

## Caracterização do lodo de estação de tratamento de esgoto para aplicação em cobertura de aterros sanitários

*Physical characterization of sewage sludge from a wastewater treatment plant  
for application in landfill cover*



**Ana Carolina Martins Matos**

Graduanda do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária (UNIPAM).  
e-mail: [anacarolina.mm@outlook.com](mailto:anacarolina.mm@outlook.com)

**Nancy Tiemi Isewaki**

Especialização em Geometria e Terraplenagem Rodoviária pela Universidade FUMEC.  
Professora orientadora (UNIPAM). e-mail: [nancyti@unipam.edu.br](mailto:nancyti@unipam.edu.br)

---

**RESUMO:** O presente trabalho teve como objetivo contribuir para o conhecimento da composição do lodo de esgoto de uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), caracterizando seus parâmetros físicos, visando empregá-lo em camadas de cobertura de aterros sanitários, substituindo o solo, ou como agregado. Utilizando preceitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) quanto à caracterização de solos, os ensaios desenvolvidos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), com o solo do aterro e o lodo gerado em ETE de Patos de Minas/MG, de modo a conhecer suas propriedades e realizar um comparativo entre estes materiais. Assim, foram caracterizados o solo testado, apto a ser aplicado em camadas de cobertura, e o lodo não qualificado para substituir o solo nas camadas, podendo ser aplicado como agregado. Porém, é válido ressaltar que para tal aplicação é indispensável à realização de novas análises.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo de Esgoto. Aterros Sanitários. Caracterização.

**ABSTRACT:** The present work had the objective to contribute to the knowledge of the composition of sewage sludge from a Wastewater Treatment Plant (WWTP), characterizing its physical parameters, aiming to use it in layers of landfill cover, replacing the soil, or as an aggregate. Using precepts covered by the Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), about the soil characterization, the tests developed were performed at the Soil Mechanics Laboratory of the Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), with the soil present in the landfill and the sludge generated in WWTP, both situated in Patos de Minas/MG, in order to know their properties and to make a comparison between these materials. Thus, the soil tested was suitable to be applied in cover layers and the sludge with

characteristics that do not qualify it to replace the soil in the layers, being able to be applied as an aggregate. However, it is worth mentioning that for such application, it is indispensable to perform new analyzes.

**KEYWORDS:** Sewage sludge, Landfills covers, Characterization.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A partir das atividades humanas, considerando o exacerbado crescimento populacional, tem-se a geração de efluentes líquidos (LOPES, 2015). Estes, quando de origem doméstica, são compostos por resíduos, necessitando tratamento prévio, conforme legislação vigente para descarte em corpos d'água, a fim de minimizar sua carga poluidora e não desencadear a perda de qualidade da água. Por isso, é crescente a instalação de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), preceito base do saneamento ambiental (FEDRIZZI, 2012).

Entretanto, tal tratamento gera subprodutos, dentre eles um resíduo conhecido por lodo de esgoto (LE), que apresenta variações em relação ao tipo de esgoto do qual deriva, bem como do sistema de tratamento adotado (ANDREOLI *et al*, 1998). De acordo com Damasceno e Campos (1998), sabe-se que o lodo de esgoto normalmente apresenta 98% de água, enquanto que da sua carga de sólidos, 70 a 80 % são matéria orgânica, abrangendo óleos e graxas. Neste lodo, são ainda encontradas quantidades significativas de contaminantes, como metais e agentes patogênicos, refletindo as características do esgoto de que provém.

Como o lodo de esgoto é gerado em demasia, necessitando de um descarte adequado, a viabilidade para aplicá-lo deve ser pesquisada, desenvolvendo-se métodos para a utilização desse resíduo. Dessa forma, realizar a caracterização físico-química e microbiológica do lodo de esgoto é fundamental para determinar se esse resíduo pode ser disposto no meio ambiente, além de apurar se este material necessita ser submetido a algum processo de estabilização e/ou higienização para posterior uso (SILVA, 2013).

A partir disto, há o desenvolvimento nos dias atuais de métodos alternativos de utilização de lodo de esgoto, destacando-se a adubação na agricultura, pelo fato de este lodo ser rico em matéria orgânica. Tal utilização tem seus critérios e procedimentos definidos pela Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2006), para a recuperação de solos degradados, de forma que o lodo seja usado em coberturas de aterros sanitários e na fabricação de produtos cerâmicos (SILVA; CHINELATO e CHINELATO, 2015).

Dentre tais aplicações supracitadas, utilizar o lodo de esgoto para cobertura diária, intermediária e final de aterros sanitários é fato recorrente em alguns países, como Estados Unidos, Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália e África do Sul. Tal aplicação é adotada especialmente quando este lodo não apresenta qualidade satisfatória para usos mais nobres, como é na agricultura (PRIM, 2011). Porém, no

Brasil, ainda é uma prática em ascensão, uma vez que tratar o esgoto por meio das ETEs é uma prática recente no país (SILVEIRA, 2014).

De acordo com Prim (2011), para cada milhão da população urbana no Brasil são geradas entre 2,80 a 4,07 mil ton/ano de lodo, sendo que a estimativa populacional de 2017 realizada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) cita que a população urbana compreende em torno 207 milhões de habitantes. Portanto, se o esgoto desta população fosse inteiramente tratado, representaria uma produção de 579,6 mil a 842,49 mil ton/ano de lodo. Assim, desenvolver estudos que viabilizem a aplicabilidade e o consequente aproveitamento de resíduos como o lodo de esgoto é um meio de contribuir para técnicas e métodos eficientes, que possibilitarão minimizar o acúmulo de tal resíduo no ambiente.

Neste contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar e comparar, através de ensaios em laboratório, realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), as características físicas do lodo de esgoto bruto proveniente da ETE localizada no município de Patos de Minas-MG, bem como do solo abrangido pelo aterro sanitário do mesmo município, visando analisar se o material alternativo pode substituir o solo ou ser agregado a ele para uso nas coberturas intermediárias e final.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. ESGOTO DOMÉSTICO

Em relação ao efluente doméstico bruto, este se compõe de 99,9 % de água e 0,1% de matéria sólida. Esta matéria é então referente aos sólidos orgânicos e inorgânicos, em suspensão e dissolvidos, bem como microrganismos (CAERN, 2014), sendo eles os responsáveis pela necessidade de tratamento para os esgotos.

### 2.2. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

De acordo com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), atribui-se a tratamento de esgotos a definição de processo de remoção de poluentes, em que o método a ser usado possui relação com suas características físicas, químicas e biológicas.

No que diz respeito ao tratamento de esgotos domésticos, os sistemas para cumprir esse propósito, a princípio, tinham a incumbência de remover a matéria orgânica e os sólidos. *A posteriori*, foi que se considerou realizar a diminuição de outros constituintes, tais como nutrientes e organismos patogênicos, sendo hoje exemplos de sistemas de tratamento de esgotos empregado aqueles que funcionam por meio de processos biológicos, aeróbios e anaeróbios, como lagoa de estabilização, reator UASB, ou lodo ativado (CESAN, 2013).

### 2.3. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Denominam-se Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) as unidades operacionais que, por meio de processos físicos, químicos ou biológicos, retiram as cargas poluentes do efluente, seja industrial ou doméstico, retornando para os corpos hídricos as águas servidas, conforme os padrões exigidos pela legislação ambiental (SILVA, 2013).

Quanto ao processo de tratamento do esgoto caracterizado como doméstico, este abrange quatro níveis basilares, sendo preliminares o tratamento primário e secundário (com funções semelhantes) e o tratamento terciário, ou pós-tratamento. Tais etapas têm o propósito de remover os sólidos suspensos, sendo lixo e partículas minerais, remover sólidos dissolvidos, matéria orgânica e organismos patogênicos (ALAMINO, 2010).

Desse processo de tratamento, físico-químico e biológico de esgotos, os subprodutos sólidos normalmente oriundos são os sólidos grosseiros e a areia que são retidos na etapa preliminar, existente em todos os sistemas, bem como a espuma, o lodo primário, o lodo biológico ou secundário e o lodo químico, produzido em estações que possuem processo físico-químico (LIMA, 2010).

#### 2.3.1. Lodo de esgoto

Acerca do lodo de esgoto, Pimentel (2012) elucida que, a despeito da maior parcela dele ser formada de água, considera-se este produto em fase sólida para ser distinguido do tratamento da fase líquida do esgoto, havendo a possibilidade de caracterizar seis tipos de lodo de acordo com estudos de von Sperling (SILVA, 2013), sendo lodo primário, lodo secundário/biológico (biológico aeróbio não estabilizado, biológico aeróbio estabilizado e biológico anaeróbio estabilizado), lodo químico e lodo misto.

Em relação às características do lodo de estação de tratamento de esgoto, esse material pode ser caracterizado como abundantemente rico em matéria orgânica, com elevado teor de umidade e grande concentração de nitrogênio e outros minerais (PRIM, 2011). Ainda, tem-se que a umidade do lodo tem implicação diretamente nas suas propriedades mecânicas.

Porém, o lodo de esgoto pode exibir componentes indesejáveis e danosos ao meio, bem como à saúde humana. A presença de agentes patogênicos no esgoto é inevitável (PIMENTEL, 2012), e é possível estarem contidos no lodo elementos como metais e poluentes orgânicos variados.

### 2.4. ATERRO SANITÁRIO

Atualmente, a medida legal mais utilizada no Brasil para a disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o aterro sanitário é um método fundamentado em critérios de energia e normas operacionais específicas, que garantem um confinamento seguro em quesito de poluição ambiental e proteção à saúde pública

(PRIM, 2011). É uma técnica arquitetada para receber os RSU produzidos pelos habitantes de uma cidade, com base em estudos de engenharia, para minimizar ao máximo os impactos causados ao meio (CONDER, 2010). Deve ser disposto em localização adequada, com elaboração de projeto minuciosa, implantação de infraestrutura de apoio, de obras de controle de poluição e adoção de regras operacionais específicas.

#### 2.4.1. Camadas de cobertura

A adoção de camadas de cobertura em um aterro sanitário faz parte dos seus procedimentos operacionais, em que as camadas executadas ao longo do processo de enchimento de um aterro são denominadas cobertura diária ou intermediária, e as efetuadas ao fim do aterramento, camada de cobertura final (CONDER, 2011).

Basicamente, estas coberturas têm a função de resguardar a superfície das células de resíduos, diminuindo os impactos ao ambiente e contendo infiltrações, o que minimiza a taxa de formação de percolados, prevenindo a migração de gás para o exterior do aterro, amortizando a exalação de odores, suprimindo a proliferação de vetores de doenças e facilitando a recomposição da paisagem, no que diz respeito à cobertura final (PRIM, 2011). Devem também apresentar resistência física e mecânica satisfatória, sobretudo devido ao contato com as intempéries que podem desencadear processos erosivos.

#### 2.4.2. Parâmetros de referência para cobertura de aterros sanitários

De acordo com Pimentel (2012), as normas brasileiras referentes ao projeto, implantação e operação de aterros sanitários, como a ABNT NBR 13896:1997, não exibem especificação técnica no que concerne tanto às propriedades geotécnicas das camadas de coberturas de modo geral, quanto em relação às características físico-químicas.

Para a avaliação e classificação dos materiais a serem utilizados em camadas de cobertura, existem apenas referências internacionais, sendo que para os parâmetros físico-químicos nas camadas de cobertura diárias e intermediárias, Griffin *et al.* (1998) explanam que lodos de ETE empregados devem ser estabilizados e com umidade inferior a 50%. Já em relação ao pH do material, para este ser considerado adequado na impermeabilização de aterros, tanto em camadas de base (inferior) como coberturas (superior), Rocca *et al.* (1993) citam que este deve ser maior ou igual a 7.

Em relação às características geotécnicas, a Tabela 1 a seguir deslinda sobre as referências quanto aos requisitos para cobertura de aterros sanitários.

**TABELA 1:** Parâmetros de referência para camadas de cobertura de aterros sanitários

PARÂMETRO	ROCCA ET AL. (1993)	QASIN E CHIANG (1994)	QIAN; KOERNER; GRAY (2002)
Classificação SUCS	CL, CH, SC ou OH	-	Solo rico em areia com argilas (SC)
% passante na #200*	> 30%	> 40%	-
LL*	> 30%	> 25%	-
IP*	> 15%	> 10%	< 50%

\* # 200 (malha da peneira utilizada na análise granulométrica, de diâmetro 0,074 mm); LL (Limite de Liquidez) e IP (Índice de Plasticidade).  
 Fonte: Adaptado de Pimentel (2012)

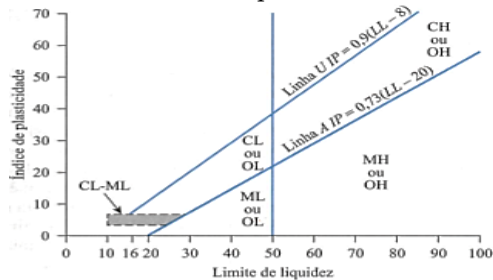
2.5. SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Regularizado pela *American Society for Testing Materials* (ASTM), o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) foi desenvolvido por Arthur Casagrande na década de 1940, em princípio para ser aplicado em construções de aeroportos (PINTO, 2006). Atualmente, são usados também em aterros, estradas e fundações (DNIT, 2006). Esta classificação identifica solos de acordo com as suas qualidades de plasticidade e textura, separando-os em grupos segundo o seu comportamento quando utilizados, por meio do gráfico de plasticidade (Figura 1).

A partir de tal classificação, distinguem-se os solos, sendo na classificação principal, de granulação graúda (mais de 50% em peso retido na peneira nº 200) G ou S, e solos de granulação fina (mais de 50% em peso passando na peneira nº 200) M, C ou O. Além disso, na classificação complementar, existe W, bem graduado; P, mal graduado; H, alta compressibilidade; e L, baixa compressibilidade.

A junção das duas letras, sendo da classificação principal e da complementar, define o tipo de solo analisado, de acordo com a tabela de classificação do SUCS (Tabela 2).

**FIGURA 1:** Classificação dos solos de acordo com a plasticidade.



Fonte: Das (2007)

**TABELA 2:** Classificação do solo pelo SUCS

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	GC GC GM
		5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.
% P #200 > 50	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	SC SC SM
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.

Fonte: Caputo (1988).

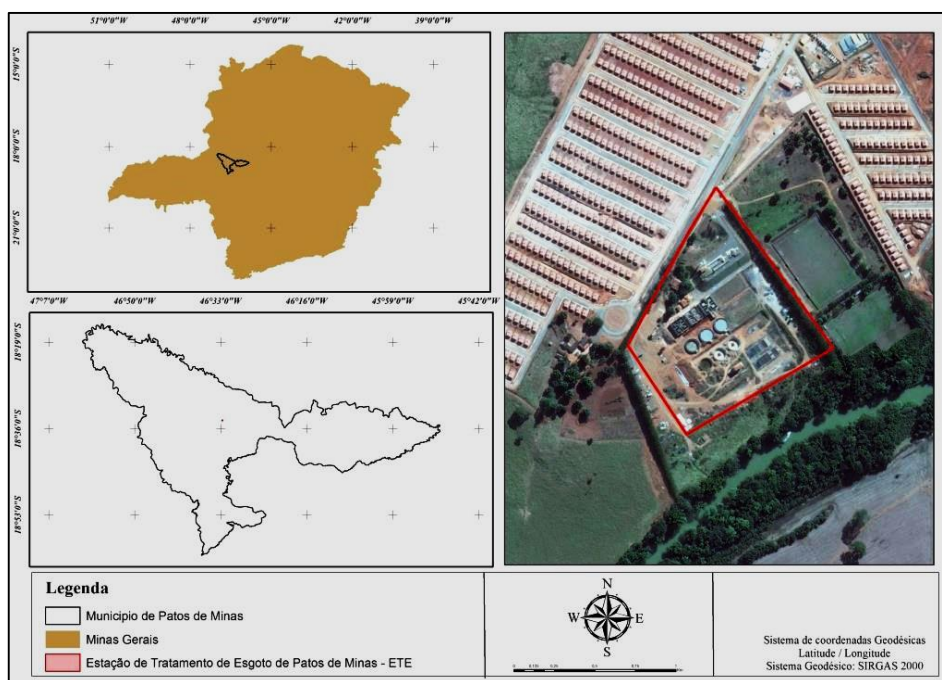
### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE AMOSTRAS

O estudo foi realizado com o uso do lodo de esgoto coletado na ETE situada em Patos de Minas, de acordo com o que dispõe a Norma Brasileira Regulamentadora ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos. No que diz respeito ao solo usado, este foi coletado no aterro sanitário municipal do município, seguindo a ABNT NBR 9604:2016 – Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas.

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Patos de Minas-MG, como demonstra a Figura 2, localiza-se em perímetro urbano, na porção noroeste do município, próximo às coordenadas 7.945.775 N; 337.050 E.

FIGURA 2. Mapa de localização da Estação de Tratamento de Esgoto de Patos de Minas-MG



O lodo foi coletado no leito de secagem da ETE (Figura 2), enquanto o local da coleta de solo no aterro sanitário municipal foi na sua área de transbordo, conforme Figura 3 a seguir, sendo o solo desta área utilizada para a cobertura das camadas na célula do mesmo.

Posteriormente, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos do UNIPAM. Com estes materiais foram realizadas as análises físicas.

**FIGURA 3.** Área de transbordo do aterro, local de coleta do solo



### 3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Para a realização das análises físicas do lodo de esgoto e solo, foram seguidos os procedimentos estabelecidos pelas ABNT NBR 6457:2016, 6459:2016, 6508:2016, 7180:2016, 7181:2016, 7182:2016.

#### 3.2.1. PREPARO DAS AMOSTRAS

O procedimento seguido para a preparação de todas as amostras, antes de serem iniciados os ensaios, foi a disposição do material utilizado em bandeja para uma rápida secagem ao ar (solo e lodo de esgoto bruto), seguido de destorroamento com auxílio de pistilo, homogeneizando as mesmas (Figura 4).

**FIGURA 4.** Amostra de lodo bruto disposto em bandeja para secagem



No que concerne a estes ensaios, para cada determinação, deve-se estabelecer repetições de amostras, especificadas nos itens a seguir para cada teste.



## 3.4. TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade foi determinado antes de qualquer tipo de secagem, de modo a averiguar tal característica antes de qualquer procedimento. Como este é variável de acordo com o ambiente em que se encontra, sempre que necessário, ele foi repetido, como na realização de testes em dias diferentes.

Seguindo as etapas determinadas na ABNT NBR 6457:2016, foram separadas cinco amostras para se obterem diferentes resultados de teores de umidade, de modo a realizar uma média entre estas, estabelecendo maior confiabilidade ao resultado. A determinação do valor do teor de umidade foi dada a partir de cálculo (Equação 1) disposto na norma supracitada.

$$\text{Umidade (\%)} = \frac{(\text{massa amostra úmida} - \text{massa amostra seca}) * 100}{(\text{massa amostra seca})} \quad (\text{Equação 1})$$

## 3.5. LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE

O limite de liquidez seguiu os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 6459:2016. Para obter pontos de ensaio que compreendam um intervalo de 35 a 15 golpes, o procedimento foi repetido por cinco vezes, sendo o intervalo conseguido através da colocação de água destilada no material utilizado ou acrescentando-se mais material que foi preparado previamente. A cada repetição foi retirada uma amostra para determinar o teor de umidade, conforme Equação 1.

A partir da obtenção dessas duas variáveis, foi construído um gráfico, relacionando-os, de maneira a delimitar pontos para traçar uma reta. Foi marcado então na reta delineada no gráfico um ponto referente ao número de golpes 25, número padrão de golpes, sendo esse ponto que determina a relação teor de umidade X nº de golpes, demarcando o limite de liquidez (LL).

Para o ensaio de plasticidade, os procedimentos seguidos são estabelecidos pela ABNT NBR 7180:2016, em que, preparada a amostra, foi retirada uma pequena parcela do material, rolando-o em fios sobre uma placa de vidro, fazendo pressão com as mãos, sendo que este precisa atingir, ao fissurar, um diâmetro de 3 mm.

Cada amostra preparada foi utilizada para determinar o teor de umidade, conforme Equação 1, e conseqüentemente averiguar o limite de plasticidade (LP), sendo repetido por sete vezes. Assim, foi determinado o índice de plasticidade (Equação 2).

$$IP = LL - LP \quad (\text{Equação 2})$$

As Figuras abaixo demonstram como proceder nos ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade, sendo estas ilustrando o ensaio com o solo.

FIGURA 3. Ensaio de Limite de Liquidez



FIGURA 4. Ensaio de Limite de Plasticidade



### 3.6. COMPACTAÇÃO DO SOLO

Para realizar o ensaio de compactação, foi passado o material na peneira #4 mm, sendo então separadas cinco amostras de mesma massa aferidas em balança, todas dispostas em cápsulas de porcelana, determinando-se para todas as amostras o teor de umidade, conforme Equação 1.

Este ensaio foi desenvolvido apenas para o solo, uma vez que o lodo bruto é de difícil manuseio e não incorporou água da maneira adequada ao ensaio.

O ensaio se deu seguindo a ABNT NBR 7182:2016, ensaio Proctor Normal Manual. Para obter a curva de compactação, devem ser calculadas duas outras variáveis,  $\rho_n$  (massa específica natural do solo) e  $\rho_d$  (massa específica seca do solo), de acordo com as seguintes equações abaixo.

$$\rho_n \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{massa específica natural do solo}}{(1+\text{teor de umidade})} \quad \text{(Equação 4)}$$

Para o ensaio de Compactação, as Figuras a seguir explanam como ocorreu.

FIGURA 5. Retirada do corpo de prova do anel cilíndrico na Compactação



FIGURA 6. Corpos de prova do ensaio de Compactação com diferentes teores de umidade



### 3.7. MASSA ESPECÍFICA

A massa específica foi determinada a partir da ABNT NBR 6508:2016, sendo separadas duas amostras de material. Realizado o procedimento, as massas aferidas são utilizadas para o cálculo de massa específica, de acordo com a equação explanada abaixo.

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{(massa)}}{\text{(volume)}} \quad \text{(Equação 5)}$$

As Figuras elucidam um dos procedimentos a serem seguidos no ensaio de massa específica, que é a retirada de ar do picnômetro.

FIGURA 7. Retirada de ar por pressão do solo



FIGURA 8. Retirada de ar por pressão do lodo



### 3.8. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Para a realização da análise granulométrica, foi seguido o procedimento descrito na ABNT NBR 7181:2016, realizando quartejamento e posterior peneiramento grosso e fino da amostra. Deste peneiramento, foram retiradas pequenas amostras que terão determinadas o teor de umidade, de acordo com a Equação 1.

Ao fim, cada amostra de material retido acumulado nas peneiras teve as massas aferidas para se obter o tamanho das partículas, com o intuito de traçar a curva granulométrica e determinar coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) e coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ). A Figura abaixo demonstra como se realizou o peneiramento no ensaio.

FIGURA 9. Peneiramento por agitação



### 3.9. ANÁLISE DE DADOS

Após a realização dos ensaios com amostras, os dados foram analisados através de uma comparação entre as características do solo do aterro sanitário municipal com o lodo de esgoto bruto, de modo a verificar as semelhanças entre os materiais e a possibilidade da utilização do lodo nas camadas de cobertura diária e intermediária do aterro.

Para desenvolver tal comparativo, foram utilizados, além da literatura existente, preceitos dispostos na norma técnica ABNT NBR 6502:1995 – Rochas e Solos, bem como o que é descrito nas normas que ditaram os ensaios de caracterização.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Abaixo são descritos os ensaios geotécnicos desenvolvidos, de modo a determinar se os materiais testados atendem os critérios descritos para sua utilização em aterros sanitários em relação aos parâmetros físicos. Vale ressaltar que, durante a realização dos ensaios com o lodo seco, ao promover sua reumidificação, este apresentou um forte odor, devido à decomposição da matéria orgânica que o compõe.

#### 4.1.1. Ensaio de Granulometria

As curvas granulométricas dos materiais analisados são ilustradas nos gráficos abaixo.

GRÁFICO 1: Curva granulométrica do solo testado

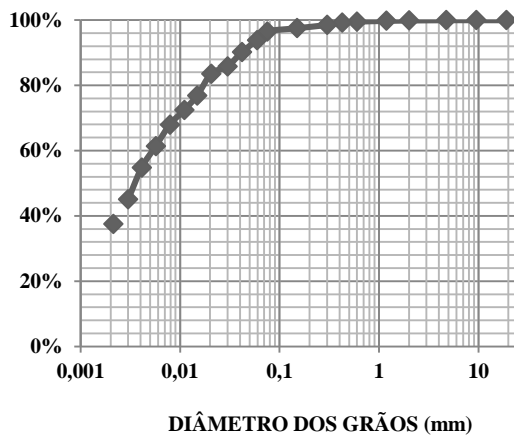
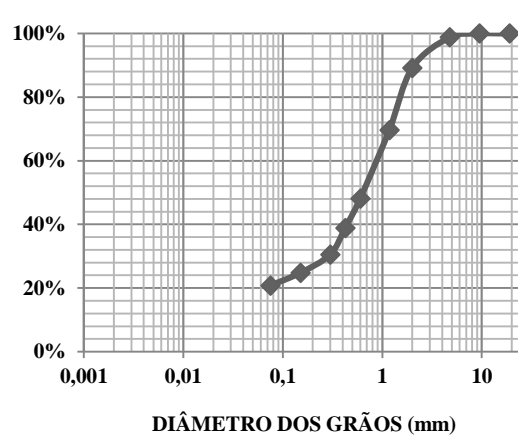


GRÁFICO 2: Curva granulométrica (lodo testado)



No que diz respeito aos critérios para os solos serem utilizados em coberturas de aterros, estes precisam obter uma porcentagem maior do que 30% de partículas passantes pela peneira nº 200, no procedimento de Análise de Granulometria por Peneiramento e Sedimentação, ditado pela ABNT NBR 7.181:2016 (ROCCA *et al.*, 1993). Para os materiais testados, apenas o solo se enquadra neste critério, já que mais de 90% do material são passantes na peneira, diferente do lodo (por volta de 20%).

Já para Qasim e Chiang (1994), o passante na peneira nº 200 precisa ser superior a 40%, de modo que apenas o solo se enquadra, o que implica que o acréscimo de lodo como agregado ao solo aumentaria sua granulometria. Porém, se não ultrapassar os valores estabelecidos, tal diferença não se configura como expressiva.

Em relação à aplicabilidade de materiais em coberturas na literatura, para os materiais testados por Prim (2011), tanto o lodo bruto quanto as misturas de lodo com cal não se aplicam aos critérios supracitados. Já Pimentel (2012) confirma que as misturas de solo com lodo (30 e 45%) testados estão de acordo com o estabelecido por Rocca *et al.* (1993) e Qasim e Chiang (1994).

A partir da granulometria, os materiais podem ainda ser quantificados de acordo com a ABNT NBR 6502:1995, norma que determina os diâmetros do material, de modo que as partículas sejam definidas como pedregulho, areia, silte e argila, sendo os valores de referência, bem como os resultados da análise do solo e do lodo bruto apresentados na Tabela 3.

Para se obter uma verificação dos dados, a análise granulométrica por sedimentação foi realizada, porém, apenas para o solo, visto que o laboratório em que se deram as análises não possuía a solução necessária ao ensaio em quantidade suficiente. O resultado desta análise está expresso na tabela de classificação descrita a seguir, demonstrando as porcentagens encontradas de pedregulho, silte, areia e argila.

Como para o lodo foi realizada apenas a granulometria por peneiramento, considera-se toda a quantidade passante na peneira nº 200 uma composição de areia fina+silte+argila.

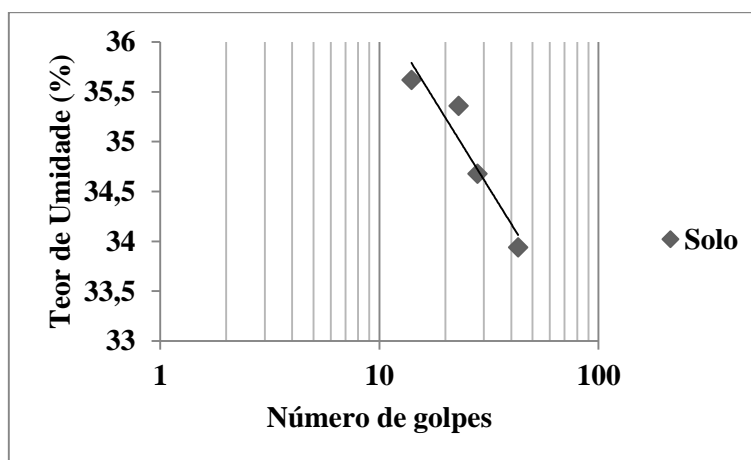
TABELA 3. Quantificação das partículas dos materiais.

CLASSIFICAÇÃO ABNT NBR 6502:1995	SOLO (%)	LODO (%)
Pedregulho: diâmetros entre 2,0 e 60 mm	0,09	10,85
Areia: diâmetros entre 0,06 e 2,0 mm	6,03	68,40
Silte: diâmetros entre 0,002 e 0,06 mm	56,35	20,75 (areia fina+silte+argila)
Argila: diâmetros menores que 0,002 mm	37,53	-

#### 4.1.2. Índice de Plasticidade

Em relação ao limite de liquidez do solo, o Gráfico 3 apresenta a curva dos valores encontrados para a determinação deste (ponto referente ao valor de 25 golpes).

GRÁFICO 3. Limite de Liquidez do solo



Os valores referentes ao limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), tanto para o solo do aterro sanitário quanto para o lodo de ETE analisado, estão explanados na tabela a seguir.

TABELA 4: Classificação do Índice de Plasticidade de solo

MATERIAL	LL (%)	LP (%)	IP (%)
SOLO	34,90	20,84	14,06
LODO	-	NP	0

De posse desses valores, quanto ao índice de plasticidade, Burmister (1949 *apud* DAS, 2007) categorizou este parâmetro da forma como ilustrado na Tabela 5. Assim, tem-se que o solo testado possui plasticidade média, e o lodo pode ser considerado não plástico (NP), uma vez que a realização do ensaio com tal material não foi possível.

TABELA 5. Classificação do Índice de Plasticidade de solo

ÍNDICE DE PLASTICIDADE	DESCRIÇÃO
0	Não plástico (NP)
1 – 5	Ligeiramente plástico
5 – 10	Plasticidade baixa
10 – 20	Plasticidade média
20 – 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

Fonte: BURMISTER (1949) *apud* DAS (2007)

Na literatura, Pimentel (2012), classificando um tipo de solo empregado em aterro, assim como diferentes misturas deste solo com lodo bruto e com lodo caledado, encontrou valores de plasticidade muito alta (solo); média, alta e entre média e alta (lodo). Dessa forma, pode-se inferir que o acréscimo de lodo ao solo diminui sua plasticidade, já que a matéria orgânica minimiza tal característica (ANDREOLI, 2001).

Em relação ao lodo de ETE, Kelm (2014), ao classificá-lo *in natura*, obteve valores elevados de LL (483%) e LP (112%), uma vez que o material absorveu de modo rápido a água, fato relacionado ao elevado teor de matéria orgânica do resíduo. Porém, este lodo, ao ser seco em estufa a 60° C, destorroado, passado na peneira nº 40 (0,42mm), adicionando-se água, fez com que houvesse uma repulsão, e o material não se misturou com ela.

Com isso, não foi possível realizar os testes de LL e LP, de maneira que o material foi classificado como NP, assim como ocorreu com Araújo (2008) e Prim (2011). Alamino (2010) também classificou o lodo bruto como NP. Assim, por meio dos resultados encontrados para os materiais, bem como sua classificação, é possível verificar se tais materiais podem ser utilizados em camadas de cobertura de aterros sanitários.

No que concerne à utilização de materiais para a cobertura dos resíduos, Rocca *et al.* (1993) elucida que o LL seja superior a 30%, assim como o IP deve ser maior que 15%; já Qasim e Chiang (1994) instituem que LL deve ser maior que 25% e IP superior a 10%. Quanto aos materiais analisados, apenas o solo se enquadra nestes valores atribuídos.

Porém, em relação ao valor de IP estabelecido como o ideal por Rocca *et al.*



(1993), o solo testado apresenta valor inferior (14,06%). Por sua vez, este é um valor próximo a 15%, de modo que a diferença não pode ser considerada significativa, não interferindo na sua utilização nas camadas.

Outra referência designada para tal propósito foi estabelecida por Qian, Koerner e Gray (2002), em que se determina como limite máximo de plasticidade indicado para coberturas um IP menor que 50. Assim como para os demais valores de referência supracitados, apenas o solo é classificável, sendo este de aplicabilidade em camadas de cobertura.

Os mesmos autores citam ainda que tal valor de IP é aconselhável, de maneira a se evitar elevada expansão e contração, as quais desencadeariam fissuras e conseqüentemente aumento da permeabilidade, acarretando a probabilidade da infiltração de percolados, gerando a possibilidade de contaminação de águas subterrâneas.

#### 4.1.3. Classificação dos materiais

De acordo com a classificação unificada dos solos (SUCS), que considera os parâmetros granulometria, liquidez e plasticidade, o solo que recobre a área do aterro sanitário analisado é considerado argila de baixa compressibilidade (CL – *low compressible clay*). Já o lodo bruto proveniente do leito de secagem da ETE (área de estudo), foi caracterizado como uma areia fina (SM – *sandy fine*).

No que concerne a tal classificação na literatura, para Prim (2011), ao se realizar tal análise, o lodo bruto também foi classificado como SM (areia com finos ou areia siltosa), bem como as misturas de lodo com cal testadas (5%, 10% e 15%). Fato semelhante ocorreu com Pimentel (2012), para quem as misturas avaliadas (15%, 30% e 45%) de lodo bruto com acréscimo de cal foram determinadas como SM, sendo apenas a mistura de 15% considerada uma areia que apresenta elevadas quantidades de silte e de argila simultaneamente (SC-SM).

Para este modelo de classificação, são considerados que solos argilosos atribuídos para cobertura devem ser aqueles determinados como argilas de baixa compressibilidade (CL), argilas de alta compressibilidade (CH – *clay of high plasticity*), areias argilosas (SC – *sandy clay*) ou então solos orgânicos de alta compressibilidade (OH – *organic soil, high compressibility*) (ROCCA *et al.*, 1993).

Desse modo, a partir dos materiais analisados, tem-se que somente o solo se enquadrava no critério para utilização em cobertura de aterros, além de ser ponderado que o lodo bruto se comporta como uma areia fina.

#### 4.1.4. Massa específica dos grãos

Em relação à massa específica dos grãos, o solo natural apresentou um valor de 2,82 g/cm<sup>3</sup>. De acordo com Pinto (2006), este então se enquadra na faixa para a maioria dos solos, que abrange valores de 2,65 a 2,85 g/cm<sup>3</sup>. Quanto ao lodo bruto, este obteve um valor de massa específica de 1,91 g/cm<sup>3</sup>. Tal valor referente ao lodo

de ETE é próximo aos encontrados na literatura para o material sem ser submetido a tratamentos, em que se observa massa específica de  $1,95\text{g/cm}^3$  (LUCENA, 2012); e  $1,99\text{g/cm}^3$  (ALAMINO, 2010).

Ainda são encontrados valores inferiores, porém não muito distantes, como entre  $1,56$  a  $1,76\text{g/cm}^3$ , tanto para o lodo bruto, quanto para lodo acrescido de cal (PRIM, 2011); e  $1,66$  e  $1,68\text{g/cm}^3$  para o lodo bruto (KELM, 2014). Esta oscilação de valores, de acordo com Lucena (2012), pode ser associada às características do esgoto de cada região, bem como ao sistema de tratamento usado nas estações de cada localidade.

Solos com valores maiores de massa específica apresentam menor porosidade total, arejamento e condutividade hidráulica (ALAMINO, 2010), sendo então propícios para aplicação em camadas de cobertura de aterro, minimizando a possibilidade de infiltração, de forma a atenuar a taxa de formação de percolados, o que desencadearia uma provável contaminação das águas subterrâneas.

Desse modo, utilizar o lodo para tal finalidade implica adotá-lo de maneira a não interferir significativamente nesta propriedade do solo. Como este apresenta valores baixos em relação à maioria dos solos, sua aplicação provocaria a diminuição da massa específica. Porém, deve-se buscar associá-lo de forma que não intervenha expressivamente, incorporando-o como agregado, em quantidades que não impactariam negativamente no valor.

## CONCLUSÕES

- (i) O lodo apresenta maior granulometria que o solo analisado, sendo um material não plástico, classificado como areia fina (SM); já o solo é uma argila de baixa compressibilidade (CL) e possui plasticidade média de 14,06%;
- (ii) para a massa específica, o lodo bruto apresentou valor compatível ao encontrado nas literaturas consultadas. Porém, não há referências que expressem qual massa específica tal material deve abranger para sua aplicabilidade em aterros sanitários;
- (iii) a partir dos resultados encontrados, tem-se que o solo utilizado nas camadas de coberturas do aterro analisado enquadra-se nos parâmetros de aplicabilidade para coberturas diárias e intermediárias. Já o lodo bruto abrange características não favoráveis, tanto estruturais, quanto ambientalmente;
- (iv) para garantir confiabilidade aos resultados, devem ser realizados testes de permeabilidade para os materiais testados, bem como fazer a repetição dos testes.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 6502: Rochas e Solos*. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. *NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 10007: Amostragem de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro, 2004.
- ANDREOLI, C V. *et al. A gestão dos biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto doméstico*. 24. ed. Curitiba: Sanepar, 1998. 12 f. Trabalho desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB.
- ANDREOLI, C. V. *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.
- ALAMINO, R. de C. J. *A utilização de lodo de esgoto como alternativa sustentável na recuperação de solos degradados: viabilidade, aplicação e biodisponibilidade de metais*. 2010. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. *Resolução CONAMA n° 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências*. Publicada Diário Oficial da República Federativa do Brasil, n° 167, de 30 de agosto de 2006.

CAERN - Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte. *Tratamento de esgoto*. Disponível em: <<http://www.caern.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=12037&ACT=null&PAGE=0&PARM=null&LBL=null>>. Acesso em: fev. 2017.

CAPUTO, H. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.

CESAN - Companhia Espírito Santense de Saneamento. *Apostila Tratamento de Esgoto*. 2013. 15 p.

CONDER, 2010. Companhia de desenvolvimento urbano do estado da Bahia. *Manual de Operação de Aterros Sanitários*. 28 p.

CONDER, 2011. Companhia de desenvolvimento urbano do estado da Bahia. *Resíduos Sólidos e sua destinação final*. 220 p.

DAMASCENO, S.; CAMPOS, J. R. Caracterização de lodo de estação de tratamento de esgotos para uso na agricultura, in: *Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental*, 1998, Lima. XXVI Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. Lima, 1998, v. 1.

DAS, B. M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6. ed. São Paulo: Thompson Learning, 2007.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Manual de pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

FEDRIZZI, F. *Aproveitamento de lodo de esgoto na produção de artefatos de concreto – tubo de concreto de seção circular*. 2012. 205 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

GRIFFIN, R. A. *et al.* "Municipal Sewage Sludge Management at Dedicated Land Disposal Sites and Landfills", in: LUE-HING, C. et al (comp.). *Water Quality Management Library. Volume 4: Municipal Sewage Sludge Management: A Reference text on Processing, Utilization and Disposal*. 2. ed. Lancaster: Technomic Publishing Company Book, 1998, p. 409-486.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2017*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?&t=resultados>>. Acesso em: nov. 2017.

KELM, T. A. *Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação*. 2014. 209 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

LIMA, M. R. P. *Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto*. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 288 p.

LOPES, T. R. *Caracterização do Esgoto Sanitário e Lodo Proveniente de Reator Anaeróbio e de Lagoas de Estabilização para Avaliação da Eficiência na Remoção de Contaminantes*. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

LUCENA, L. C. F. L. *Estudo de aplicação de misturas solo lodo em base e sub-base de pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2012.

PIMENTEL, F. J. G. *Aproveitamento de Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto em Camada de Cobertura de Aterro Sanitário*. 2012. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

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

PRIM, E. C. C. *Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário*. 2011. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

QASIM, S.R., CHIANG, W. *Sanitary Landfill Leachate – generation, control and treatment*. Technomic Publishing Co., Inc, 1994.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. *Geotechnical Aspects of a Landfill Design and Construction*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2002.

ROCCA, A.C. *et al. Resíduos Sólidos Industriais*. São Paulo: CETESB, 1993.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. *Tratamento de esgotos*. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=49>>. Acesso em: fev. 2017.

SILVA, C. R. L. da; CHINELATTO, A. L.; CHINELATTO, A. S. A. Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos. *Cerâmica*, [s.l.], 61(357): 31-40, 2015. FapUNIFESP (SciELO). SILVA, J. M.

*Higienização do Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto para Utilização como Material de Cobertura de Aterro Sanitário.* 2013. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SILVEIRA, L. R. da. *Aspectos geotécnicos e ambientais para a disposição adequada de lodo de esgoto.* 2014. 193 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.