

# Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário

## *Use of the WTP and STP as an alternative material for landfill cover*

**Armando Borges de Castilhos Junior**

Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental  
da Universidade Federal de Santa Catarina  
CTC, Campus Universitário, Trindade, 88010-970, Florianópolis, SC, Brasil  
borges@ens.ufsc.br

**Elivete Carmem Clemente Prim**

Engenheira Sanitarista e Ambiental  
Doutoranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina  
CTC, Campus Universitário, Trindade, 88010-970, Florianópolis, SC, Brasil  
prim@ens.ufsc.br

**Francisco José Guedes Pimentel**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental  
Mestrando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina  
CTC, Campus Universitário, Trindade, 88010-970, Florianópolis, SC, Brasil  
francisco@ens.ufsc.br

## Resumo

Este trabalho aborda uma alternativa de valorização de lodo proveniente de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) e Estação de Tratamento de Água (ETA) por meio de seu emprego em camadas de cobertura de aterro sanitário. A prática de uso de lodo já é utilizada em alguns países e apresenta diversas vantagens: redução de custos na aquisição de material para cobertura em aterros; melhoria na qualidade do lixiviado; aporte de nutrientes para camada vegetativa, dentre outras. No presente estudo os lodos utilizados foram inicialmente caracterizados, para se conhecer suas propriedades físico-químicas e bacteriológicas. Posteriormente o lodo de ETA e ETE misturados numa proporção de 1:1 foram estabilizados com 15% de cal virgem (CaO). Numa segunda etapa foi misturado com solo argiloso também na proporção 1:1 e as características geotécnicas desta mistura foram comparadas com as do solo natural e com os valores recomendados na literatura. Os resultados indicam que o material possui potencial de utilização em coberturas de aterro.

**Palavras-chave:** *resíduos sólidos, lodo de esgoto, aterro sanitário, cobertura de aterro, avaliação geotécnica.*

## Abstract

This article is about an alternative recovery of sludge from Sewage Treatment Plant (STP) and Water Treatment Plant (WTP) through its use as landfill cover. The use of sewage sludge as alternative cover material is common in some countries and has several advantages: cost savings in the purchase of material cover, as well as, sludge disposal; improvement in the quality of leachate; nutrients supply for vegetative cover (top soil), among others. In this study, two different sludges were tested and both were initially physical-chemical and bacteriological characterized and subsequently stabilized with 15% of lime (CaO), to reach the environmental requirements to use as landfill cover. Following the study, these treated sludge were mixed with clay soil at 1:1 ratio (soil: sewage sludge and water treatment sludge stabilized) and the geotechnical characteristics of this mixture were compared with natural soil and with the recommended values from literature. The results indicate that the combination of sludge from STP and WTP, chemically treated with lime, has potential for use in landfill covers.

**Key words:** *solid waste, sewage sludge, landfill, landfill cover, geotechnical evaluation.*

## 1. Introdução

Os sistemas de cobertura são constituintes fundamentais dos aterros sanitários e objetivam reduzir a geração de lixiviado, a atração de vetores, a dispersão de gases e odores, dentre outras funções. A origem do material utilizado como cobertura é de grande relevância em projetos de aterros, devido à grande quantidade demandada ao longo de sua vida útil. Em alguns casos este pode ser obtido a partir das próprias escavações necessárias para futura disposição de resíduos – o que seria o ideal. Contudo, muitas vezes o volume de material disponível é limitado e outras fontes, como jazidas fora da área do aterro, são requeridas. Isto implica em maiores custos com transporte e aquisição do próprio material, além de que estas (jazidas) devem ser alvo de licenciamento ambiental (Reichert, 2007). Nesse sentido, uma tendência importante é a crescente aceitação de materiais alternativos para coberturas em substituição ao solo compactado.

O resíduo sólido lodo mais relevante em termos de quantidade e de volume nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) e de Água (ETAs) – tem sido estudado como materiais alternativos em diferentes áreas da engenharia.

O lodo de esgoto é empregado como coberturas de aterro corriqueiramente em diversos países como os Estados Unidos, o Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália e a África do Sul (Leblanc *et al.*, 2008). Ele é aplicado para este fim principalmente quando o biossólido (lodo estabilizado e higienizado) não atinge qualidade suficiente para usos mais nobres (ex: agricultura) ou como alternativa estratégica na gestão do lodo. O resíduo em questão pode ser utilizado tanto em cobertura diária/intermediária quanto em cobertura final, porém, precisa estar previamente estabilizado (reduzido teor de sólidos voláteis) e com umidade inferior a 50% para o primeiro caso e 80% para o segundo. Nas coberturas finais, para se evitar deslizamentos nas encostas laterais, recomenda-se que o lodo seja misturado com solo, aparas de madeira ou cinzas em proporção a ser definida em função da qualidade deste material (solo) e dos parâmetros geotécnicos e agrônômicos requisitados (Griffin *et al.*, 1998).

O lodo de água apesar de não ter sido até o presente alvo de estudos como material de cobertura tem sido aproveitado em outras áreas de engenharia que indicam também poder ser usado para este fim. As técnicas mais utilizadas no Brasil, para o aproveitamento de lodo de ETA, são: disposição no solo, fabricação de cimento, fabricação de tijolos, cultivo de grama comercial, compostagem, solo comercial e plantações de cítricos (Boscov, 2008). O lodo de ETA pode possuir uma característica mais similar aos solos do que se comparado com o lodo de esgoto. Neste caso, em geral, o nitrogênio e o carbono orgânico no lodo de ETA são mais estáveis, menos reativos e em menores concentrações. Conforme Tsutiya e Hirata (2001), as características físicas e químicas de lodos de ETA's são similares às características da argila natural e do xisto sendo que a argila natural é o material mais comumente usado em coberturas de aterros sanitários.

## 2. Materiais e métodos

Este trabalho trata do estudo de valorização de lodo proveniente da ETA (Figura 1) e ETE (Figura 2) de Jurerê Internacional, localizada na área litorânea norte do município de Florianópolis, Santa Catarina. O tratamento da água e do esgoto desta localidade é realizado por empresa privada. Conforme Habitasul (2009), o manancial de captação encontra-se a 600 metros da ETA, é caracterizado como lago artificial, que é abastecido pelas águas pluviais e do lençol freático. Possui volume aproximado de 54.000 m<sup>3</sup>, de onde é captada a vazão de 40 litros por segundo. Além do lago artificial são utilizadas ponteiras instaladas no entorno da ETA para captação das águas do lençol freático, e possuem uma capacidade aproximada de 15 l/s. O lago de captação é monitorado mensalmente por laboratório interno e externo, e avaliado quanto aos parâmetros de potabilidade e cianobactérias. A ETA tem capacidade de tratamento de 115 litros por segundo. O sistema de tratamento é do tipo convencional composto por torre de aeração, calha parshall, floculadores decantador lamelar, reservação e distribuição. O lodo da ETA é resultante da etapa de decantação e dos resíduos da limpeza da estação, os quais são encaminhados aos leitos de secagem e que depois de desidratado, a um aterro industrial.



Figura 1: Estação de Tratamento de Água,  
Fonte: Google Earth (2011).



Figura 2: Estação de Tratamento de Esgoto.  
Fonte: Google Earth (2011).

Com relação à origem do lodo de esgoto segundo Habitasul (2010), a ETE tem capacidade teórica para 5.000 habitantes. O sistema de tratamento do efluente é composto pelas etapas de peneiramento, caixa de areia, tratamento biológico (por batelada através de aeração prolongada por processo de lodos ativados), e desinfecção (efetuada com hipoclorito de sódio, de forma a garantir baixos valores de coliformes no efluente final tratado). O tratamento de lodo é realizado através de um sistema de leitos de secagem de lodo com uma área total de aproximadamente 600 m<sup>2</sup>. O lodo, após seco nos leitos de secagem, é encaminhado para disposição em aterro sanitário industrial.

Para avaliar a utilização de lodo de ETA e ETE na utilização em coberturas de aterros sanitários, consideraram-se os aspectos geotécnicos e ambientais envolvidos. Desse modo, o trabalho foi separado em

duas etapas: a avaliação ambiental do lodo tratado por estabilização alcalina em estufa agrícola; e a avaliação ambiental e geotécnica da sua utilização como cobertura de aterro sanitário.

## 2.1. Avaliação ambiental

Inicialmente, o lodo de ETA e ETE in natura foram caracterizados considerando-se os parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do resíduo. A amostragem dos resíduos foi realizada conforme a NBR 10.007 - Amostragem de Resíduos (ABNT, 2004). O material foi coletado em distintas posições e profundidades da torta de lodo no leito de secagem, para formar uma amostra composta. Posteriormente foi homogeneizada e quarteado para obtenção de material representativo. As análises físico-químicas foram realizadas com base na norma EPA SW 846 Method 3050 (U.S.EPA, 2010), no Standard Methods. As análises bacteriológicas foram realizadas com base na US *Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Under 40 CFR Part 503*. As análises de ovos de helmintos foram realizadas conforme método de Ritchie (1948). Os resultados foram comparados com a Resolução CONAMA Nº 375 (Brasil, 2006) e com os valores de referência para coberturas, encontrados na literatura.

O tratamento do lodo foi realizado através da estabilização alcalina com cal virgem (CaO) em estufa agrícola (Figura 3). Este método possibilita a redução de maus odores e de microorganismos patogênicos através da elevação da temperatura, aumento do pH, formação de amônia gasosa (stripping) e por meio da redução da umidade a níveis muito baixos (efeito da estufa). Metodologia semelhante foi estudada por Lima (2010) e por Comparini (2001), mas investigações e publicações quanto à utilização de estufa agrícola na secagem e estabilização do lodo ainda são pouco divulgadas.



Figura 3: (a) Estufa agrícola, (b) Misturador e (c) Caixas com mistura de lodo de ETA e ETE em processo de estabilização.  
Fonte: Autor (2007).

Nesta pesquisa a mistura de lodo de ETA e ETE na proporção de 1:1 foi estabilizado com 15% de cal virgem com relação à massa seca do resíduo e denominado após estabilização de AE15 que significa lodo de Água mais lodo de Esgoto estabilizado com 15% de cal. Adotou-se o percentual de 15% considerando que 50% da mistura de resíduos não contém coliformes fecais, que o uso do produto não é para fins agrônômicos e o custo do processo. Portanto, considerou-se a necessidade de elevação do pH, mas não necessariamente mantê-lo pelo menos até 12, por um período mínimo de 2 horas e acima de 11,5 por mais 22 horas, conforme orienta a Resolução CONAMA nº375 (Brasil, 2006), criada para atender a requisitos agrônômicos, de uso do material como adubo, necessitando-se para isto do uso de doses maiores de

estabilizante. No entanto, respeitou-se o tempo de 90 dias de estabilização recomendado por Andreoli (1999). Toda esta etapa foi realizada dentro da estufa agrícola, onde o experimento ficou protegido de intempéries e a energia solar pôde ser maximizada.

A avaliação ambiental foi realizada com base nos resultados da etapa de estabilização do lodo, a partir dos critérios de Griffin *et al.* (1998) e dos critérios de estabilidade e de concentração de microorganismos patogênicos definidos na Resolução CONAMA nº 375 (Brasil, 2006) como Classe B, classificação para usos como reflorestamento.

## 2.1. Avaliação geotécnica

Após a avaliação e adequação ambiental, o lodo estabilizado quimicamente foi então misturado com solo natural na proporção 1:1 (Solo:AE15) – traço definido com base em Griffin *et al.* (1998). Os autores afirmam, porém, que esta proporção pode variar em função da qualidade do solo, do lodo e dos requisitos agrônômicos e geotécnicos que se exige. O solo utilizado é originário de uma jazida do município Governador Celso Ramos, localizado a 30 km de Florianópolis.

Para a avaliação geotécnica da mistura Solo:AE15 realizou-se os ensaios citados na Tabela 1 e comparou-se os resultados com as normas e bibliografias relacionadas:

Tabela 1: Parâmetros avaliados e métodos de análise.

Ensaio	Método
Análise Granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 1984a)
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 1984b)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 1984c)
Massa Específica dos grãos	NBR 6508 (ABNT, 1984d)
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 1986)
Permeabilidade	NBR 14545 (ABNT, 2000)
Cisalhamento Direto	ASTM D3080 (ASTM, 2004)

## 3. Resultados e discussão

### 3.1. Avaliação ambiental

Primeiramente os resultados da caracterização físico-química do lodo in natura são apresentados na Tabela 2 e comparados com os valores limites estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 375 (Brasil, 2006), a qual determina critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto. Esta norma foi utilizada como referência por que no caso de o biossólido ser utilizado em coberturas finais, este exerceria função de camada vegetativa e seus nutrientes estariam disponíveis às culturas escolhidas para este fim. Também por ser a única norma brasileira que trata sobre o aproveitamento de resíduos do saneamento, especificamente lodo de ETE, e estabelece critérios e procedimentos de segurança a saúde humana e ao meio ambiente.

Como se pode perceber, os metais pesados analisados atendem aos valores limites estabelecidos pela norma. Nota-se que não foi detectado alumínio no lodo de ETE, no entanto, no de ETA a concentração é alta por causa do Sulfato de Alumínio -  $(Al_2SO_4)_3$ , utilizado no processo de tratamento de água.

Com relação ao requisito de estabilidade (relação SV/ST) o lodo de ETE in natura encontra-se muito próximo do valor determinado pelo CONAMA N° 375 (Brasil, 2006) (0,70), ao contrário do lodo de ETA in natura que apresentou um valor bem abaixo 0,36 o que é aceitável, pois há muito mais matéria orgânica no lodo de ETE do que no de ETA.

Com relação a este parâmetro Griffin *et al.* (1998), afirmam que para o biossólido ser utilizado em coberturas finais ele precisa passar por processo de redução de sólidos voláteis (minimizar a geração de odor e atratividade de vetores) e estar com umidade abaixo de 50%, no caso de coberturas diárias, e abaixo de 80% para o caso de coberturas finais.

Tabela 2: Caracterização físico-química do lodo de estação de tratamento de água e esgoto in natura.

Parâmetros	Método de análise	Unidade	Resultados ETA	Resultados ETE	CONAMA n° 375 (Brasil, 2006)
Ferro	Absorção Atômica	mg/kg	9,56	86,68	-
Alumínio	Absorção Atômica	mg/kg	1247,30	ND	-
Cálcio	Absorção Atômica	mg/kg	0,22	2,72	-
Zinco	Absorção Atômica	mg/kg	0,11	3,36	2800
Chumbo	Absorção Atômica	mg/kg	ND	ND	300
Cobre	Absorção Atômica	mg/kg	0,04	5,81	1500
Cromo Total	Absorção Atômica	mg/kg	0,06	0,42	1000
Níquel	Absorção Atômica	mg/kg	0,02	0,21	420
Cádmio	Absorção Atômica	mg/kg	ND	ND	39
Manganês	Absorção Atômica	mg/kg	1,43	2,12	-
Sólidos Totais	Gravimétrico	% (m/m)	10,20	21,27	-
Sólidos Fixos	Gravimétrico	%ST (m/m)	63,74	30,07	-
Sólidos Voláteis	Gravimétrico	%ST (m/m)	36,26	69,93	<0,7 (70%)
DQO	Oxidação	mg de O <sub>2</sub> /l	810,95	2596,65	-
Umidade	Gravimétrico	%	86,47	78,73	-
pH em H <sub>2</sub> O 1:5	Potenciométrico	-	6,68	7,92	-

Como se observa na Tabela 3, esses critérios não são atendidos para o lodo de ETA in natura é no caso de lodo de ETE atende o requisito para cobertura diária, mas não atende para cobertura final, pois a umidade do lodo in natura é de 78,73%.

Desse modo, o lodo precisou passar por processo de estabilização e redução da umidade e a técnica adotada para este fim foi a caleação em estufa agrícola. A caleação foi realizada com cal virgem comum, que continha 96,2% de óxidos totais (CaO + MgO) sendo 54,5% de óxido de cálcio (CaO), auxiliando na redução de odores e microorganismos patogênicos; a estufa, por outro lado, auxilia na redução da umidade. A Quantidade de cal utilizada foi de 15% em relação ao peso seco da mistura 1:1 de lodo de ETE mais lodo de ETA. A Tabela 3 apresenta a comparação dos valores do lodo antes e depois de ser estabilizado.

Como se pode notar na Tabela 3, o processo de tratamento adotado foi suficiente para atender aos requisitos do CONAMA para padrão Classe A e B e ao requisito de Griffin *et al.* (1998) para poder ser utilizado em coberturas alternativas de aterro sanitário

Tabela 3: Comparação entre lodo *in natura* de ETE e ETA e a mistura de lodo de ETA + ETE proporção 1: 1 estabilizado com 15% de cal em relação ao peso seco (AE15).

Parâmetros	Lodo ETA <i>in natura</i>	Lodo ETE <i>in natura</i>	Lodo AE15 estabilizado	CONAMA 375/06 (Classe B)	CONAMA 375/06 (Classe A)	Griffin <i>et al.</i> (1998)
<i>E. coli</i> (NMP/ g ST)	ausente	7,99x10 <sup>4</sup>	ausente	<10 <sup>6</sup>	<10 <sup>3</sup>	-
Ovos Helminthos* (ovo/g ST)	ausente	11	ausente	<10	<0,25	-
Relação SV/ST	0,36	0,70	0,26	<0,7	<0,7	-
Umidade (%)	86,47	78,73	11,86	-	-	<50** ou 80***

Notas: \*Ovos viáveis de *Ascaris lumbricoides*; \*\*cobertura diária; \*\*\*cobertura final.

### 3.1. Avaliação geotécnica

Após a estabilização e redução de sólidos voláteis o lodo tratado com 15% de cal foi misturado com solo argiloso na proporção de 1:1 e posteriormente os ensaios geotécnicos foram realizados. Na Figura 4 é possível visualizar a curva granulométrica do solo natural e a de mistura solo:AE15.

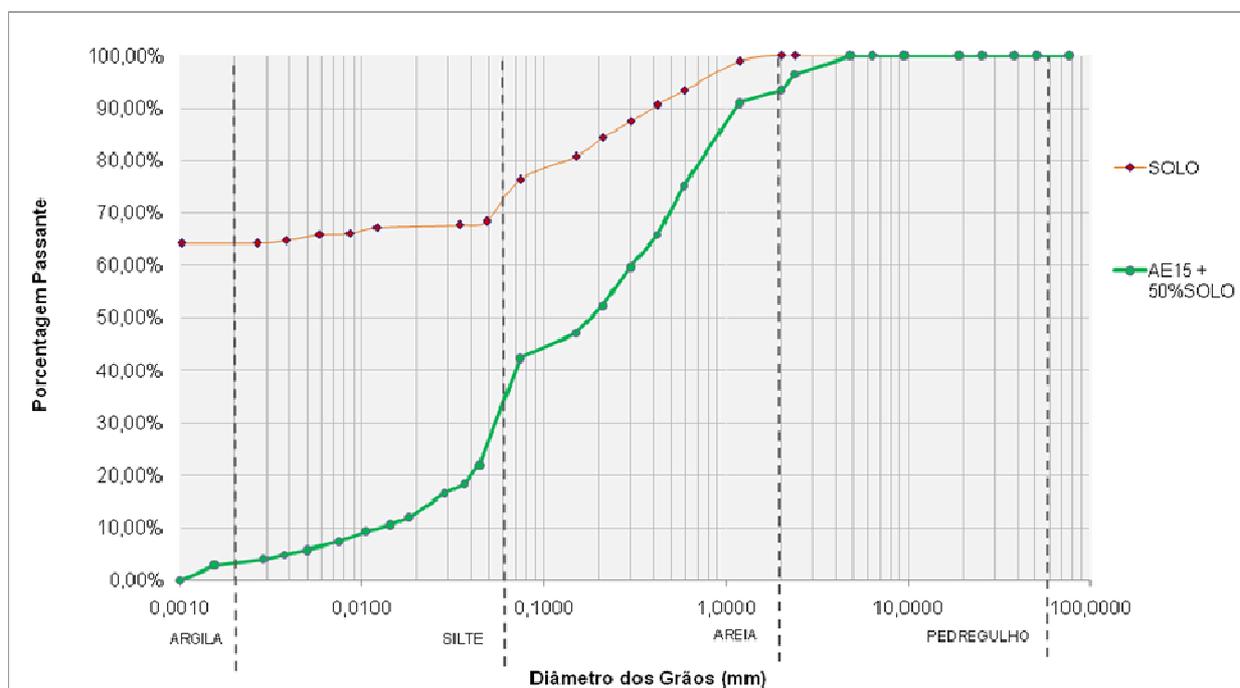


Figura 4: Curva Granulométrica do Solo Natural e da Mistura de Solo:AE15\* na proporção de 1:1. \* Mistura de lodo de ETA + ETE proporção 1:1 estabilizado com 15% de cal em relação ao peso seco.

Comparando-se ambas as curvas percebe-se que o solo natural possui maior percentual de grãos finos que a mistura solo:AE15. Isto evidencia a influência da fração de lodo com cal no aumento da granulometria da mistura. Conforme a Tabela 4, a fração de argila da mistura diminuiu 20 vezes com a adição de lodo ETA e lodo de ETE no solo, enquanto que as frações de silte e de areia grossa, média e fina aumentaram respectivamente 1.5, 3.8, 2.6 e 2.8 vezes.

Os índices de Atterberg (LL, LP, IP), da mesma maneira, evidenciam o aumento da fração de areia ao se incorporar lodo no solo, pois ao contrário da argila, a areia deixa o solo menos plástico. Por isso, o índice de plasticidade da mistura caiu 50% com relação ao solo em seu estado natural. Além disso, segundo a matéria orgânica presente em um solo - em nosso caso o lodo - eleva seu LP sem elevar seu LL, reduzindo assim seu IP. Por outro lado, o incremento de matéria orgânica proveniente do lodo resultou em diminuição da massa específica dos grãos em 5,7%.

Tabela 4: Características Geotécnicas do Solo Natural e da Mistura Solo:AE15\* (traço 1:1).

Ensaio		SOLO	SOLO:AE15* 1:1
Análise granulométrica	% Pedregulho Fino	-	6,47
	% Areia Grossa	6,63%	18,28
	% Areia Média	8,98%	22,95
	% Areia Fina	8,01%	30,34
	% Silte	12,15%	18,71
	% Argila	64,23%	3,25
Classificação SUCS		CH	SC
Limite de Liquidez (%)		86%	71
Limite de plasticidade (%)		34%	45
Índice de plasticidade (%)		52%	26
Massa esp. grãos (g/cm <sup>3</sup> )		2,62	2,47
Compactação	H <sub>ot</sub> (%)	37,51%	37,9
	γ <sub>s max.</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,22	1,23
Permeabilidade (cm/s)		3,99x10 <sup>-7</sup>	1,24x10 <sup>-7</sup>
Cisalhamento Direto	Coesão (kPa)	2	0,31
	Ângulo de Atrito (°)	27	13

\*Mistura de lodo de ETA + ETE proporção 1:1 estabilizado com 15% de cal em relação ao peso seco.

Pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS), o solo natural é classificado como argiloso e de alta compressibilidade (CH - Clay High compressibility), enquanto que a mistura é considerada areia argilosa (SC - sandy clay).

Na compactação, a umidade ótima (Hot) da mistura, assim como seu peso específico aparente máximo (γ<sub>s max</sub>) ficou mais alta que a do solo natural, o que não se esperava, já que possuía maior percentual de areia.

A comparação de resultados de cisalhamento direto entre o solo e a mistura apresenta alguns pontos interessantes: o solo natural, por conter mais grãos finos que a mistura (principalmente argila), apresentou mais coesão. A coesão da mistura chegou a ser quase 6.5 vezes menor que a do solo (2 kPa contra 0,31 kPa)

e o ângulo de atrito 51,85% menor (27° contra 13°). Contudo os resultados de cisalhamento direto são satisfatórios visto o baixo percentual de argila que contém a mistura. Isto se deve provavelmente, em função da ação cimentante da cal (CaO) e de sua associação com os minerais argílicos, principalmente as sílicas (SiO<sub>4</sub>) e as Aluminas (AlO<sub>6</sub>). As reações pozolânicas, que resultam em compostos aglutinantes e cimentantes, são baseadas principalmente na interação entre estes três compostos.

### 3.3 Requisitos geotécnicos de coberturas de aterros

No Brasil não há norma que especifique padrão geotécnico de cobertura de aterro sanitário, apenas a NBR 13.896 (ABNT, 1997) orienta o projeto e construção de cobertura final com coeficiente de permeabilidade inferior ao do solo natural da área do aterro. No entanto, tal estabelece que "o aterro deve ser executado em áreas onde haja predominância no subsolo de material com coeficiente de permeabilidade inferior a  $5 \times 10^{-5}$  cm/s" (p.3) e desse modo, conclui-se que a permeabilidade deva ser menor que  $5 \times 10^{-5}$  cm/s. Outros critérios, não obstante, são definidos por alguns autores conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Comparação do lodo in natura e da mistura solo:AE15 com Requisitos para cobertura de aterro sanitário

Solo natural	MISTURA 1:1 (solo:AE15*)	Referências			
		Rocca et al. (1993)	U.S.EPA (1998)	Qasin e Chiang (1994)	NBR 13896 (ABNT, 1997)
K= $3,99 \times 10^{-7}$ cm/s	K= $1,24 \times 10^{-7}$ cm/s	k < $10^{-7}$ cm/s	k < $10^{-5}$ cm/s	k < $10^{-7}$ cm/s	k < $5 \times 10^{-5}$ cm/s
Classificação SUCS (CH)	Classificação SUCS (SC)	Classificação SUCS (CL, CH, SC ou OH)	-	-	-
% Passante na #200 = 76,38%	% Passante na #200 = 42,36%	% Passante na #200 > 30%	% Passante na #200 > 30%	% Passante na #200 > 40%	-
LL = 86%	LL = 71%	LL > 30%	LL > 30%	LL > 25%	-

\*Mistura de lodo de ETA + ETE proporção 1:1 estabilizado com 15% de cal em relação ao peso seco.

Dentre os requisitos mínimos colocados, tanto o solo natural, quanto a mistura se apresentaram adequados para aplicação em coberturas de aterro sanitário, com exceção do critério de permeabilidade. Neste quesito, a mistura não atendeu aos valores recomendados pela literatura, Rocca et al. (1993) e Qasin e Chiang (1994), que recomendam que k seja menor  $10^{-7}$  cm/s, e os valores tanto da mistura Solo:AE15 como solo natural estão pouco acima. Mas, ficou dentro do recomendado pela U.S.EPA (1998) e atendeu à norma brasileira NBR 13.896, referente a critérios para projeto, implantação e operação de aterros. Salienta-se, portanto, que a proposta de uso de lodo em coberturas finais seria considerando-a como camada vegetativa, a qual oferece suporte para o crescimento de plantas ou camadas intermediárias.

## 4. Conclusão

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

- O lodo de ETA e ETE in natura não possuem qualidade suficiente para ser utilizado diretamente como material de cobertura em função do seu alto teor de sólidos voláteis, umidade e microorganismos patogênicos. Contudo, as concentrações de metais pesados estão todas abaixo dos padrões estabelecidos pelo CONAMA nº 375 (Brasil, 2006), devido às estações não receber contribuições industriais.
- O tratamento adotado – estabilização alcalina em estufa agrícola – foi suficiente para adequar o lodo aos critérios necessários para sua utilização em coberturas de aterro sanitário, considerando os valores verificados na literatura e o padrão Classe B do CONAMA nº 375 (Brasil, 2006).
- A comparação entre as características geotécnicas do solo natural, oriundo de jazida de aterro, e a mistura Solo:AE15 em 1:1, permitiu verificar a influência do lodo caledado nesta composição. Os resultados apontam que a adição de lodo resultou em aumento da granulometria, redução do índice de plasticidade (IP) e da massa específica dos grãos. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentam resultados significativos provavelmente em função da reação pozolânica entre a cal e os minerais argílicos presentes no solo e conseqüentemente conferindo ação cimentante à mistura.
- Tanto o solo natural, quanto a mistura Solo:AE15 atenderam aos requisitos geotécnicos para materiais de cobertura especificados pela literatura consultada. Para a variável permeabilidade atendem o recomendado pela U.S.EPA (1998) e à norma brasileira NBR 13.896 referente a critérios para projeto, implantação e operação de aterros. Salienta-se, portanto, que a proposta de uso de lodo em coberturas finais nesta fase da pesquisa seria considerando-a como camada vegetativa, a qual oferece suporte para o crescimento de plantas ou camadas intermediárias.
- No caso do uso em construção da camada impermeável, onde normalmente empregam-se argilas compactadas e/ou geomembranas, recomenda-se estudos mais longos em escala de campo, avaliando outros parâmetros geotécnicos e ambientais como a possível geração de odores, a compressibilidade, expansão, retração entre outros.

## Referências

- ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. 1999. *Lodos de Esgoto: tratamento e disposição final*. Curitiba, Ed.SANEPAR, 483 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984a. *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984b. *NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984c. *NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984d. *NBR 6508: Solo – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, ABNT.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1986. *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2000. *NBR 14545: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1997. *NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. *NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos-*. Rio de Janeiro, ABNT.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 2004. *D3080: - Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. Philadelphia, ASTM.
- BOSCOV, M.E.G. 2008. *Geotecnia ambiental*. São Paulo, Oficina de Textos. 248 p.
- BRASIL. 2006. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. Resolução 375, de 29 de agosto de 2006.
- COMPARINI, J.B. 2001. *Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa*. São Paulo, SP. Tese Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 278 p.
- GRIFFIN, R.A. *et al.* (ed.). 1998. Municipal Sewage Sludge Management at Dedicated Land Disposal Sites and Landfills. In: C. LUE-HING *et al.* (comp.), *Water Quality Management Library - Volume 4: Municipal Sewage Sludge Management: A Reference text on Processing, Utilization and Disposal*. 2ª ed., Lancaster, Technomic Publishing Company Book, p. 409-486.
- HABITASUL. 2009. Sistema de Água e Esgoto – SAE: Relatório Anual de Qualidade das Águas de Abastecimento. Florianópolis, SC. Disponível em: <http://www.jurere.com.br/sae/ete.htm>. Acessado em: 21/11/2010.
- HABITASUL. 2010. Sistema de Água e Esgoto – SAE: Estação de Tratamento de Esgoto. Florianópolis, SC. Disponível em: <http://www.jurere.com.br/sae/ete.htm>. Acessado em: 21/11/2010.
- LEBLANC, R.J. *et al.* 2008. *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). 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: 01/02/2011.
- LIMA, M.R.P. 2010. *Uso de Estufa Agrícola para Secagem e Higienização de Lodo de Esgoto*. São Paulo, SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 284 p.
- QASIM, S.R.; CHIANG, W. 1994. *Sanitary Landfill Leachate: generation, control and treatment*. Lancaster, Technomic Publishing Co., 339 p.
- REICHERT, G.A. 2007. *Manual - Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários*. Caxias do Sul, UCS, 109 p.

ROCCA, A.C. *et al.* 1993. *Resíduos Sólidos Industriais*. São Paulo, CETESB, 233 p.

RITCHIE L.S. 1948. An ether sedimentation technique for routine stool examination. *Bulletin of the United States Army Medical Department*, **8**(4):326.

TSUTUYA, M.T.; HIRATA, A.Y. 2001. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, João Pessoa, 2001. *Anais...* ABES, João Pessoa.

UNITED STATE ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). 1998. 40 CFR §258.2: Guidance for Design and Installation of Final Covers, 1998. Disponível em: <http://www.epa.gov/earth1r6/6pd/pd-u-sw/swguide.htm>. Acessado em: 05/2011.

UNITED STATE ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). 2010. SW-846. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical Chemical Methods. Disponível em: <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/main.htm#table>. Acessado em: 08/2010.

*Submissão: 17/06/2011*  
*Aceite: 24/07/2011*