

# Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico

*Study of the mechanical and hydric behavior of the use of water treatment station sludge in mixtures with lateritic clay soil*

- **Data de entrada:**  
23/05/2021
- **Data de aprovação:**  
11/04/2022


Luciéle da Silva Knierim<sup>1\*</sup> | Lucas Delongui<sup>1</sup> | Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.021>

## ORCID ID

Knierim LS  <https://orcid.org/0000-0002-2380-4074>

Delongui L  <https://orcid.org/0000-0001-8068-0111>

Pinheiro RJB  <https://orcid.org/0000-0003-1444-9493>

## Resumo

O resíduo que se acumula no processo de sedimentação no tratamento de água é chamado de lodo de estação de tratamento de água (LETA), o qual necessita de adequada disposição. O objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânico e hídrico do uso de LETA em misturas com solo argiloso laterítico, para aplicação em camadas de aterros sanitários. Foram avaliadas misturas com a substituição parcial de solo por LETA nas proporções de 15%, 30% e 50%. No ensaio de permeabilidade, o material mais impermeável foi a mistura 85% Solo + 15% LETA, com  $k$  igual a  $7,82E-10$  m/s. Com relação à resistência ao cisalhamento, o ângulo de atrito aumentou conforme incrementou-se LETA no solo, reduzindo 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%. Definiu-se a mistura composta de 85% Solo + 15% LETA como a melhor para aplicação em camadas de aterros.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos. Lodo de ETA. Camadas de Aterro Sanitário.

## Abstract

The residue that accumulates in the sedimentation process in the water treatment is called sludge from the water treatment plant (LETA), which needs proper disposal. The objective of this research is to evaluate the mechanical and water behavior of the use of LETA in mixtures with lateritic clay soil, for application in layers of landfills. Mixtures with partial replacement of soil by LETA were evaluated in the proportions of 15%, 30% and 50%. In the permeability test, the most impermeable material was the mixture 85% Solo + 15% LETA, with  $k$  equal to  $7.82E-10$  m / s. With respect to shear strength, the friction angle increased as the LETA in the soil increased, reducing the cohesion of the materials. From soil to mixture 50% Soil + 50% LETA there was a reduction in effective cohesion of 41.13% and an increase in the effective friction angle of 74.68%. The mixture composed of 85% Soil + 15% LETA was defined as the best mixture for application in layers of landfills.

**Keywords:** Solid Waste. WTP Sludge. Landfill Layers.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria - Rio Grande do Sul - Brasil.

\* **Autora correspondente:** [luhknierim@gmail.com](mailto:luhknierim@gmail.com).

## 1 INTRODUÇÃO

As águas provenientes de mananciais subterâneos 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 nelas 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, aglomeram-se 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 de tratamento e disposição adequados.

Esse 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.

O LETA até os anos 2000 era descartado em corpos d'água, sem nenhum tratamento adequado, propiciando aspectos negativos à qualidade da água. No entanto, essa prática foi abolida pela resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 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 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.

Em muitos países, como Estados Unidos, Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália e África do Sul, 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, entre as quais se destacam: 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).

No Brasil, a execução de camadas 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 à própria extração, não apresentando viabilidade econômica. Além disso, os autores 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).

A utilização do lodo de estação de tratamento de água em conjunto com solo 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 foi 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. Portanto, essa pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento mecânico e hídrico do uso de lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

O solo utilizado na pesquisa foi coletado junto ao aterro sanitário da Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), localizada na cidade de Giruá, estado do Rio Grande do Sul. 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. O lodo de estação de tratamento de água utilizado na pesquisa é proveniente da estação do município de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, na empresa CORSAN, localizada na Rua Elízio Dorneles, Chácara das Flores.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Misturas

As misturas estudadas são apresentadas no Quadro 1. É importante destacar que as misturas foram calculadas em relação ao peso seco dos materiais, sendo que os mesmos foram secos ao ar até atingir a umidade de aproximadamente 10%. Houve necessidade da secagem dos materiais em função da umidade natural (quando obtidos *in situ*) dos mesmos, sendo em torno de 25% a do solo e 110% a do LETA.

**Quadro 1** - Misturas estudadas na pesquisa.

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

### 2.2.2 Ensaios de caracterização

Os ensaios de caracterização do solo, do LETA e das misturas solo+LETA foram realizados de acordo com as seguintes normativas:

- Peso específico real dos grãos: NBR 6458 (ABNT, 2016), utilizando a fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm;
- Análise granulométrica: NBR 7181 (ABNT, 2016). A análise granulométrica do LETA foi realizada a laser;
- Limite de Liquidez: NBR 6459 (ABNT, 2016);
- Limite de Plasticidade: NBR 7180 (ABNT, 2016);
- Classificação MCT: DNER-ME 256/94 e DNER-ME 258/94. Ainda, foi realizado o ensaio pelo método das pastilhas, de acordo com o proposto por Nogami e Villibor (1994).

### 2.2.3 Ensaio de compactação

Neste estudo prevaleceu a utilização da energia intermediária, sendo o ensaio realizado com reuso de material. Ressalta-se que pela má trabalhabilidade e pelo alto poder de absorção de água do LETA não foi possível realizar o ensaio de compactação desse material (100% LETA). Os ensaios de compactação seguiram as diretrizes da norma NBR 7182 (ABNT, 2016).

### 2.2.4 Ensaio de permeabilidade

A determinação do coeficiente de permeabilidade do solo e das misturas solo+LETA foi realizada seguindo os procedimentos da NBR 14545 (ABNT, 2000). 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 pela Norma Brasileira. Na metodologia MCT, de acordo com Villibor e Nogami (2009), o ensaio é feito de maneira expedita e simplificada, onde o próprio cilindro é empregado como um permeâmetro de parede rígida.

### 2.2.5 Ensaio de cisalhamento direto

Nesta pesquisa, a execução do ensaio seguiu as diretrizes da norma americana ASTM: D3080 - 11. Os ensaios para o solo e para as misturas solo+LETA foram realizados em duas condições, umidade natural (CN) e inundados (CI). Para cada tensão normal aplicada obteve-se um valor de tensão cisalhante de ruptura, permitindo o traçado da envoltória de ruptura. As tensões normais aplicadas foram de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa, sendo estas definidas pois visa-se à aplicação das misturas como camada de cobertura (*covers*) e fundo (*liners*) e em pequenos aterros, de 10 a 15 m de altura. Dessa forma, essas tensões são condizentes com aterros desse porte.

### 2.2.6 Ensaio de compressão triaxial

Optou-se pela realização de ensaios consolidados, drenados, na condição saturado, conhecido como ensaio CD. Após o processo de adensamento, cada corpo de prova foi submetido ao cisalhamento. As tensões confinantes aplicadas a cada CP foram de 25 kPa, 50 kPa, e 100 kPa. Essas, na envoltória de ruptura se referem à tensão confinante ( $\sigma_3'$ ), que também pode ser dita como tensão principal menor.

A partir das tensões de ruptura em cada pressão de confinamento, foram definidas as envoltórias de ruptura em diagramas  $q \times p'$  de Lambe e Whitman (1969), onde também foram representadas as trajetórias de tensões. A partir destes gráficos, foram definidos os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais.

## 3 RESULTADO E DISCUSSÕES

### 3.1 Ensaio de caracterização

A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização e a classificação para o solo para as misturas solo+LETA e para o LETA. Destaca-se que nesta tabela é apresentada a média de cada resultado.

Ao analisar os resultados obtidos para o peso específico real dos grãos – Tabela 1 – nota-se uma redução no parâmetro com o aumento da porcentagem de substituição de solo por LETA, passando de 27,02 kN/m<sup>3</sup> do solo para 22,97 kN/m<sup>3</sup> para a mistura 50% Solo + 50% LETA, fato justificado pelo baixo peso específico real dos grãos do LETA (22,62 kN/m<sup>3</sup>). Os valores encontrados nessa pesquisa são justificados pelos resultados obtidos por Vandermeijden e Cornwell (1998), onde o peso específico real dos grãos de vários LETAs variou entre 20,50 kN/m<sup>3</sup> e 22,60 kN/m<sup>3</sup>.

Com relação aos resultados obtidos pela análise granulométrica – apresentados na Tabela 1 – fica evidente, ao comparar as amostras com e

sem defloculante, que o solo 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%).

**Tabela 1** - Resumo dos ensaios de caracterização.

Mistura	Solo	LETA	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 (2,0 - 0,6 mm)	0/1*	-	5/23*	10/21*	15/20*
% areia média (0,6 - 0,2 mm)	1/1*	-	7/13*	10/19*	12/15*
% areia fina (0,2 - 0,06 mm)	13/8*	-	59/16*	55/23*	41/24*
% silte (0,06 mm - 2 µm)	23/73*	-	11/23*	6/16*	7/17*
% argila (< 2 µm)	57/12*	-	14/21*	12/14*	11/12*
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	27,02	22,62	26,28	24,08	22,97
LL (%)	66	164/62**	75	70	75
LP (%)	55	143/59**	43	54	65
IP (%)	11	21/3**	32	17	10
Classificação MCT (Método Imersão)	LG'	-	LG'	LG'	LG'
Classificação MCT (Método Pastilhas)	LA'-LG'	-	LG'	LG'	LG'

\*Análise granulométrica sem uso de defloculante; \*\*Limites de Atterberg em relação ao peso úmido do material;  $\gamma_s$ : peso específico real dos grãos; LL: Limite de Liquidez; LP: Limite de Plasticidade; IP: Índice de Plasticidade.

Pela Tabela 1 também foi identificada a alteração das características de granulometria das misturas de solo+LETA, se comparadas ao solo natural. 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, em função do comportamento distinto do LETA. 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. Esse fato ocorreu em função de o LETA conter coagulante com alta concentração de alumínio, logo o defloculante na proporção designada por norma não foi suficiente para deflocular o lodo, ou seja, o lodo provocou agregações.

Embora as frações do LETA não possam ter sido determinadas pelo método tradicional, o ensaio de granulometria a laser indicou que o material

é composto por 1,72% de argila, 10,33% de silte e 87,95% de areias. Portanto, o LETA tem areia como fração preponderante. A baixa porcentagem de argila no LETA pode ser creditada ao efeito da floculação proporcionada pelo alumínio contido no coagulante utilizado na ETA.

Percebe-se ainda, pela Tabela 1, 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. Nas substituições de 15% e 30% de solo por LETA, a plasticidade foi aumentada pelo rearranjo dos vazios no solo com a inclusão do material. 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 1, é possível observar os 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.

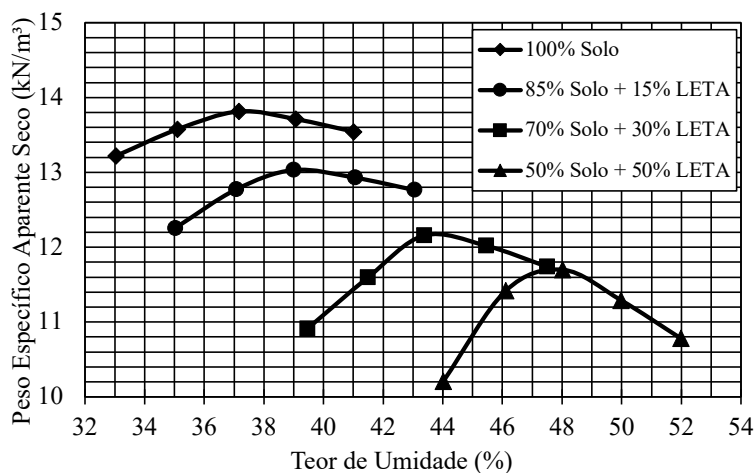
Os valores elevados de LL e LP podem ter relação direta com a umidade natural do material, que é em torno de 110%, em função do alto poder de absorção de água do LETA, e também pela característica distinta do material. Considera-se, ainda, em relação aos Limites de Atterberg do LETA, que os mesmos foram 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, obtive-

ram-se valores médios de 62% e 59%, respectivamente. O IP do material foi igual a 3%, caracterizando o material como ligeiramente plástico ( $1 < IP < 5$ ), de característica arenosa.

Quanto à classificação MCT – de acordo com o apresentado na Tabela 1 – para as duas metodologias de ensaio todos os materiais (solo e solo+LETA) apresentaram comportamento laterítico argiloso e foram classificados como LG' ou LA'-LG'. Materiais com essas classificações apresentam granulometria típica de argilas e argilas arenosas, alta capacidade de suporte, baixa perda de massa por imersão, baixa expansão, de média a alta contração, baixa permeabilidade e de média a alta plasticidade.

### 3.2 Ensaios de compactação

A Fig. 1 apresenta as curvas de compactação médias, obtidas a partir de três curvas, para cada mistura do estudo.



**Figura 1** - Curvas de compactação média na energia Proctor Intermediária.

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. Esse 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%).

Percebe-se também – pela Fig. 1 – 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. Esse 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. O menor valor de peso específico aparente seco máximo e, conseqüentemente, a maior umidade ótima foram obtidos para a mistura de 50% Solo + 50% LETA, com valores 11,70 kN/m<sup>3</sup> e 47,7%, respectivamente.

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  $\gamma_d$  igual a 16,25 kN/m<sup>3</sup> e as misturas 85% Solo + 15% LETA e 65% Solo + 35% LETA apresentaram peso específico aparente seco máximo de 14,50 e 12,70 kN/m<sup>3</sup>, 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.

### 3.3 Permeabilidade

Os valores de coeficiente de permeabilidade, obtidos pelas diretrizes da NBR 14545 (ABNT, 2000) e pela metodologia MCT, foram apresentados na Tabela 2. 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 serem constituídos 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 1,00E-09 até 1,00E-11 m/s).

**Tabela 2** - Coeficientes de permeabilidade das misturas em estudo.

Mistura	NBR 14545 (ABNT, 2000)				MCT
	k (m/s)				k (m/s)
	AM01	AM02	AM03	MÉDIA	AM01
Solo	2,13E-09	2,07E-09	2,15E-09	2,12E-09	1,86E-09
85% Solo + 15% LETA	7,83E-10	7,72E-10	7,90E-10	7,82E-10	6,61E-10
70% Solo + 30% LETA	3,55E-09	3,46E-09	3,50E-09	3,50E-09	4,47E-09
50% Solo + 50% LETA	2,56E-06	2,42E-06	2,48E-06	2,49E-06	2,77E-06

k: coeficiente de permeabilidade; AM: amostra.

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 contínua. 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 entre 1,00E-04 até 1,00E-07 m/s).

Os resultados encontrados nesta pesquisa vão ao encontro dos resultados encontrados por Santos, Scapin e Pinheiro (2018), que analisaram um solo siltoso-argiloso de Santa Maria/RS e misturas de solo+LETA. Na análise, os autores encontraram o coeficiente de permeabilidade para o solo de  $3,84E-10$  m/s, para mistura 85% Solo + 15% LETA o k foi igual a  $4,02E-10$  m/s e para mistura 65% Solo + 35% LETA obtiveram o valor de k igual a  $2,05E-9$  m/s. Portanto, na pesquisa citada, ao adicionar 15% de LETA em substituição ao solo, houve uma redução no valor de k e, quando adicionados 35% de LETA na substituição ao solo, houve um aumento no coeficiente de permeabilidade, fato semelhante ao ocorrido nesta pesquisa.

### 3.4 Resistência ao cisalhamento

A Fig. 2 apresenta as envoltórias de ruptura obtidas nos ensaios de cisalhamento direto nas condições natural (umidade ótima) e inundada. Ao analisar a Fig. 2, quanto ao ensaio de cisalhamento direto, em 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 à condição natural. Isso, em consequência, reduziu os parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno dos materiais, quando comparados aos ensaios realizados na condição natural. 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.

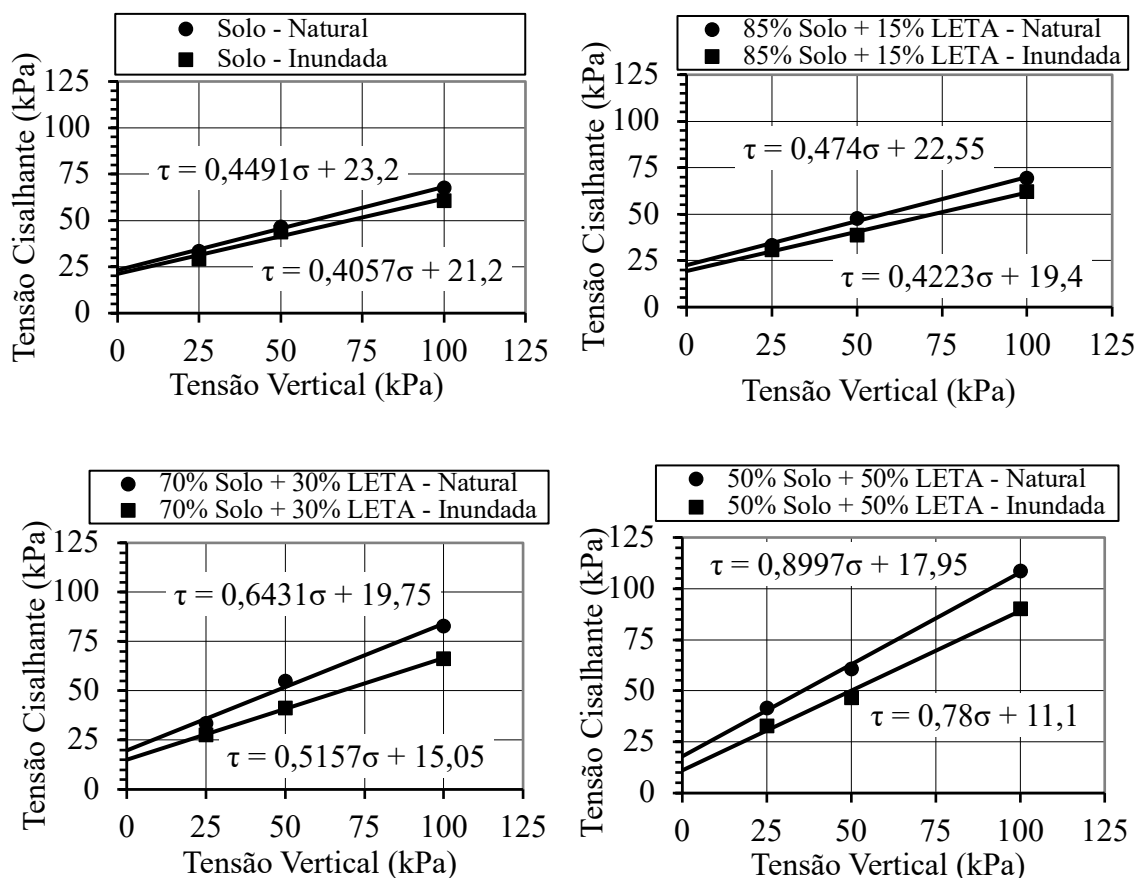
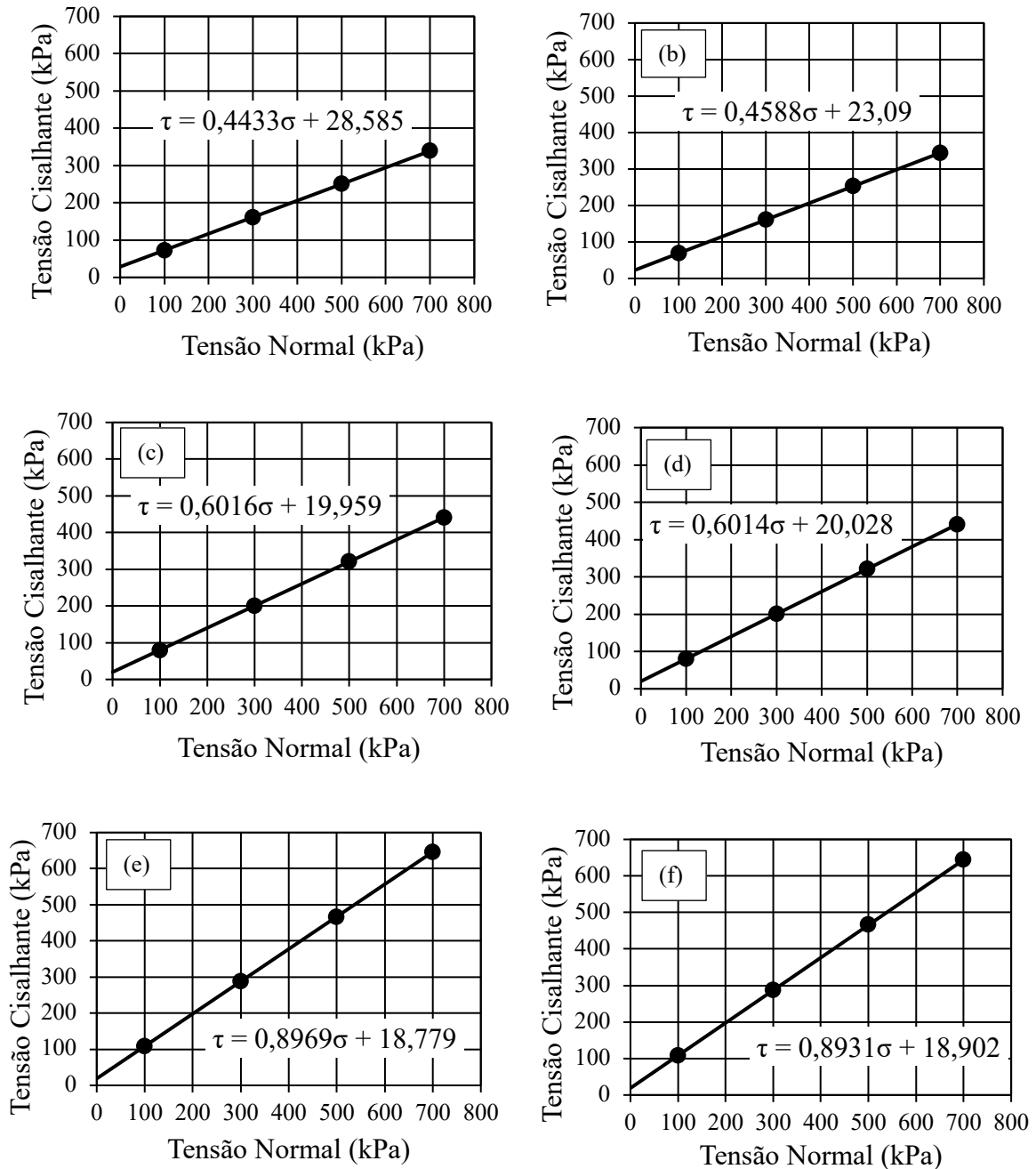


Figura 2 - Envoltória de ruptura de cisalhamento - Ensaio de Cisalhamento Direto.



No ensaio triaxial, a partir das tensões de ruptura foi possível traçar as trajetórias de tensões, a envoltória de resistência ao cisalhamento e, em consequência, determinadas as envoltórias de ruptura, sendo estas últimas apresentadas na Fig. 3. Em específico, na Fig. 3, os gráficos (c) e (d)

se referem aos 2 ensaios realizados para mistura 70% Solo + 30% LETA, assim como os gráficos (e) e (f) se referem aos 2 ensaios realizados para a mistura 50% Solo + 50% LETA. Os ensaios dessas duas misturas foram repetidos a fim de dar mais credibilidade aos resultados encontrados.



**Figura 3** - Trajetória de tensões e envoltória de resistência ao cisalhamento para: (a) solo; (b) 85% Solo + 15% LETA; (c) e (d) 70% Solo + 30% LETA; (e) e (f) 50% Solo + 50% LETA.

Destaca-se, pelos gráficos apresentados na Fig. 3, que 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, mesmo que aqui não sejam apresentados os gráficos de tensão-deformação, que o solo apresentou ruptura por deformação para todas as tensões confinantes ensaiadas, ou seja, ruptura plástica. Já as misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA apresentaram ruptura por cisalhamento para todas as tensões confinantes ensaiadas, com superfície de ruptura bem definida (ruptura frágil)

Pela ruptura plástica pode-se dizer que o solo tem comportamento típico de solo natural e normalmente adensado em sua condição indeformada, ou também de argila de consistência plástica. Já o comportamento frente à ruptura das misturas solo+LETA, que apresentaram pico de ruptura definido, é característico 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 pode ser atribuída a uma maior proximidade das partículas, devido, possivelmente, à inclusão do lodo de estação de tratamento de água. Nesses

casos, para determinação das envoltórias, obtém-se a resistência de pico.

Na Tabela 3 estão compilados e apresentados os resultados do ensaio de compressão triaxial e de cisalhamento direto. Com relação aos ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto – em paralelo aos resultados expostos na Tabela 3 — podem-se fazer as seguintes observações:

- 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 resultados obtidos;
- O resultado de resistência ao cisalhamento encontrado para o solo é característico do material compactado. 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, fazendo 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. Dessa forma, os valores de  $c'$  igual a 27,6 kPa e  $\Phi'$  igual a 24,0° são justificados pelas frações de argila, silte e areia presentes no material;

**Tabela 3** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo e misturas em estudo.

Mistura	Ensaio	Compressão Triaxial		Cisalhamento Direto			
		Trajetória de Tensões		Natural		Inundada	
		$c'$ (kPa)	$\Phi'$ (°)	$c$ (kPa)	$\Phi$ (°)	$c$ (kPa)	$\Phi$ (°)
Solo	1	27,6	24,0	23,2	24,1	21,2	22,0
85% Solo + 15% LETA	1	21,3	24,9	22,5	25,3	19,4	22,8
70% Solo + 30% LETA	1	18,5	31,2	19,7	32,7	15,0	27,2
	2	18,8	31,1	-	-	-	-
	Média	18,6	31,1	-	-	-	-
50% Solo + 50% LETA	1	16,4	42,0	16,9	41,9	11,1	37,9
	2	16,1	41,9	-	-	-	-
	Média	16,2	41,9	-	-	-	-

$c'$ : coesão efetiva;  $\Phi'$ : ângulo de atrito interno efetivo;  $c$ : coesão;  $\Phi$ : ângulo de atrito interno.; NAT: condição natural; IN: condição inundada.

- O maior ângulo de atrito efetivo foi encontrado para a mistura com 50% Solo + 50% LETA (42,0°). As misturas de 85% Solo + 15% LETA e 70% Solo + 30% LETA apresentaram ângulo de atrito efetivo de 24,9° e 31,2°, respectivamente. Esses valores são maiores do que os encontrados para o solo, logo a inclusão de LETA no solo propiciou o aumento do ângulo de atrito efetivo, sendo maior quanto maior a quantidade de LETA incorporado;
- Com relação à coesão efetiva, todas as misturas com LETA apresentaram redução no parâmetro se comparadas ao solo. O solo apresentou  $c'$  de 27,6 kPa, enquanto as misturas 85% Solo + 15% LETA, 70% Solo + 30% LETA e 50% Solo + 50% LETA apresentaram coesão efetiva de 21,3 kPa, 18,6 kPa e 16,3 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.

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.

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°. Dessa forma, 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.

### 3.5 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, em formato de *check list*, para verificar a possibilidade de aplicação de cada um dos materiais, apresentados no Quadro 2. Destaca-se que as normativas citadas não apresentam requisitos de resistência ao cisalhamento para os aterros sanitários. No entanto, esses parâmetros serão analisados em conjunto com a análise dos requisitos apresentados.

Com relação ao Quadro 2 são apresentadas as principais considerações:

- O solo atendeu a requisitos impostos pelas normas, exceto o coeficiente de permeabilidade imposto pela norma alemã. A mistura que apresentou melhor desempenho foi a composta de 85% de Solo + 15% de LETA, atendendo, inclusive, aos requisitos mais críticos de coeficiente de permeabilidade;
- A mistura composta de 70% de Solo + 30% LETA atende aos requisitos obrigatórios das normas apresentadas, exceto o coeficiente de permeabilidade imposto pela norma alemã. Logo, frente à permeabilidade, essa mistura apresentou aumento no  $k$ , em função da maior inclusão de LETA, se comparada à mistura 85% Solo + 15% LETA;

já a mistura com 50% de lodo de ETA não atendeu a nenhum dos requisitos obrigatórios em termos de permeabilidade;

- Com relação à norma brasileira, que somente apresenta requisito de coeficiente de permeabilidade, todos os materiais, exceto a mistura

50% Solo + 50% LETA, poderiam ser aplicados 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.

**Quadro 2** - Verificação da aplicação dos materiais 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 <sup>®</sup> ) [m/s]	$\leq 5 \times 10^{-7}$	X		SIM	SIM	SIM	NÃO
k (USEPA <sup>**</sup> ) [m/s]	$\leq 10^{-7}$	X		SIM	SIM	SIM	NÃO	
k (Alemã <sup>***</sup> ) [m/s]	$\leq 5 \times 10^{-10}$	X		NÃO	SIM	NÃO	NÃO	
PP#200 (USEPA <sup>**</sup> ) [%]	$\geq 30$	X		SIM	SIM	SIM	SIM	
LL (USEPA <sup>**</sup> ) [%]	$\geq 30$	X		SIM	SIM	SIM	SIM	
Camada de Base	Parâmetro	Condição para aplicação	Requisito		Material/Verificação da Aplicação			
			O	D	SOLO	85/15	70/30	50/50
	k (NBR <sup>®</sup> ) [m/s]	$\leq 10^{-8}$		X	SIM	SIM	SIM	NÃO
	k (USEPA <sup>**</sup> ) [m/s]	$\leq 10^{-9}$	X		SIM	SIM	SIM	NÃO
	k (Alemã <sup>***</sup> ) [m/s]	$\leq 10^{-10}$	X		NÃO	SIM	NÃO	NÃO

O: obrigatório; D: desejável; 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; <sup>®</sup> NBR 13896 (ABNT, 1997); <sup>\*\*</sup> USEPA (1998); <sup>\*\*\*</sup> TA Siedlunsabfall (1993).

Com os resultados acima discutidos em conjunto com os demais obtidos na pesquisa, podem-se fazer as seguintes considerações: em termos de resistência ao cisalhamento as misturas solo+LETA apresentaram melhoria no ângulo de atrito se comparadas ao solo, reduzindo a coesão da mistura. Em conjunto com os requisitos obrigatórios do Quadro 2, 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 esse 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.

#### 4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados de caracterização clássica da Mecânica dos Solos, o solo foi caracterizado como um material argiloso laterítico.

Conforme aumentou-se a substituição do solo por LETA, houve redução nas frações de silte e argila e, em consequência, um aumento na fração arenosa e redução do peso específico real dos grãos. A inclusão de LETA também modificou as características de plasticidade: 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.

Quanto aos materiais compactados, identificou-se uma tendência de redução do peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima com o aumento da porcentagem de LETA na mistura, justificado pelo baixo peso específico real dos grãos do LETA. O material mais impermeável foi a mistura 85% Solo + 15% LETA com k igual a  $7,82 \times 10^{-10}$  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 de solo+LETA apresentaram ruptura por cisalhamento, caracterizando-se 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%. 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.

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, pois a melhora da resistência ao cisalhamento da mistura permite a execução de aterros sanitários com maior altura, taludes mais íngremes e mais seguros.

## 5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

## 6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of ASTM Standards, 2011, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, RJ, 2004, 71 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13896**: Aterro de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ, 1997, 12 p.

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

\_\_\_\_\_. **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, 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 2016, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 2016, 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 2016, 12 p.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA n° 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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **ME 256/94**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, RJ, DNER, 1994, 6 p.

\_\_\_\_\_. **ME 258/94**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, RJ, DNER, 1994, 14 p.

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 Biosólidos. **Anais...**Campinas, SP, 2010.

GUNEY, Y; CETIN, B; AYDILEK, A. H.; TANYU, B. F.; KOPARAL, S. Utilization of sepiolite materials as a bottom liner material in solid waste landfills. **Waste Management**, v. 34, 2014, p. 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.008>

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. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000400002>

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

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**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, SP, 134 p., 2016.

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, p. 1293-1300.**

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

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, 2008, p. 85-97. <https://doi.org/10.1680/warm.2009.162.2.85>

O'KELLY, B. C.; QUILLE, M. E. Shear strength properties of water treatment residues. **Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering**, v. 163, n. 1, 2010, p. 23-35. <https://doi.org/10.1680/geng.2010.163.1.23>

REGADÍO, M.; RUIZ, A.; RODRÍGUEZ-RASTRERO, M.; CUEVAS, J. Containment and attenuating layers: na affordable strategy that preserves soil and water from landfill pollution. **Waste Management**, v. 46, 2015, p. 408-419. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.014>

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.

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. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...Salvador, Bahia. 2018.**

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

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

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

WANG, M. C.; HULL, J. Q.; JAO, M.; DEMPSEY, B. A.; CORNWELL, B. A. Engineering behavior of water treatment sludge. **Journal of Environmental Engineering**, v. 118, n. 6, 1992, p. 8448-864.

WATANABE, Y.; KMINE, H.; YASUHARA, K.; MURAKAMI, S. Batch leaching test focusing on clod size of drinking water sludge and applicability to long-term prediction using column leaching test. In: Advances in Geotechnical Engineering 2011. **Anais...ASCE, 2011.**