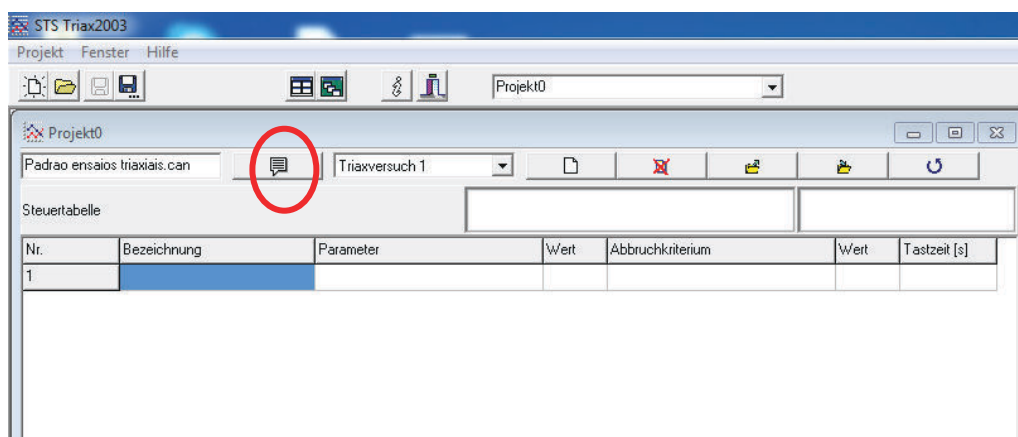
- Na tela “Konfiguration Anlage” clicar em OK, conforme Figura A32.

Figura A32 – Janela “konfiguration Anlage” – Passo 2.



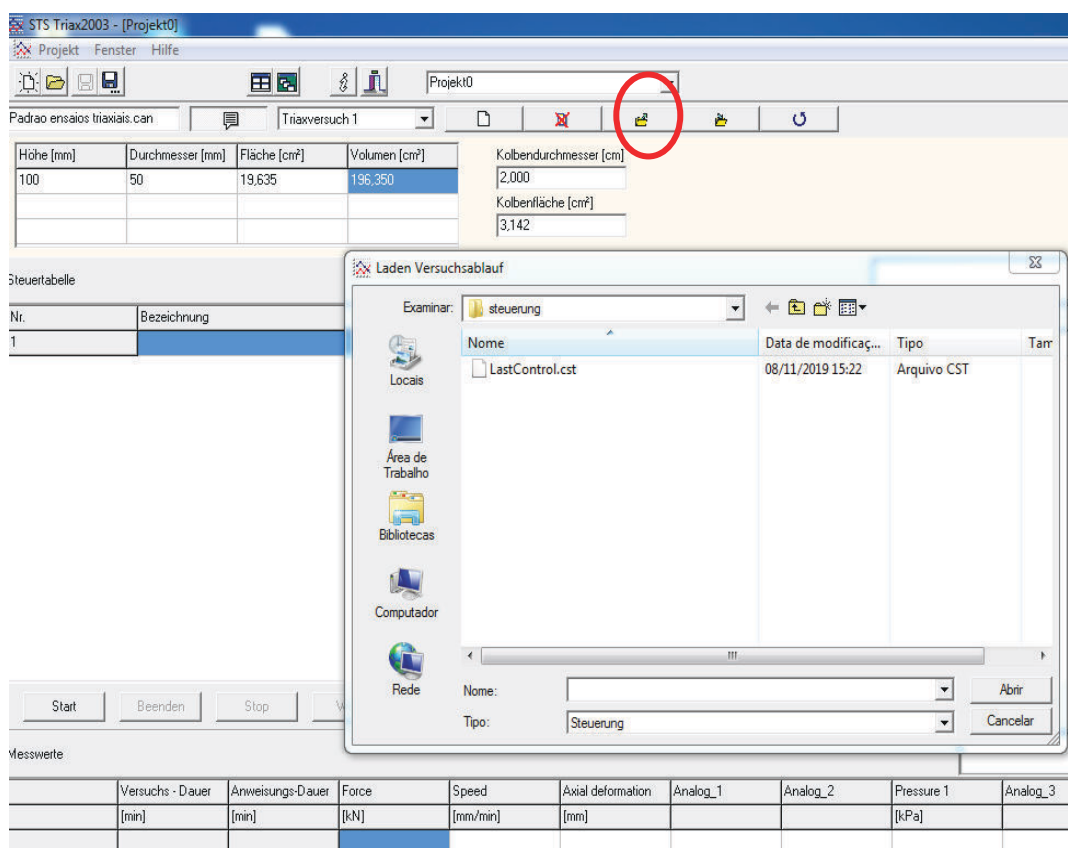
- Na tela mostrada na Figura A33 clicar no ícone “Versuchsbedingungen” e posteriormente inserir os dados da amostra.

Figura A33 – Localização do ícone “Versuchsbedingungen” na tela “projekt0”.



- Colocar dados da amostra:
 - Clicar na caixa embaixo da opção “Höhe (mm)” – Figura A34 - para colocar o valor da altura da amostra (digitar 100 mm).
 - Em “durchmesser (mm)” – Figura A34 - digitar o valor do diâmetro da amostra (50 mm).
- Clicar na caixa “kolbendurchmesser (cm)” – Figura A34 - e colocar o diâmetro do pistão da célula de carga (2 cm). Na caixa abaixo aparecerá o valor da área do pistão (3,142 cm²).
- Em “Fläche (cm²)” – Figura A34 - aparece o valor da área do CP (19,635 cm²) e em “Volumen (cm³)” o valor do volume do CP (196,350 cm³).

Figura A34 – Janela para inserção dos dados da amostra.



- Clicar no ícone “Versuchsablauf laden” indicado na Figura A34.
- Irá aparecer uma tela para abrir o arquivo. Selecionar na caixa um arquivo com as trajetórias de tensões já salvas e apenas alterar nome do teste, para não ser necessário reescrever as trajetórias a cada novo ensaio (Figuras A35 e A36). Cuidado

para não clicar sobre janelas já definidas na tabela de trajetória, pois isso altera para a 1ª opção novamente.

Figura A35 – Seleção de arquivo com trajetória de tensões já salvas.

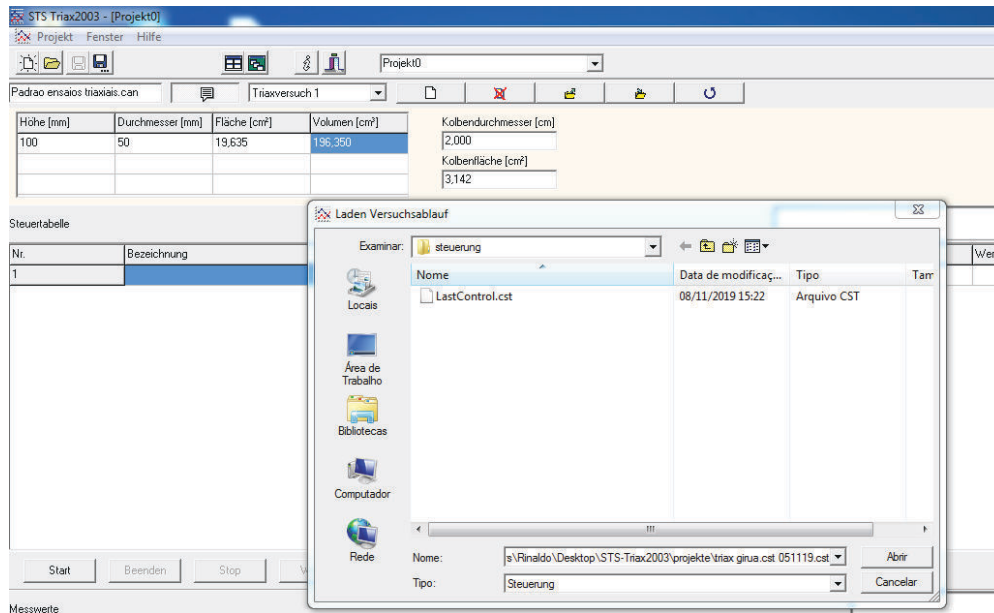


Figura A36 – Tela com trajetórias de tensões já salvas.

STS Triax2003 - [teste girua saturação 111019.geo]

Projekt Fenster Hilfe

Padrao ensaios triaxiais.can | Triaxversuch 1

Anweisung 1 aktiv seit 06/11/2019 16:19:52
Anweisung 1 beendet um 06/11/2019 16:19:53

keine Bedingung

Nr.	Bezeichnung	Parameter	Wert	Abbruchkriterium	Wert	Zeitzeit [s]
1	Sättigung	radial stress = constant	75	keine Bedingung		
2	Sättigung	Pressure 1 constant	50	User Steuerung		60
3	Sättigung	radial stress = constant	125	keine Bedingung		
4	Sättigung	Pressure 1 constant	100	User Steuerung		60
5	Sättigung	radial stress = constant	175	keine Bedingung		
6	Sättigung	Pressure 1 constant	150	User Steuerung		60
7	Sättigung	radial stress = constant	225	keine Bedingung		
8	Sättigung	Pressure 1 constant	200	User Steuerung		60
9	Sättigung	radial stress = constant	275	keine Bedingung		
10	Sättigung	Pressure 1 constant	250	User Steuerung		60
11	Sättigung	radial stress = constant	325	keine Bedingung		
12	Sättigung	Pressure 1 constant	300	User Steuerung		60
13	Sättigung	radial stress = constant	375	keine Bedingung		
14	Sättigung	Pressure 1 constant	350	User Steuerung		60
15	Sättigung	radial stress = constant	425	keine Bedingung		
16	Sättigung	Pressure 1 (0)	500	User Steuerung		15

Messwerte

Versuche - Dauer	Anweisungs-Dauer	radial stress	u1	axial strain	radial strain	delta volume	effective radial stress	axial stress - radial s	sample Area	
[min]	[min]	[kPa]	[kPa]	[%]	[%]	[cm³]	[kPa]	[kPa]	[cm²]	
1	1.00	0.98	74.400	46.360	0.000	-46.073	0.000	74.400	-5.993	19.635
2	2.00	2.00	74.350	46.400	0.000	-46.073	-0.007	74.350	-5.949	19.635
3	3.00	3.00	74.400	46.400	0.000	-46.073	-0.007	74.400	-5.993	19.635
4	4.00	4.00	74.400	46.350	0.002	-46.073	-0.007	74.400	-5.993	19.635
5	5.02	5.00	74.350	46.350	0.000	-46.073	0.000	74.350	-5.989	19.635
6	6.02	6.05	123.700	100.400	0.000	-46.073	-0.007	123.700	-9.676	19.635
7	7.02	1.85	123.750	100.400	0.000	-46.073	0.000	123.750	-9.363	19.635
8	8.02	2.87	123.800	100.400	0.002	-46.073	0.000	123.800	-9.505	19.635
9	9.03	3.87	123.750	100.400	0.000	-46.073	0.000	123.750	-9.901	19.635
10	10.03	4.87	123.750	100.400	0.000	-46.073	0.000	123.750	-9.942	19.635
11	11.03	5.87	123.700	100.400	0.000	-46.073	0.007	123.700	-9.876	19.635
12	12.03	6.87	123.750	100.400	0.000	-46.072	-1.164	123.750	-9.861	19.635
13	13.03	7.88	123.750	100.450	0.000	-46.071	-1.838	123.750	-9.942	19.635
14	14.05	8.88	123.800	100.400	0.000	-46.071	-2.023	123.749	-9.905	19.635
15	15.05	9.88	123.750	100.450	0.000	-46.071	-2.248	123.699	-9.840	19.635

- Se as trajetórias de tensões não estiverem salvas para o ensaio a ser realizado, deve-se prosseguir conforme descrito no Quadro A1.
- Na coluna “Bezeichnung” selecionar a opção “Sättigung” (saturação).
- Na coluna “Parameter” selecionar “radial stress = constant” para as tensões confinante e “Pressure 1 constant” para as poropressões aplicadas.
- Na coluna “Wert” inserir os valores das tensões confinantes e poropressões (recomenda-se que a diferença entre ambas seja de 25 a 30 kPa).
- Na coluna “Abbruchkriterium” selecione “Keine Bedingung” para as linhas de tensões confinante e “User Steuerung” para as linhas das poropressões.
- Na coluna “Tastzeit (s)” é colocado o tempo de aquisição para evitar arquivos muito grandes.

Quadro A1 – Criação do banco de dados com as trajetórias de tensões.

Nr.	Bezeichnung	Parameter	Wert	Abbruchkriterium	Wert	Tastzeit (s)
1	Sättigung	Radial stress=constant	75	Keine Bedingung	-	
2	Sättigung	Pressure 1 constant	50	User Steuerung	-	60
3	Sättigung	Radial stress=constant	125	Keine Bedingung	-	
4	Sättigung	Pressure 1 constant	100	User Steuerung	-	60
5	Sättigung	Radial stress=constant	175	Keine Bedingung	-	
6	Sättigung	Pressure 1 constant	150	User Steuerung	-	60
7	Sättigung	Radial stress=constant	225	Keine Bedingung	-	
8	Sättigung	Pressure 1 constant	200	User Steuerung	-	60
9	Sättigung	Radial stress=constant	275	Keine Bedingung	-	
10	Sättigung	Pressure 1 constant	250	User Steuerung	-	60
11	Sättigung	Radial stress=constant	325	Keine Bedingung	-	
12	Sättigung	Pressure 1 constant	300	User Steuerung	-	60
13	Sättigung	Radial stress=constant	375	Keine Bedingung	-	

14	Sättigung	Pressure 1 constant	350	User Steuerung	-	60
15	Sättigung	Radial stress=constant	425	Keine Bedingung	-	
16	Sättigung	Pressure 1 constant	400	User Steuerung	-	60
17	Sättigung	Radial stress=constant	475	Keine Bedingung	-	
18	Sättigung	Pressure 1 constant	450	User Steuerung	-	60
19	Sättigung	Radial stress=constant	525	Keine Bedingung	-	
20	Sättigung	Pressure 1 constant	500	User Steuerung	-	15
21	Sättigung	Radial stress=constant	575	Keine Bedingung	-	
22	Sättigung	Pressure 1 constant	550	User Steuerung	-	
23	Sättigung	Pressure 1 constant	550	User Steuerung	-	15
24	Sättigung	Radial stress=constant	625	Keine Bedingung	-	
25	Sättigung	Pressure 1 constant	600	User Steuerung	-	
26	Sättigung	Pressure 1 constant	600	User Steuerung	-	15

- Realizados os procedimentos do Quadro A1, aplicar no hidro-pneumático a primeira sequência de tensões do programa ($\sigma_3 = 75$ kPa e $u = 50$ kPa). Após, ir no programa e clicar nessa mesma tela na opção "START". Na tela que abrir, deve-se salvar o arquivo. Uma luz verde na tela será acionada e no visor do DS 15 aparecerão os valores correspondentes a primeira sequência de tensões. Abrir a válvula 2 da câmara (σ_3) e logo a seguir a válvula 4, para as pressões serem aplicadas na amostra. **OBS.:** A tensão confinante sempre deve ser aberta primeiro, pois se a poropressão for maior poderá "destruir" a amostra.

- Posteriormente, abrir a válvula 6 para o transdutor fazer as leituras.

- Acompanhar o gráfico da variação volumétrica (Δ volume) e quando o mesmo estabilizar pode-se passar para a próxima sequência de pressões.

- Para passar para a próxima sequência de pressões deve-se primeiramente fechar as válvulas 2 e 4 da câmara e, posteriormente, aplicar o valor das pressões no hidro-pneumático. Depois ir no programa e clicar em "Zeile +". Aguardar o DS 15 reconhecer os valores das pressões aplicadas e então abrir as válvulas 2 e 4 novamente.

- A Figura A37 apresenta uma representação da tela de criação das trajetórias de tensões.

OBS.: Os procedimentos para as sequências de tensões para a saturação da amostra irão prosseguir até que se alcance um parâmetro B com valor de aproximadamente 1 (solos argilosos geralmente alcançam o B na casa dos 550 kPa).

Figura A37 – Tela de trajetórias de tensões.

Nr.	Bezeichnung	Parameter	Wert	Abbruchkriterium	Wert	Tastzeit [s]
1	Sättigung	radial stress = constant	75	keine Bedingung		
2	Sättigung	Pressure 1 constant	50	User Steuerung		60
3	Sättigung	radial stress = constant	125	keine Bedingung		
4	Sättigung	Pressure 1 constant	100	User Steuerung		60
5	Sättigung	radial stress = constant	175	keine Bedingung		
6	Sättigung	Pressure 1 constant	150	User Steuerung		60
7	Sättigung	radial stress = constant	225	keine Bedingung		
8	Sättigung	Pressure 1 constant	200	User Steuerung		60
9	Sättigung	radial stress = constant	275	keine Bedingung		
10	Sättigung	Pressure 1 constant	250	User Steuerung		60
11	Sättigung	radial stress = constant	325	keine Bedingung		
12	Sättigung	Pressure 1 constant	300	User Steuerung		60
13	Sättigung	radial stress = constant	375	keine Bedingung		
14	Sättigung	Pressure 1 constant	350	User Steuerung		60
15	Sättigung	radial stress = constant	425	keine Bedingung		
16	Sättigung	Pressure 1 (t)	500	User Steuerung		15

A5.5.2.1 Teste do parâmetro B

- Anotar imediatamente o valor da poropressão do topo e a confinante (σ_3).
- Fechar drenagem (válvulas 4 e 6).
- Abrir as válvulas 5a e 5b para medir a pressão por fora da amostra (no programa a “pressure 2” vai aumentar um pouco com relação ao último valor lido).
- Aumentar tensão confinante na amostra para ~ 550 kPa e realizar a leitura imediata no programa (anotar valor da σ_3).
- Se a amostra estiver 100% saturada essa pressão aplicada vai ter que reagir dentro da amostra.
- Na sequência, medir rapidamente a poropressão induzida e calcular a correlação:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

- Se $B > 0,95$, OK! Do contrário, aumentar contrapressão. Quanto mais próximo o valor de B estiver de 1 melhor.
- Nota-se que a variação de volume nesta etapa se dá em virtude da existência de bolhas de ar, já que a σ' é baixa e não causa consolidação (ou muito pouco).
- Alcançado o parâmetro B, clicar em “Beenden” no programa, para encerrar a trajetória de tensões e posteriormente começar a consolidação.
- Fechar todas as válvulas na câmara.

A5.6 Passos para fase de consolidação

- Abrir registro do transdutor de pressão da câmara para zerar o mesmo.
- Por questões de segurança desligar a prensa, o DS 15 e então fechar o programa.
- Ligar novamente a prensa e o DS 15.
- Para fazer a consolidação da amostra, deve-se aplicar no hidro-pneumático a tensão confinante e a poropressão de acordo com as tensões efetivas que se deseja aplicar na amostra para determinação da envoltória de ruptura. Exemplos: para uma amostra que necessita de 500 kPa de contrapressão para alcançar o parâmetro B ideal e deseja-se aplicar nessa amostra uma tensão efetiva de 25 kPa, consolida-se a amostra com confinante de 600 kPa e contrapressão de 575 kPa. Portanto, a tensão efetiva é de 25 kPa. Se, deseja-se aplicar uma tensão efetiva de 50 kPa, consolida-se a amostra com confinante de 600 kPa e contrapressão de 550 kPa. Portanto efetiva de 50 kPa. Se, deseja-se aplicar uma tensão efetiva de 100 kPa, consolida-se a amostra com confinante de 600 kPa e contrapressão de 500 kPa. Portanto efetiva de 100 kPa.
- Abrir válvulas 2, 5a, 5b na câmara.
- Abrir programa e ir até tela da trajetória de tensões para selecionar a rotina de consolidação (Figura A38).

Figura A38 – Tela de trajetórias de tensões para seleção da rotina de consolidação.

The screenshot displays the STS Tnax2003 software interface for soil consolidation tests. It includes a data entry table for sample dimensions, a control table for consolidation steps, and a real-time measurement table.

Hohe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [cm²]	Volumen [cm³]	Kolbdurchmesser [cm]
100	50	19,635	196,350	2,000
				Kolbenfläche [cm²]
				3,142

Nr.	Bezeichnung	Parameter	Wert	Abbruchkriterium	Wert	Tastzeit [s]
1	Konsolidierung	radial stress = constant	600	keine Bedingung		
2	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	User Steuerung		15
3	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	10	15
4	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	10	30
5	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	10	60
6	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	180	300
7	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	360	600
8	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	800	1200

Versuchs-Dauer [min]	Anweisung-Dauer [min]	Force [kN]	Speed [mm/min]	Axial deformation [mm]	Analog_1	Analog_2	Pressure 1 [kPa]	Analog_3	Analog_4	Pressure 2 [kPa]	
1	0,25	0,23	0,124	0,000	-0,002	-0,103	0,000	496,600	-0,020	-0,025	596,800
2	0,50	0,50	0,124	0,000	-0,002	0,000	0,000	495,450	-0,013	-0,025	599,400
3	0,77	0,75	0,124	0,000	0,000	0,000	0,000	495,250	-0,007	-0,038	598,650

- O Quadro A2 indica um exemplo da rotina de consolidação para uma amostra onde deseja-se aplicar uma tensão efetiva de 100 kPa na fase de ruptura.

Quadro A2 – Exemplo de rotina de consolidação.

Nr.	Bezeichnung	Parameter	Wert (kPa)	Abbruchkriterium	wert	Tastzeit (s)
1	Konsolidierung	Radial stress=constant	600	Keine Bedingung		
2	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	User Steuerung		15
3	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	10	15
4	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	10	30
5	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	10	60
6	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	180	300
7	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	360	600
8	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	Maximale Dauer in Minuten	800	1200

- Após selecionar o procedimento da consolidação, clicar em “START” para salvar o arquivo e a luz verde será acionada na tela.
- Fechar as válvulas 5a e 5b da câmara. Posteriormente, clicar em “Zeile +” para iniciarem as leituras no programa.
- Antes de iniciar o adensamento, deixar o programa tirar as primeiras leituras (de 15 em 15 segundos) com as válvulas da câmara fechadas, pois as pressões precisam ser ajustadas no programa (600 kPa e 500 kPa). Para verificar as medidas, na tabela de leituras do ensaio, ir na coluna “U2” e monitorar leituras do transdutor de pressão da câmara (o transdutor lê as medidas de confinante e a poropressão).
- Quando as leituras estiverem ajustadas (600 e 500 kPa) pode-se abrir a válvula 4 (poropressão topo) para passar para o adensamento da amostra.
- **OBS.:** A poropressão poderá ser aplicada pela base ou topo. Em caso de solos muito argilosos poderá ser aplicada por ambas para acelerar o adensamento (cerca de 4 vezes maior).
- Abrir válvula 6 para que o transdutor de pressão da câmara realize as leituras. Monitorar essas leituras na coluna “U2” da tabela de leituras.
- Quando a leitura estabilizar nos 500 kPa a amostra estará totalmente adensada e pode-se passar para a fase do cisalhamento.
- No programa clicar em “beenden” para interromper a consolidação, clicar em “SIM” e “OK” e fechar o mesmo.
- **OBS.:** a variação do volume de água nesta etapa corresponde a variação de volume do CP, que será utilizado para cálculo do índice de vazios.
- Fechar as válvulas da câmara.
- Regular as pressões a zero no hidro-pneumático.

A5.7 Passos para fase de cisalhamento (ruptura) da amostra

- Se for ensaio triaxial do tipo CD (consolidado drenado), deixar as alavancas da bureta nas opções “BURETE” e “MEASURING”. Se for ensaio triaxial do tipo CU (consolidado não drenado), deixar as duas alavancas em “CLOSED”.
- Com todas válvulas fechadas na câmara, abrir o transdutor de pressão da mesma para posteriormente zerá-lo.
- Por segurança desligar a prensa.
- Colocar água dentro do transdutor para zerar (0,00%) e religar a prensa.

- Zerar célula de carga (manual: shift + F2), pois a mesma poderá indicar uma leitura diferente de zero devido ao atrito com a campânula e da pressão exercida pela confinante.
- Fechar transdutor de pressão da câmara.
- No hidro-pneumático devem estar aplicadas as pressões confinantes de 600 kPa e a poropressão de 500 kPa (supondo o exemplo de uma tensão efetiva de 100 kPa), mantendo válvulas da câmara fechadas.
- Abrir programa Triax 2003, dar “SCAN”, esperar os 30 segundos e clicar em “G1”. Na tela de leitura dos transdutores colocar velocidade de ruptura (mm/min) adotada para usar no ensaio. Depois, proceder todos os passos do programa já descritos até chegar na tela da Figura A39 e montar a referida trajetória de cisalhamento.

Figura A39 – Tela de trajetórias de tensões para o cisalhamento.

Nr.	Bezeichnung	Parameter	Wert	Abbruchkriterium	Wert	Tastzeit [s]
1	Konsolidierung	radial stress = constant	600	keine Bedingung		
2	Konsolidierung	Pressure 1 constant	500	User Steuerung		15
3	Scheren	Speed	0.05	Maximale Dauer in Minuten	15	15
4	Scheren	Speed	0.05	Maximale Dauer in Minuten	60	30
5	Scheren	Speed	0.05	Maximale Dauer in Minuten	140	60
6	Scheren	Speed	0.05	Maximale Dauer in Minuten	200	120
7	Scheren	Speed	0	User Steuerung		600
8						

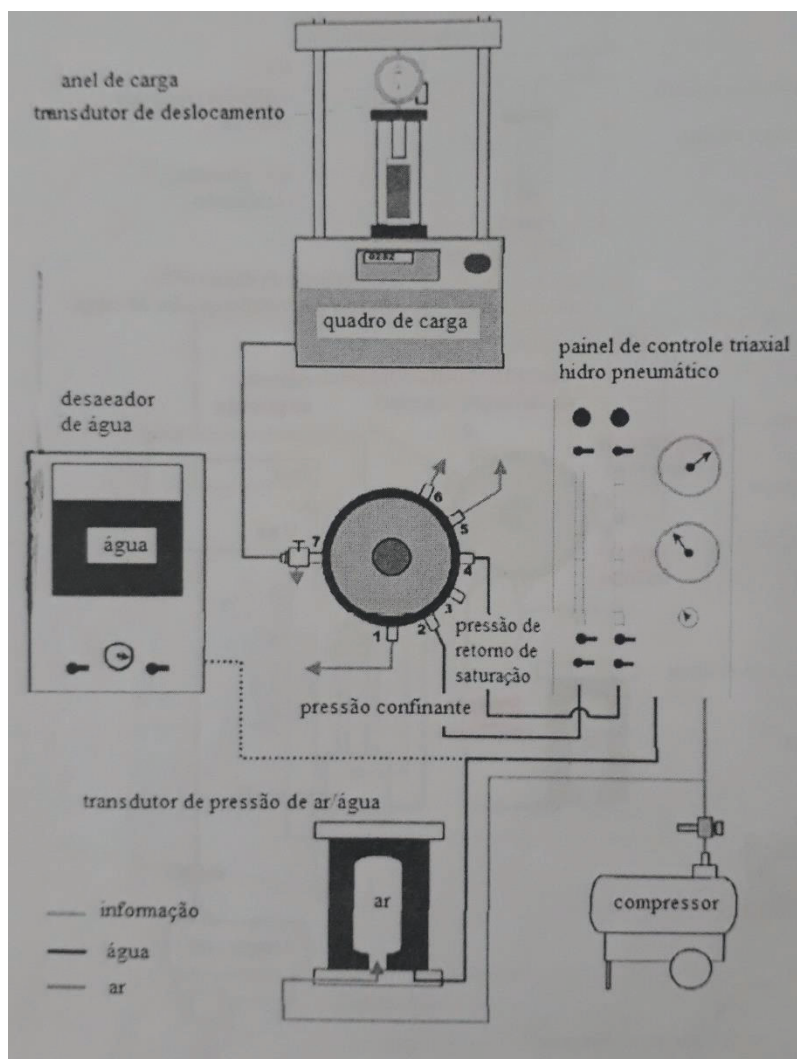
- Selecionar nas duas primeiras linhas da tabela as opções referentes a consolidação para fazer o ajuste das pressões confinante e poropressão. Colocar tempo de 15 segundos.
- Selecionar nas próximas linhas a fase de cisalhamento (Shear).
- Selecionar velocidade de ruptura (Speed) para o ensaio. **Obs.:** os valores 0.05 mostrados na coluna 4 da tabela (Figura A39) correspondem a velocidade de ruptura que foi adotada para um ensaio teste. Portanto, deve-se selecionar o valor correspondente a velocidade adotada para o ensaio desejado.
- Lembrar de programar a parada da prensa adicionando uma linha de velocidade (speed) zero (conforme marcação na Figura A39).
- Selecionar rotinas e tempos de leituras.
- Clicar em “Start” e salvar o arquivo com a rotina de cisalhamento.

- As primeiras leituras (linhas de consolidação) serão realizadas com as válvulas da câmara ainda fechadas para ajustar as pressões.
- Quando as pressões estiverem ajustadas, clicar em “Zeile +” para passar para a fase de cisalhamento.
- A prensa será acionada, ou seja, começará a piscar a luz vermelha do botão “UP e DOWN” e a câmara irá subir na velocidade que foi colocada no programa (velocidade de ruptura recomendada para o tipo de solo).
- **OBS.:** Os tempos adotados para as leituras do programa podem ser modificados durante o andamento do ensaio. Para tal fim, clicar em “STOP” para parar momentaneamente as leituras do programa. Depois, clicar na linha a qual se deseja alterar o tempo e trocar o valor.
- Clicar na opção “weiter” para retomar leituras.
- Abrir na câmara a conexão 2 (confinante).
- **OBS.:** Para o ensaio triaxial do tipo CD a drenagem deve ficar aberta durante a fase de cisalhamento, ou seja, abre-se a válvula 4 da câmara (poropressão do topo). A drenagem é lenta, pois, ensaios CD devem ser realizados lentamente. Portanto a poropressão da base não é aberta. Para o ensaio CU (consolidado não drenado) como não há drenagem, as válvulas 3 e 4 ficam fechadas até o final do cisalhamento.
- Abrir conexões 5a e 5b para conferir a medida de confinante e de poropressão no transdutor da câmara (fazer regra de 3) e depois fechá-las.
- Abrir a válvula da conexão 6 da câmara para o transdutor realizar as leituras (fica aberta tanto para o ensaio CD quanto para o ensaio CU).
- Quando o pistão encostar na célula de carga começarão as leituras.
- Acompanhar leituras de força, deformação axial e U2.
- Em geral, prosseguir o ensaio até a amostra apresentar entre 15 e 20% de deformação ou até identificar a ruptura da mesma por cisalhamento.
- Para finalizar o ensaio deve-se clicar em “beenden” no programa. Posteriormente, deve-se reduzir as pressões a zero no hidro-pneumático.
- Fechar todas as válvulas da câmara e esvaziá-la. Retirar campânula e a amostra.
- Verificar formatos assumidos pelo CP.
- Medir três alturas e três diâmetros da amostra rompida para correção de área.
- Descer o cursor da prensa até aproximadamente 0 mm (botão “down” da prensa).

A6. Operação do equipamento no modo manual

- A Figura A40 apresenta um fluxograma sistemático da instalação do equipamento para o modo manual.

Figura A40 – Fluxograma sistemático da instalação do equipamento para o modo manual.



- Para a realização do ensaio no modo manual poderá tanto ser utilizada a célula de carga como também um anel dinamométrico (Figura A41), com capacidade de carga condizente com o tipo de solo a ser utilizado no ensaio.

Figura A41 – Anel dinamométrico instalado na prensa.



- Nesse modo torna-se dispensável o uso da bureta de mudança de volume automática, do DS 15 (aquisição de dados) e do computador. O volume de água será controlado pela bureta do hidro-pneumático.
- A montagem das conexões se altera nesse modo, ficando da seguinte maneira:
 - Desconectar do hidro-pneumático a mangueira que sai da conexão “Air Supply” da bureta automática.
 - Desconectar a mangueira que sai da conexão “Cell” da bureta automática da ligação 3 e 4 da câmara na prensa.
 - Conectar a mangueira que sai da ligação 3 e 4 da câmara na conexão referente a bureta da poropressão no hidro-pneumático (conexão das opções “MEASURING” ou “OUTLET”).

- A instalação da amostra na prensa se dá da mesma forma já citada anteriormente.
- Com a opção MANUAL no visor da prensa proceder passos já citados para zerar célula de carga (se for usar a mesma). Se for usar o anel dinamométrico não há necessidade.
- Zerar o transdutor de pressão.

A6.1 Passos para fase de percolação da amostra

- Seguir procedimentos já citados anteriormente.

A6.2 Passos para fase de saturação da amostra

- Com todas válvulas da câmara fechadas, conectar na ligação 3 e 4 a mangueira correspondente a bureta de poropressão do hidro-pneumático.
- Aplicar a trajetória de saturação da amostra (tensão confinante e poropressão) até atingir um valor razoável para o parâmetro B (quanto mais próximo de 1, melhor). Ressalta-se que primeiro deve-se abrir a válvula 2 e depois a 4 para aplicar as pressões na amostra.

A6.3 Passos para fase de consolidação da amostra

- Fechar conexões da câmara.
- Abrir transdutor de poropressão.
- A amostra deve ser consolidada de acordo com a fase da trajetória de saturação da amostra que alcançou o parâmetro B desejado e a tensão efetiva que se pretende aplicar para obtenção da envoltória de ruptura. Exemplo: se a amostra alcançou o parâmetro B desejado na ordem dos 500 kPa de poropressão e 600 kPa de confinante e se quer uma tensão efetiva de 50 kPa, então aplicar 600 kPa de confinante e 550 kPa de poropressão que a confinante será de 50 kPa.
- Abrir válvulas 2 e 5a.
- Fechar transdutor de poropressão.
- Abrir conexão 5b.
- Verificar leitura do transdutor no visor da prensa.
- Fechar as válvulas 5a e 5b para começar o adensamento.
- Abrir a válvula da poropressão do topo (conexão 4). Ressalta-se que se pode acelerar o adensamento (em caso de solos muito argilosos) aplicando também a contrapressão pela base (ligação 3).

- Abrir válvula 6 para o transdutor realizar as medidas da confinante e da poropressão (podem ser lidas no visor da prensa).

A6.4 Passos para fase de cisalhamento da amostra

- Fechar todas válvulas da câmara.
- Abrir transdutor de poropressão e encher com água destilada.
- Zerar a célula de carga na prensa (se usar a mesma). Se usar o anel dinamométrico zerá-lo manualmente.
- Conferir se transdutor está zerado e depois fechar o mesmo.
- No hidro-pneumático deverão estar aplicadas as pressões confinantes e poropressão as quais aplicou-se na consolidação.
- Abrir a válvula 2 para aplicar a pressão confinante na amostra.
- **OBS.:** Se for ensaio CD (Consolidado Drenado) manter drenagem aberta até o final do ensaio, ou seja, abrir a poropressão do topo (válvula 4). Se for ensaio CU (Consolidado Não Drenado) manter drenagem fechada até o final do ensaio.
- Abrir válvulas 5a e 5b para conferir leitura no visor da prensa e depois fechá-las para passar para o cisalhamento.
- Abrir válvula 6 para as leituras do transdutor.
- Subir a câmara com uma rápida velocidade até que o pistão fique aproximadamente com 2 mm de folga com o anel dinamométrico e apertar botão "STOP" na prensa para a parada da câmara.
- Ajustar na prensa a velocidade de ruptura adotada para o ensaio (entre 0,01 a 0,05 mm/min para solos argilosos) e novamente acionar a subida da câmara.
- Quando o pistão estiver completamente ajustado no "top cap" e o anel centralizado ao pistão começará a aplicação de carga na amostra.
- As leituras do deslocamento do anel deverão ser inseridas na equação de calibração do anel utilizado para determinar as cargas aplicadas na amostra.
- As leituras correspondentes ao deslocamento vertical da amostra podem ser lidas (em mm) no próprio visor da prensa, para posteriormente calcular a deformação.
- Recomenda-se realizar leituras: nos primeiros 15 segundos da aplicação de carga, a cada 1 minuto (para os primeiros 15 min. de ensaio) e a cada 15 minutos até o final do ensaio.
- O ensaio não deverá ser interrompido antes da ruptura da amostra por cisalhamento ou até que a mesma atinja aproximadamente 15% de deformação.

- Ao final do ensaio, reduzir as tensões a zero, fechar todas as válvulas e esvaziar a câmara.
- Retirar a amostra e verificar formatos assumidos pela mesma para correção de área (tirar três medidas de diâmetro e três medidas de altura).