



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**RAFAEL DE MEDEIROS PAULINO**

**ESTUDO GEOTÉCNICO DO USO DE LODO DE ESGOTO  
HIGIENIZADO EM CAMADAS DE COBERTURA DE  
ATERROS SANITÁRIOS**

**NATAL-RN  
2016**

Rafael de Medeiros Paulino

Estudo geotécnico do uso de lodo de esgoto higienizado em camadas de cobertura de aterros sanitários

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Carina Maia Lins  
Costa

Natal-RN  
2016

Catálogo da Publicação na Fonte  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas  
Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Paulino, Rafael de Medeiros.

Estudo geotécnico do uso de lodo de esgoto higienizado em camadas de cobertura de aterros sanitários / Rafael de Medeiros Paulino. - 2016.

15 f. : il.

Artigo Científico (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Carina Costa Lins Maia

1. Engenharia sanitária - TCC. 2. Lodo de esgoto - TCC. 3. Aterro sanitário - TCC. I. Maia, Carina Costa Lins. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628

Rafael de Medeiros Paulino

Estudo geotécnico do uso de lodo de esgoto higienizado em camadas de cobertura de aterros sanitários

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Aprovado em: 16 de novembro de 2016**

---

Profa. Dra. Carina Maia Lins Costa – Orientadora

---

Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa – Examinador interno

---

Eng. Alexandre Damazo Bernardes – Examinador externo

Natal-RN

2016

## RESUMO

Com a atual tendência de reaproveitamento e reciclagem de resíduos, a reutilização do lodo se tornou uma necessidade ambiental, social e econômica. Uma possível destinação seria a utilização do lodo em camadas de cobertura de aterros sanitários. Este trabalho teve como objetivo investigar se a utilização de lodo de esgoto higienizado em camadas de cobertura de aterros sanitários, tal como é feita em outros países, se mostra geotecnicamente viável para a realidade natalense. Porém, é necessário que o material a ser utilizado nestas camadas apresente certas propriedades geotécnicas para garantir seu funcionamento. O lodo de esgoto da ETE da UFRN foi higienizado com adição em massa seca de 25% de cal hidratada e mantido em estufa agrícola por 90 dias para total estabilização. Procedeu-se então a avaliação geotécnica do solo coletado na própria jazida do aterro sanitário local, do lodo puro e de três misturas entre estes materiais. Determinou-se que, de maneira geral, quanto maior a porcentagem de lodo na mistura, menores os parâmetros de resistência, tornando a mistura mais permeável e leve. Chegou-se à conclusão que a mistura de 10% de lodo e 90% apresentou características geotécnicas que permitem sua utilização em camadas diárias e intermediárias. O lodo puro e a mistura de 50% lodo e 50% solo apresentou propriedades geotécnicas adequadas para sua utilização como constituinte da subcamada drenante de camada final.

**Palavras chave:** Lodo de esgoto. Aterro sanitário. Camadas de cobertura.

## **ABSTRACT**

Giving the current trend of recycling and reutilization residues, sludge reuse has become an environmental, social and economic necessity. A possible destination would be the utilization of sludge as cover layer in sanitary landfills. This paper aimed at investigating whether the utilization of sewage sludge, as it's done in other countries, is geotechnically viable to Natal's reality. However, it is necessary that the materials used on those layers show some geotechnical properties to ensure its good operation. The sewage sludge of the UFRN's WWTP was sanitized with the addition of 25% in dry mass of hydrated lime and held for 90 days in an agricultural greenhouse for its total stabilization. Then, geotechnical tests and analysis were done in the soil from the local sanitary landfill field, in the sludge itself and in three mixes between those materials. Results showed that, generally, the greater the sludge percentage in the mix, the smaller the resistance parameters, making the mixes lighter and more permeable. At the end, the conclusions were that the 10% sludge and 90% soil mix has shown geotechnical characteristics that allow its utilization in daily and intermediate cover layers. The sludge and the 50% sludge and 50% soil mix have shown geotechnical properties adequate for their utilization as component in draining sublayer in final cover layer.

**Key-words:** Sewage sludge. Sanitary landfill. Cover layers.

## Sumário

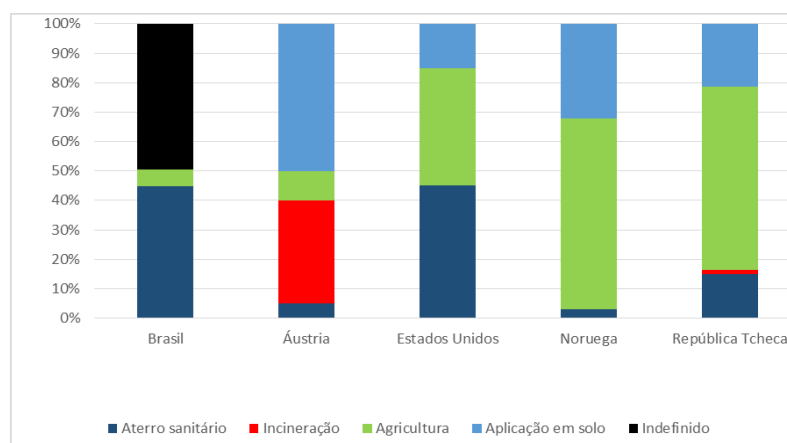
1	Introdução .....	1
2	Objetivos .....	2
2.1	Objetivo geral .....	2
2.2	Objetivos específicos .....	2
3	Fundamentação teórica.....	3
3.1	Lodo de esgoto.....	3
3.2	Aterro sanitário .....	4
4	Materiais e métodos .....	6
4.1	Lodo de esgoto.....	6
4.2	Higienização e estabilização do lodo .....	7
4.3	Solo do aterro sanitário .....	8
4.4	Misturas de lodo e solo .....	8
4.5	Caracterização geotécnica dos materiais .....	9
5	Resultados .....	10
5.1	Caracterização geotécnica .....	10
5.2	Compactações e permeabilidades .....	11
5.3	Cisalhamento direto e Índice de Suporte Califórnia.....	11
6	Discussão .....	12
7	Conclusão.....	13
8	Referências .....	14

## 1 Introdução

Com o crescimento populacional e aumento da conscientização sobre as questões ambientais, há uma crescente demanda e cobrança por parte da sociedade por saneamento ambiental tanto no meio urbano quanto no meio rural. Um dos itens fundamentais para promover um ambiente mais salubre é, sobretudo em locais de maior concentração de pessoas, a existência de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Porém, este tratamento gera resíduos sólidos, chamados genericamente de lodo de esgoto, cujas características são bastante variadas e dependem do tipo de esgoto e do sistema de tratamento adotado (ANDREOLI et al., 2001). Este lodo é rico em matéria orgânica, principalmente constituída pelas bactérias responsáveis pelo processo de tratamento de esgoto, e em nutrientes.

Ao contrário do Brasil, países como Noruega, Canadá e Austrália já apresentam complexos sistemas de destinação e reaproveitamento do lodo (LeBLANC; MATTHEWS; RICHARD, 2008). A Figura 1 apresenta exemplos de tais destinações em alguns países.

*Figura 1 – Destinação final do lodo em diversos países*



Fonte: Adaptado de Granato (2010)

Uma dessas utilizações é como material constituinte em camadas de cobertura de aterros sanitários (PRIM, 2011). Segundo Granato (2010), o uso de lodo como camada diária de cobertura tem a capacidade de melhorar a qualidade do lixiviado, acelerar a decomposição de resíduos e aumentar a produção de metano. Os benefícios em camadas finais estão relacionados ao aproveitamento dos nutrientes no crescimento da vegetação de cobertura, o que auxilia no controle de erosão e na geração de lixiviado (PRIM 2011).

Propondo uma alternativa ambientalmente adequada para a disposição final do lodo, o presente trabalho estudou a adequação geotécnica do uso do lodo higienizado da ETE da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) como material constituinte de camadas de cobertura de aterros sanitários, investigando se os parâmetros de outras pesquisas



da área se adequam à realidade natalense, visto que há grandes variedades nas propriedades dos lodos produzidos em diferentes regiões e diferenças nos solos utilizados nos aterros sanitários.

O lodo pode ser disposto em aterros sanitários de forma exclusiva ou juntamente com resíduos domiciliares. Porém, esta disposição vem se mostrando inviável a longo prazo, tanto técnica, quanto econômica e operacionalmente, devido à saturação da capacidade dos aterros, aos transtornos causados à população do entorno, sobretudo os maus cheiros, ao custo relativamente alto das áreas existentes e às dificuldades de encontrar áreas que atendam às necessidades técnicas (LIMA, 2010).

Como se pode ver na Figura 1, a principal destinação de lodo em outros países é a agricultura. No entanto, a reciclagem do lodo para o uso agrícola depende de áreas e culturas aptas, orientação técnica e treinamento dos funcionários, monitoramento ambiental rigoroso e a aceitabilidade dos agricultores (PRIM, 2011).

Assim, a aplicação de lodo em camadas de cobertura em aterros sanitários torna-se uma alternativa atraente. O lodo poderia vir a ser ainda uma alternativa economicamente viável para os sistemas de recobrimento, que são quase que exclusivamente dependentes da extração de solos argilosos, diminuindo a pressão sobre recursos naturais (PRIM, 2011).

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar do ponto de vista geotécnico a utilização do lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como material constituinte em mistura a ser utilizada como camadas diárias, intermediárias e finais em aterro sanitário.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar geotecnicamente o solo, o lodo higienizado e três misturas destes, sendo estas 50% de lodo e 50% de solo, 33% de lodo e 66% de solo e 10% de lodo e 90% de solo;
- Encontrar porcentagem geotecnicamente mais adequada da mistura entre lodo e solo;
- Levantar a discussão sobre o tema no meio acadêmico local.

### 3 Fundamentação teórica

#### 3.1 Lodo de esgoto

A decomposição da matéria orgânica acontece naturalmente nos corpos hídricos e no solo. Porém, a distribuição demográfica desigual dos seres humanos e o aumento no consumo de água, e conseqüente produção de esgotos, fazem com que se torne ambientalmente inviável a disposição de toda a água residuária produzida diretamente em corpos hídricos ou no solo. Portanto, a criação de sistemas responsáveis por tratamento de esgotos foi necessária para o desenvolvimento da sociedade. Surgiram assim, entre outros sistemas, as estações de tratamento de esgoto, que são unidades operacionais que, através de processos físicos, químicos ou biológicos, removem parte das cargas poluentes das águas residuárias e as deixam em conformidade com os padrões exigidos pela legislação ambiental para sua disposição no meio ambiente (SILVA, 2013).

A maioria das etapas do tratamento de esgoto gera subprodutos sólidos, ricos em material orgânico e nutrientes, cujo conjunto é genericamente denominado lodo. Antes da sua destinação final, o lodo normalmente passa pelas etapas de adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento e higienização (LIMA, 2010). O adensamento e o desaguamento são responsáveis pela diminuição da umidade, e conseqüentemente do volume (COSTA, 2012). As etapas de secagem alteram significativamente as propriedades mecânicas do lodo, como a resistência e a consistência (Tabela 1). Além disso, Andreoli et al (2001) destacam outras razões para a desidratação do lodo, como a redução dos custos do transporte, a melhoria das condições de manuseio do lodo e uma redução da geração de lixiviado.

*Tabela 1 - Relação entre teor de umidade e consistência do lodo*

Teor de umidade (%)	Consistência do lodo
75 a 100	Lodo fluido
65 a 75	Torta semissólida
40 a 65	Sólido duro
15 a 40	Lodo em grânulos
0 a 15	Lodo desintegrado em pó fino

Fonte: Adaptado Prim (2011)

A realização ou não das etapas de estabilização, responsável pela remoção de parte da matéria orgânica e redução dos sólidos voláteis, e a higienização, onde ocorre a remoção de organismos patogênicos, depende da destinação final do lodo (SILVA, 2013).

Há, normalmente, uma grande quantidade de organismos potencialmente patogênicos nos lodos de esgoto. Portanto, para o manuseio deste sem que haja riscos à saúde humana ou contaminação do meio é recomendada a etapa de higienização. Entre os processos de estabilização que auxiliam na desinfecção do lodo existem os processos biológicos, físicos e químicos (PRIM, 2011). Neste trabalho, foi utilizada a estabilização alcalina, tipo de estabilização por processo químico que pode ser utilizada no tratamento de lodos primários, secundários ou terciários. Os produtos mais utilizados para esta finalidade são a cal virgem e a cal hidratada, sendo que, com esta última, não se obtém um aumento significativo na temperatura, requerendo, portanto, mais tempo de manutenção das condições alcalinizantes. A adição de cal ao lodo provoca mudanças físicas e químicas. Entre as mudanças químicas há a fixação de metais pesados, podendo haver a insolubilização do fósforo e a perda do nitrogênio pela volatilização da amônia (PRIM,2011).

Três fatores são atuantes na higienização do lodo: a alteração da temperatura, no caso da utilização da cal virgem; o aumento do pH da mistura; e a ação da amônia que é formada a partir do nitrogênio do lodo, em condições de pH elevado (ANDREOLLI, 2001).

### **3.2 Aterro sanitário**

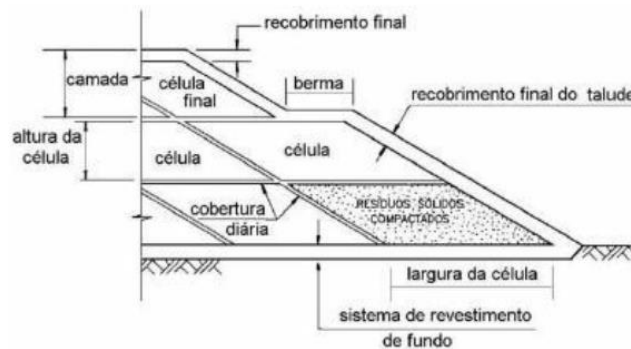
Aterros sanitários são estruturas projetadas, com base em estudos de engenharia, para receber os resíduos sólidos urbanos produzidos pelos habitantes de uma cidade, de forma a reduzir ao máximo os impactos causados ao meio ambiente (CONDER, 2010). A NBR 8419/1992, Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos, define e rege as recomendações para a execução de aterros sanitários no Brasil. Afirma ainda que os aterros sanitários devem confinar os resíduos sólidos à menor área e volume possíveis, cobrindo-os com uma camada de solo na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, caso necessário.

Para garantir condições de salubridade e proteção ambiental do entorno, devem ser previstas várias estruturas no aterro. Podem-se destacar como elementos essenciais de proteção ambiental os sistemas de drenagem de águas pluviais, percolado e biogás, sistemas de impermeabilização e cobertura, o tratamento do percolado e o monitoramento do aterro.

O sistema de cobertura tem como principais funções proteger a superfície das células de resíduos, minimizando os impactos ao meio ambiente e visando o controle de infiltrações e diminuição da taxa de formação de percolados. Atua ainda no controle da emissão de biogás e na exalação de maus odores, ao mesmo tempo que dificulta a proliferação de vetores. As camadas devem apresentar boa resistência mecânica, para resistir às intempéries e ao tráfego

de veículos sobre elas (PRIM, 2011). As camadas de cobertura executadas ao longo do processo de enchimento do aterro são as camadas intermediárias e as diárias, as efetuadas na finalização no aterramento são chamadas de camada final (SILVA, 2013 apud LANGE et al., 2006). A Figura 2 abaixo mostra um esquema da estrutura de um aterro sanitário.

*Figura 2- Esquema da estrutura de um aterro sanitário*



Fonte: Silva (2013 apud Reichert, 2007).

As camadas de cobertura diárias são aquelas realizadas no fim de cada jornada de trabalho, ou em intervalos menores, caso necessário, tendo como principais funções promover uma diminuição da infiltração de água pluvial, evitar a dispersão e o espalhamento dos resíduos, ajudar a reduzir a emissão de odores, limitar o contato dos resíduos com vetores de doenças e permitir a operação e o acesso de veículos (SILVA 2013 apud McBEAN, ROVERS, FARQUHAR, 1995). As camadas intermediárias são realizadas em locais que a superfície ficará inativa por prolongados períodos de tempo. As camadas de cobertura devem atender essas funções com a menor espessura possível, de forma a diminuir a extração de materiais e a ocupação do volume do aterro (PRIM, 2011).

Em relação à camada diária, as Agências de Proteção Ambiental (EPA) da Irlanda, Estados Unidos e Austrália concordam que a espessura mínima é de 150mm e que para realizar adequadamente suas funções, deve ter permeabilidade tal que permita a comunicação entre as células e a passagem do lixiviado, mas que limite a percolação da água da chuva. As EPAs estadunidense e irlandesa recomendam inclusive a busca pela utilização de materiais reciclados ou alternativos para a execução desta camada. Segundo as três referências, a camada intermediária deve ter no mínimo 300mm de espessura e que os requisitos de resistência são mais restritos que na camada diária, mas sem apresentar valores de parâmetro de resistência. A EPA australiana sugere que o coeficiente de permeabilidade seja menor que  $10^{-3}$ cm/s e que deve impedir a infiltração de pelo menos 80% da água da chuva.

Com relação às camadas finais, os critérios são mais rigorosos, há ainda uma maior complexidade na própria camada, que é formada pelas subcamadas drenante, barreira,

coletora de gás e filtrante. Para a subcamada drenante, as recomendações segundo as EPA estadunidense e australiana são que o coeficiente de permeabilidade seja maior que  $10^{-2}$ cm/s. Na subcamada barreira, essas agências recomendam que a permeabilidade seja menor que  $10^{-7}$ cm/s, não havendo outros parâmetros especificados para as outras subcamadas.

## 4 Materiais e métodos

### 4.1 Lodo de esgoto

O lodo utilizado na pesquisa é proveniente da ETE da UFRN. A estação é responsável por tratar os efluentes sanitários gerados no Campus Central e é baseado no sistema de valo de oxidação com decantação secundária e recirculação de lodo. Portanto, a estação é responsável por tratar um esgoto predominantemente doméstico. O lodo usado no trabalho é classificado como secundário e proveniente do decantador secundário da estação.

Quando não é mais necessária a recirculação, o lodo é retirado do decantador e levado para leitos de secagem em células formadas por camadas drenantes por onde a parte líquida percola (Figura 3). Após seco, é raspado e encaminhado ao aterro sanitário de Natal.

*Figura 3 – Leitos de secagem do lodo da UFRN*



A caracterização do lodo, segundo a NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação, foi realizada pelo Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos (NUPRAR), pertencente à UFRN, em 2014, sendo classificado como resíduo de Classe IIB, isto é, resíduo inerte.

Foi escolhido o lodo desta ETE pela facilidade de aquisição do mesmo, porém, a produção de lodo desta estação é muito baixa, tornando inviável o uso em larga escala. A maior estação de tratamento de esgoto de Natal é a ETE do Baldo, na qual, segundo informações da Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), que administra a estação, a produção de lodo em 2015 chegou a cerca de 24,1t por mês. Mais duas ETEs de porte semelhante estão sendo construídas na cidade, de forma que a produção de lodo na cidade nos próximos anos pode ficar próxima do triplo deste valor.

## 4.2 Higienização e estabilização do lodo

Foi realizado processo de higienização por estabilização alcalina, com adição de cal Supercal Aditivada Hidracor em mistura com o lodo, sendo que a cal corresponde a 25% da massa seca e o lodo 75% do total da mistura. O produto é classificado como uma cal magnesiana por apresentar percentual de óxido de cálcio (CaO) igual a 80%, tendo uma eficiência considerada boa na higienização do lodo.

Prim (2011) chegou à conclusão que a higienização do lodo com 15% em massa seca de cal virgem torna a mistura ambientalmente adequada para a utilização em camadas de cobertura em aterro sanitário e sem trazer maiores riscos com o contato humano, atendendo ainda a Resolução 375 do CONAMA classificando a mistura como classe B. A cal utilizada era composta por cerca de 60% de óxido de cálcio e a mistura foi realizada mecanicamente por doze minutos.

Nesta pesquisa, foi utilizada a dose de 25% e não a de 15% como proposto pela autora por três motivos: não foi possível realizar análise microbiológica para garantir a segurança sanitária do manuseio do lodo higienizado; apesar de não haver consenso na literatura, alguns autores afirmam que a cal virgem apresenta maior poder de higienização pelo aumento na temperatura provocado pela cal ao entrar em contato com a água presente no lodo; a porcentagem de cal não poderia ser muito maior pois ainda se busca uma solução economicamente viável.

O processo de mistura foi realizado mecanicamente por uma betoneira de 120 litros por 10 minutos, tempo suficiente para que se fosse observado uma homogeneidade da mistura (Figura 4).

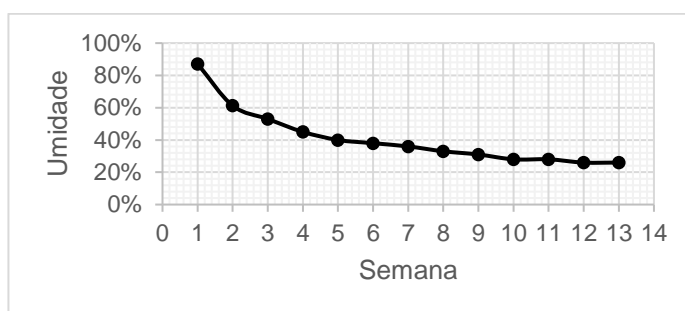
*Figura 4 – Caleação do lodo*



Para acelerar a eficiência do processo de estabilização, a mistura de lodo e cal foi levada para uma estufa agrícola em uma fazenda no município de Parnamirim/RN onde ficou por noventa dias exposta ao ar, envolto por uma tela para prevenir o contato com vetores. Isso

se deve principalmente às maiores temperaturas mantidas dentro da estufa agrícola, que aceleram o processo de secagem, a diminuição da umidade provoca uma diminuição da concentração de microrganismos patogênicos e reduz o volume a ser disposto (LIMA, 2010). Durante este período, a umidade da mistura foi acompanhada semanalmente, junto com o revolvimento para promover uma melhor mistura e aeração (Figura 5). No final do tempo de estabilização, o lodo higienizado apresentava-se com consistência de lodo em grânulos, conforme definido na Tabela 1.

*Figura 5 – Umidades médias do lodo durante a estabilização*



### **4.3 Solo do aterro sanitário**

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no próprio Aterro Sanitário da cidade de Natal, localizado no município de Ceará-Mirim no estado do Rio Grande do Norte. No aterro, este solo era utilizado para a realização das camadas de cobertura, tanto diárias, como intermediárias e finais. Segundo dados fornecidos por um funcionário do local, o uso do solo no aterro sanitário para as camadas de cobertura chega a cerca de 900t por mês.

### **4.4 Misturas de lodo e solo**

Foram feitas misturas manualmente entre o lodo higienizado e o solo escolhido, nas proporções em massa seca de 50% de lodo higienizado e 50% de solo, denominada de SL50 e 66% de solo e 33% de lodo, denominada SL33. A escolha das proporções foi baseada nas proporções já utilizadas na literatura, nas quais predomina as maiores porcentagens de lodo, visando dar uma destinação a maiores quantidades do resíduo.

Foi realizada ainda uma terceira mistura baseada numa estimativa de que, ao entrarem em vigor as duas novas estações de tratamento de esgoto que estão sendo construídas na cidade de Natal, o lodo gerado mensalmente nas três estações da CAERN, se completamente destinado a este fim, seria equivalente a cerca de 10% do solo utilizado

mensalmente nas camadas intermediárias do aterro sanitário de Natal, sendo esta, portanto, composta de 90% de solo e 10% de lodo, denominada SL10.

#### **4.5 Caracterização geotécnica dos materiais**

Foi feita uma caracterização básica dos materiais através dos ensaios de análise granulométrica conjunta, seguindo a NBR 7181/84, massa específica dos sólidos, de acordo com as recomendações da NBR 6508/84, limites de Atterberg, com as NBR 6459/84 e 1780/84, e ensaio de compactação, seguindo a NBR 7182/84.

O estudo da permeabilidade foi realizado em um permeâmetro de carga constante e igual a 1,66mca. Os corpos de prova a serem ensaiados eram moldados na umidade ótima e grau de compactação próximo de 100% e então extraídos e postos no interior do cilindro do permeâmetro.

As partes inferior e superior do permeâmetro eram preenchidos com material granular (areia e brita) de forma a distribuir uniformemente a vazão, a lateral do corpo de prova era preenchido com material de permeabilidade muito baixa (parafina e bentonita) para evitar que houvesse fluxo pela lateral do corpo de prova. Este era então saturado e iniciava-se o ensaio.

Então foram realizados ensaios de cisalhamento direto, em séries de 50kPa, 100kPa e 200kPa de tensão vertical, na condição não inundada, para determinação dos valores de ângulo de atrito interno do solo e do intercepto de coesão para o solo puro, o lodo puro e a mistura SL10, pois verificou-se que essa apresentava as propriedades geotécnicas mais adequadas para as camadas diárias e intermediárias, necessitando uma investigação mais aprofundada de seus parâmetros de resistência.

Foram feitos ainda ensaios de Índice de Suporte Califórnia, seguindo as recomendações da NBR 9895/87, para a determinação do ISC e da expansibilidade. Estes ensaios foram realizados para as mesmas amostras do ensaio de cisalhamento direto e foram feitos na energia normal de compactação. Com exceção dos ensaios de granulometria conjunta que foram realizados apenas uma vez e os ensaio de cisalhamento direto que são realizados em séries de três valores de tensão, para ter-se uma maior precisão estatística, todos os ensaios foram realizados três vezes e os valores apresentados a seguir são as médias dos valores de cada ensaio.

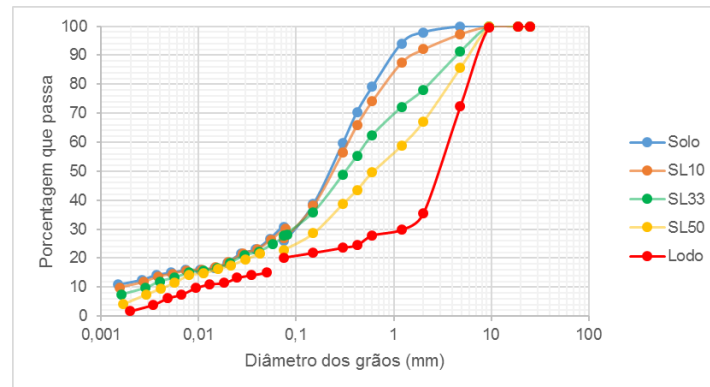


## 5 Resultados

### 5.1 Caracterização geotécnica

Iniciando pelas granulometrias, a Figura 6 abaixo reúne as curvas granulométricas encontradas para os materiais.

*Figura 6 – Curvas granulométricas*



A Tabela 2 a seguir mostra a distribuição dos grãos nas faixas de argila, silte, areia e pedregulho, bem como a classificação no sistema unificado de classificação de solos (SUCS).

*Tabela 2 – Distribuição e classificação granulométrica*

Amostra	Faixa						Classificação SUCS
	Argila	Silte	Areia fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho	
Solo	11,59%	16,33%	17,70%	33,40%	18,83%	2,12%	SM/SC
SL10	10,60%	16,62%	16,98%	29,92%	17,92%	7,95%	SM
SL33	8,18%	17,05%	14,98%	22,21%	15,61%	21,95%	SM
SL50	4,82%	18,76%	8,34%	17,65%	17,51%	32,92%	SM
Lodo	1,73%	13,85%	6,88%	5,38%	7,60%	64,56%	GM

Como pode-se notar, o solo puro é um material de granulometria mais fina que o lodo, tendo uma classificação como areia siltosa (SM). Porém, devido as imprecisões sobretudo nos ensaios de limite de Atterberg e a grande proximidade que foi observada com o grupo de areia argilosa, pode-se classificar o solo como uma areia argilo-siltosa. O lodo em seu estado higienizado apresenta-se com muitos torrões de diâmetro pedregulhoso, que não são tão facilmente destorroados, tendo uma classificação SUCS de pedregulho siltoso. Preferiu-se seguir a pesquisa sem a realização do destorroamento do material, aproximando-se mais de uma situação em campo. As misturas foram todas classificadas como areia siltosas.

Os ensaios de limites de Atterberg só foram realizados com êxito nas amostras de solo puro e SL10, nas outras amostras não foi possível a realização dos ensaios, indicando a baixa ou falta de plasticidade. O limite de liquidez do solo resultou em 18,7%, o limite de

plasticidade em 13,8%, resultando em um índice de plasticidade de 4,9%. Para a amostra SL10, o LL resultou em 14,4% e o LP em 12,1%, gerando um IP de 2,3%.

Os resultados das massas específicas dos sólidos podem ser visualizados na Tabela 3 abaixo. Nota-se que o solo apresenta a maior massa específica dos sólidos e o lodo apresenta-se como o material mais leve, as misturas apresentaram comportamento intermediário.

*Tabela 3 – Massas específicas dos sólidos*

Amostra	Resultado (g/cm <sup>3</sup> )
Solo	2,591
SL10	2,493
SL33	2,356
SL50	2,251
Lodo	1,908

## 5.2 Compactações e permeabilidades

Os resultados dos ensaios de compactação e de permeabilidade podem ser observados na Tabela 4 a seguir.

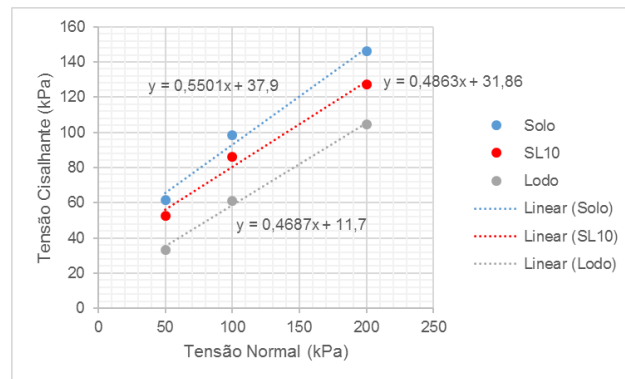
*Tabela 4 – Ensaios de compactação e permeabilidade*

Amostra	Umidade ótima (%)	Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficiente de permeabilidade (k <sub>20</sub> - cm/s)
Solo	9,00	2,020	1,00E-03
SL10	12,90	1,840	1,30E-03
SL33	22,68	1,490	5,20E-03
SL50	33,80	1,330	1,40E-02
Lodo	65,61	0,778	8,00E-02

O solo puro mostrou-se o material com menor umidade ótima, maior massa específica seca máxima e menor coeficiente de permeabilidade, enquanto o lodo apresentou maior umidade ótima, menor massa específica seca máxima e maior grau de permeabilidade. As misturas apresentaram comportamento intermediário.

## 5.3 Cisalhamento direto e Índice de Suporte Califórnia

As envoltórias de resistência obtidas através dos ensaios de cisalhamento direto podem ser visualizadas na Figura 7 abaixo. Na Tabela 5 a seguir, os valores de ângulo de atrito interno e o intercepto coesão dos materiais são expostos.

**Figura 7 – Envoltórias de resistência****Tabela 5 – Parâmetros de resistência**

Amostra	Ângulo de atrito interno	Coesão (kPa)
Solo	28,82°	37,9
SL10	25,93°	31,86
Lodo	25,11°	11,7

Para a realização deste ensaio, é necessário anteriormente passar toda a amostra através da peneira de 4,75mm, segundo as recomendações da ASTM D3080-98. O solo não sofre mudanças significativas com esta passagem, porém, cerca de 27% do lodo fica retido nesta peneira. Então, foi realizada novamente uma série de cisalhamento para o lodo puro, desta vez sem passar o material pela peneira 4,75mm, para aproximar o ensaio da condição real de campo. Não houve mudanças significativas, o ângulo de atrito interno resultou em 24,28° e o intercepto de coesão em 17,09kPa.

Os resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia podem ser visualizados na Tabela 6 abaixo.

**Tabela 6 – Resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia**

Amostra	ISC (%)	Expansão (%)
Solo	11,2	0,07
SL10	9,94	0,12
Lodo	7,64	0,61

## 6 Discussão

Pode-se agora fazer uma comparação entre os valores obtidos nos ensaios e aqueles como padrões pela literatura e expostos na seção 3.2. De maneira mais rigorosa, apenas o solo puro poderia ser utilizado em camadas diárias e intermediárias, levando-se em conta os resultados dos ensaios de permeabilidade. Porém, o coeficiente de permeabilidade da mistura

SL10 mostrou-se muito próximo ao do solo puro e, levando em conta a variabilidade dos ensaios, é justo incluir esta mistura como material adequado para estas camadas. O lodo puro e a mistura SL50 mostraram coeficiente de permeabilidade suficiente para serem utilizados como subcamada drenante na camada de cobertura final.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto mostram que a adição de lodo proporciona uma diminuição nos critérios de resistência, tanto no ângulo de atrito quanto no intercepto de coesão. Não houve mudanças significativas no comportamento da deformação durante o ensaio nos corpos de prova com a adição de lodo.

Os ensaios CBR corroboram os resultados dos ensaios de cisalhamento. A adição do lodo diminuiu a resistência à penetração (ISC) e também contribuiu para aumentar a expansibilidade do corpo de prova. De qualquer maneira, as deformações nas finas camadas diárias e intermediárias são praticamente desprezíveis quando comparadas às grandes deformações sofridas pelo lixo compactado nas células.

A mistura SL10, todavia, mostra-se geotecnicamente mais adequada. Em teoria, para a realidade natalense, com uma grosseira estimativa da produção de lodo das três estações de tratamento de esgoto da cidade quando em funcionamento, esta mistura também conseguiria dar destinação a todo o lodo produzido.

## **7 Conclusão**

Neste trabalho procurou-se estudar geotecnicamente a adição de lodo de estação de tratamento de esgoto em solo para a composição de um material a ser utilizado como camadas de cobertura em aterro sanitário.

O coeficiente de permeabilidade do lodo puro, e conseqüentemente das misturas com altas porcentagens deste, é bastante elevado, tal qual esperado para um material com esta granulometria pedregulhosa. Este fator restringe sua aplicação à locais em que esta característica é necessária, como por exemplo na subcamada drenante das camadas finais. Quanto menor a porcentagem de lodo nas misturas, menor a variação deste parâmetro em relação ao solo original, indicando que, caso o solo já atenda aos requisitos de permeabilidade, é bem possível que estas misturas também atendam.

Baseando-se nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto e índice de suporte Califórnia, é possível afirmar que quanto maior a adição de lodo no solo, maior o comprometimento das propriedades geotécnicas de resistência da mistura. Porém, camadas de cobertura em aterros sanitários não estão sujeitas a solicitações tão elevadas e não foi encontrado na literatura nenhum valor de referência para a resistência necessária nestas

camadas. Utilizando-se um solo com boas propriedades mecânicas, presume-se que misturas com pequenas porcentagens de lodo, por exemplo 10%, não afetariam tanto o desempenho do material, podendo ter as mesmas aplicações, do ponto de vista puramente geotécnico, do solo puro.

Conclui-se que a utilização de lodo higienizado como constituinte de camadas de cobertura em aterros sanitários é geotecnicamente possível e aplicável à realidade natalense. Como sugestão para futuras pesquisas, sugere-se a realização de uma análise completa de viabilidade econômica do emprego da técnica, a utilização de outro tipo de solo para ver se há alguma interação não prevista entre o lodo e o solo, investigar se há viabilidade do emprego do lodo higienizado em alguma outra aplicação geotécnica e procurar estudar do ponto de vista sanitário a técnica de higienização, a fim de otimizar a quantidade de cal a ser adicionada.

## 8 Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ALMEIDA, F. T. R.; SANTOS, G. O.; SILVA, R. A. C.; GOMES, C. C.. **Caracterização física do solo utilizado em camadas de cobertura no aterro sanitário de Caucaia-Ceará**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Sludge treatment and disposal**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; London, 2007. v. 6
- ASTM – American Society for Testing and Materials. **D3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. West Conshohocken, PA, United States, 1998.
- Companhia de desenvolvimento urbano do estado da Bahia (CONDER). **Manual de operação de aterros sanitários**. Bahia, 2010.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução N° 375/2006**.
- COSTA, N. B. **Análise da viabilidade econômica do uso de lodo de esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2012.
- Environmental Protection Agency. **Draft Environmental Guidelines : Solid Waste Landfills**. Sydney, 2015.

Environmental Protection Agency. **Guidance Note on Daily and Intermediate Cover at Landfills**. Ireland, 2004.

Environmental Protection Agency. **Landfill manuals. Landfill site design**. Wexford, Ireland, 2000.

Environmental Protection Agency. **Process design manual** : land application of sewage sludge and domestic septage. Washington, 1995.

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 BIODSÓLIDOS, 7, Campinas, 2010.

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. Disponível em: [http://esa.un.org/iys/docs/san\\_lib\\_docs/habitat2008.pdf](http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/habitat2008.pdf). Acesso em: 28mar. 2016.

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

PASSAMANI, F. R. F.; KELLER, R. ; GOLÇALVES, R.F.. **Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso**. XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitaria y Ambiental, Cancún, México. Departamento de Hidráulica e Saneamento – UFES. Vitória, 2002.

PEGORINI, E. S.; TAMANINI, C. R.; HOPPEN, C.; LEITE, B. Z.; WEIGERT, G. **Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação**: I potencial de pasteurização. IN: Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 8, 2006, Fortaleza. Rio de Janeiro: Abes, 2006b.

PRIM, E.C.. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SILVA, J. M.. **Higienização do lodo de estação de tratamento de esgoto para utilização como material de cobertura de aterro sanitário**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.