



## **Avaliação das características geotécnicas do lodo de estação de tratamento de água frente à bentonita**

Maria Fernanda Benedet Machado (1), Ma. Christiane Ribeiro Müller (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) mariafernandabenedet@outlook.com, (2) christiane@unesc.net

### **Resumo**

Desde sempre, qualquer ação humana conduz à produção de resíduos. Nesse raciocínio, através do tratamento de água, remanesce o lodo. Ele é originado dos processos de coagulação e floculação e deve ser devidamente tratado e disposto sem que provoque danos ao meio ambiente. Estudos mostram que seu comportamento químico-mineralógico se assemelha ao de uma argila. Atualmente, a demanda de argilominerais para as indústrias e construção é acentuada, trazendo consequências para o meio ambiente, sendo a bentonita, um argilomineral muito utilizado em obras geotécnicas. Com base no contexto descrito, este trabalho teve como objetivo avaliar as características geotécnicas do lodo frente à bentonita, para fim de equiparar suas características avaliando sua substituição pelo rejeito. Foram elaboradas 4 misturas: L5, L20, B5 e B20, sendo 5 e 20% de lodo e bentonita em relação ao solo. O programa experimental contemplou ensaios de granulometria, teor de umidade, índices de consistência, compactação e permeabilidade. Com base nos resultados, o solo natural utilizado foi classificado segundo o sistema *Highway Research Bord* como A-2-4 e o lodo *in natura* moído como A-4. Quanto às misturas, L5 e L20 foram classificadas como A-2-4, B5 em A-2-7 e B20, A-7-6. Com relação à permeabilidade, os coeficientes variaram na ordem de grandeza entre  $10^{-5}$  e  $10^{-7}$ , indicando uma potencial aplicação como camada de proteção mecânica, usualmente utilizadas em aterros sanitários e em recuperação de áreas degradadas. Quanto a valores, a mistura B20 apresentou menor coeficiente de permeabilidade,  $1,32 \times 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$  e a mistura B5, maior,  $1,17 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ . Em suma, a substituição da bentonita pelo lodo, em algumas atividades, pode ser vista como um benefício, devido à redução de extração mineral e impactos da produção, como também uma menor contaminação com seu descarte inadequado. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi atendido, uma vez que indicou uma potencial aplicação para o reaproveitamento do lodo como alternativa sustentável e econômica.

**Palavras-chave:** resíduo; argilomineral; permeabilidade; aterro sanitário; proteção mecânica.



## Evaluation of the geotechnical characteristics of water treatment plant sludge in front of bentonite

### Abstract

Any human action has always led to the production of waste. In this reasoning, through the treatment of water, the sludge remains. It is originated from the coagulation and flocculation processes and must be properly treated and disposed of without causing any damage to the environment. Studies show that its chemical-mineralogical behavior is similar to that of a clay. Currently, the demand for clay minerals for industries and construction is accentuated, bringing consequences for the environment, and bentonite is a clay mineral widely used in geotechnical works. Based on the described context, this study aimed to evaluate the geotechnical characteristics of the sludge against bentonite, in order to match its characteristics by evaluating its replacement by the tailings. Four mixtures were prepared: L5, L20, B5 and B20, 5 and 20% of which were sludge and bentonite in relation to the soil. The experimental program included tests of granulometry, moisture content, consistency indexes, compaction and permeability. Based on the results, the natural soil used was classified according to the Highway Research Board system as A-2-4 and the fresh ground sludge as A-4. Regarding the mixtures, L5 and L20 were classified as A-2-4, B5 as A-2-7 and B20, A-7-6. Regarding permeability, the coefficients varied in the order of magnitude between  $10^{-5}$  and  $10^{-7}$ , indicating a potential application as a mechanical protection layer, usually used in landfills and in recovery of degraded areas. As for values, the B20 mixture showed lower permeability coefficient,  $1.32 \times 10^{-7}$  cm.s<sup>-1</sup> and the B5 mixture, higher,  $1.17 \times 10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup>. In short, the replacement of bentonite by sludge, in some activities, can be seen as a benefit due to the reduction of mineral extraction and impacts of production, as well as a lower contamination with its inadequate disposal. Thus, the objective of this study was met, since it indicated a potential application for the reuse of sludge as a sustainable and economic alternative.

**Keywords:** waste; clay; permeability; sanitary landfill; mechanical protection.

### Introdução

A crescente busca pela qualidade de vida dos homens acarreta para a natureza mais demanda de si e conseqüentemente a maior geração de rejeitos para o seu meio. Em geral, qualquer ação feita pelo homem gera resíduo. Muitos deles possuem potencial de serem reutilizados e reciclados, enquanto outros são considerados tóxicos, apresentando algum grau de periculosidade. Os tipos de descartes corretos dos resíduos e as possibilidades de reutilizações vêm sendo cada vez mais estudados em defesa do desenvolvimento sustentável.

O consumo de água tratada é um dos processos que exige essa qualidade e que gera resíduos para o meio. Uma água de qualidade significa uma água inofensiva à saúde do homem, agradável aos sentidos, adequada ao uso doméstico e não deve conter microrganismos patogênicos. Para tal, a água bruta deve passar por um processo de tratamento, sendo o mais comum em Estações de Tratamento de Água (ETA's). Nas estações o processo de tratamento engloba as etapas de aeração, coagulação, floculação, decantação, filtração, cloração e fluoretação, sendo que o produto final desse sistema de tratamento gera um subproduto, o lodo.

Esse lodo é originado pelos processos de coagulação e floculação, e fica depositado nos decantadores e presentes na água de lavagem dos filtros. Entre 60 e 95% do lodo gerado fica acumulado nos tanques de decantação/flotação e o restante nos filtros. Essa quantidade de lodo depende da natureza da água bruta, dos produtos químicos usados nos processos e do desempenho do tratamento (RICHTER, 2001).

Segundo Boscov (2008), o lodo de ETA é composto por água e sólidos suspensos, constituídos de partículas coloidais a finas, acrescidos dos produtos químicos aplicados durante o processo de tratamento. Ele é biologicamente inerte, possui baixo teor de matéria orgânica biodegradável, mas pode conter bactérias, vírus e algas. O lodo também apresenta alguns metais que possuem ações tóxicas, como cobre, zinco, níquel, chumbo, cromo, alumínio e outros. A maioria das estações de tratamento utilizam hidróxido de alumínio ou ferro no processo de coagulação.

Segundo a NBR 10004 de 2004, os resíduos são classificados em classes: classe I (perigosos), classe II (não perigosos), classe II A (não inertes) e classe II B (inertes). Os resíduos gerados em ETA's são classificados como resíduos sólidos e devem ser devidamente tratados e dispostos sem que provoquem danos ao meio ambiente. Boscov (2008) ressalta que a periculosidade do resíduo deve ser determinada por meio de ensaios de lixiviação e de dissolução. Oliveira (2004) e Aboy (1999) realizaram os ensaios, e concluíram que os lodos testados são resíduos sólidos da Classe II A (não inertes), ou seja, não apresentam periculosidade e podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Há alguns métodos alternativos de disposição final em defesa do meio ambiente, como em lagoas para detenção, aplicação em terrenos, aterros sanitários, incineração e até

aproveitamento de subprodutos. Usualmente, a disposição em aterros é o mais comum, no entanto, para tal, o lodo deve passar por um processo de desidratação para chegar em um teor de sólidos de no mínimo 20% (RICHTER, 2001).

Um dos objetivos de trabalhar com o lodo é a redução de seu volume, a fim de que ele possa ser disposto de forma adequada, reduzindo custos de transporte, disposição final e, principalmente, os riscos de poluição do meio ambiente. Estudos realizados com o lodo, como de Oliveira (2004) e Rodrigues (2013), verificaram que ele é rico em minerais como a caulinita e quartzo.

A respeito dos argilominerais, sua forte demanda para a indústria e construção civil gera esgotamento das jazidas minerais, o que os tornam caros e escassos. Além do mais, a extração e manufatura desses, trazem consequências para o meio ambiente. Existem três principais grupos de minerais de argilominerais: caulinitas, esmectitas e ilitas. O grupo das esmectitas é fortemente utilizado em contenções de terra. Elas são os principais componentes do argilomineral montmorilonita, comercialmente conhecida como bentonita (PAGANI, 2007). Segundo Bertolino (2010), a bentonita possui como principal constituinte o argilomineral montmorilonita, seguindo da caulinita e quartzo, como também composta por illita e muscovita. Já a bentonita estudada por Farnezi (2006), tem composição mineralógica resumida em montmorilonita, caulinita, quartzo e mica.

Segundo Batista (2006), a técnica do uso de bentonita foi originada de perfurações de poços de petróleo, na qual são usadas lamas bentoníticas (mistura de bentonita e água) para manter a estabilidade do furo (impermeabilização e contenção do solo lateral). A bentonita também é utilizada em indústrias farmacêuticas, alimentícias, cosméticas e de combustíveis. Na construção civil, ela é fortemente utilizada em obras geotécnicas, como em aterros, cortinas verticais, diafragmas e fundações.

A principal característica da bentonita é sua capacidade de expansão, formando géis tixotrópicos (géis que se transformam, reversivelmente, em líquidos quando agitados). Existem dois tipos principais de bentonita: sódica e cálcica. “A sódica é mais expansiva e possui menor condutividade hidráulica que a cálcica, por isso é bastante usada na selagem e impermeabilização. Entretanto, a bentonita cálcica é mais estável quimicamente se exposta a compostos químicos” (DANIEL; KOENER, 1993, p. 41).

Segundo Daniel e Koerner (1993, p. 69) “a qualidade da bentonita é avaliada através dos limites de Atterberg e de ensaios de expansão livre. Uma bentonita sódica de média qualidade tem limite de liquidez entre 300 e 500% enquanto uma de alta qualidade tem entre 500 e 700%”. Logo, quanto maior o limite de liquidez e plasticidade, melhor é a qualidade da bentonita. Os testes de expansão livre mostram que quanto maior a capacidade de expansão da bentonita, melhor ela é.

Os limites de Atterberg descrevem a consistência de solos granulares finos com variados teores de umidade, ou seja, determina o comportamento do solo dependendo do teor de umidade. O limite de plasticidade (LP) é o teor de umidade, em porcentagem, na transição do estado semissólido para o estado plástico enquanto o limite de liquidez (LL) é o teor de umidade no ponto de transição entre o estado plástico e o estado líquido. O índice de plasticidade (IP) é dado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade de um solo. Burnister (1949) classificou o índice de plasticidade em: sem plasticidade (0), leve (1 a 5), baixa (5 a 10), média (10 a 20), alta (20 a 40) e muito alta (>40) (DAS, 2014).

Além dos limites de Atterberg, a granulometria, compactação e permeabilidade também são propriedades importantes para a caracterização de solos. Em termos de granulometria a NBR 7181 de 2016 divide, em geral, os solos em matacão, pedra, pedregulho, areia grossa, areia media, areia fina, silte e argila.

Os solos, quando utilizados em obras geotécnicas, são classificados de acordo com o tamanho dos grãos que os predominam, as frações constituintes e pelos Limites de Atterberg. O Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e *Highway Research Board* (HRB), normalizado pelo AASHTO, são os sistemas mais utilizados para classificação de solos.

A compactação é outra propriedade fundamental a ser analisada para caracterizar o solo. Ela é regida através do Ensaio Compactação, Ensaio de Proctor (NBR 7182:2016). Um dos fatores fundamentais na compactação é a umidade em que o solo se encontra. Caso seja uma umidade baixa, o atrito entre as partículas se torna muito alto, não tendo grandes reduções de vazios. Já em umidades mais altas, a água se torna um lubrificante entre os grãos, resultando em uma organização mais compacta. Porém, a partir de um certo teor de umidade, a compactação não surge mais efeito, ou seja, ela não consegue mais expulsar o ar dos vazios

pois o grau de saturação já é elevado e o ar está envolvido por água. Assim, há definido para a energia aplicada na compactação: “umidade ótima” (teor de umidade máximo), “massa específica seca máxima” ou “densidade seca máxima” (PINTO, 2006).

Por fim, o estudo da permeabilidade dos solos também possui total importância neste estudo. Solos permeáveis são aqueles que possuem espaços vazios interconectados, onde a água consegue fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia (DAS, 2014). Uma obra que necessita ter baixa permeabilidade, como, por exemplo, cortinas verticais e contenções, exige o controle da permeabilidade através do coeficiente de condutividade hidráulica, que é a propriedade do solo que descreve a maior ou menor facilidade com que a água consegue passar através de seus vazios.

Segundo Pagani (2007) em obras geotécnicas com função de barrar a percolação, a quantidade de bentonita que é misturada no solo depende diretamente do teor de umidade do solo. Será maior quando o solo estiver seco, e menor quando o solo encontrar uma umidade alta. Em relação a granulometria, “solos com maior porcentagem de finos plásticos na sua granulometria irão ter menores valores de condutividade hidráulica se comparados a materiais de maior diâmetro e não-plásticos” (PAGANI, 2007, p.34)

A partir do exposto, esse trabalho tem o objetivo de avaliar as características geotécnicas do lodo de estação de tratamento de água frente à bentonita, para fim de equiparar suas características e assim, avaliar sua substituição pelo rejeito (lodo). A caracterização é feita mediante a ensaios de análise granulométrica, de teor de umidade, Limites de Atterberg, compactação e permeabilidade, com objetivo principal: a permeabilidade.

## **Materiais e Métodos**

Para a realização deste estudo, foram utilizadas amostras de lodo de estação de tratamento de água, bentonita e solo, conforme mostra a Figura 1. De posse dos materiais, foram feitas misturas de lodo com o solo e bentonita com o solo. O estudo seguiu a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 2.



Figura 1. Materiais utilizados (a) lodo de ETA seco e moído (b) bentonita sódica (c) solo

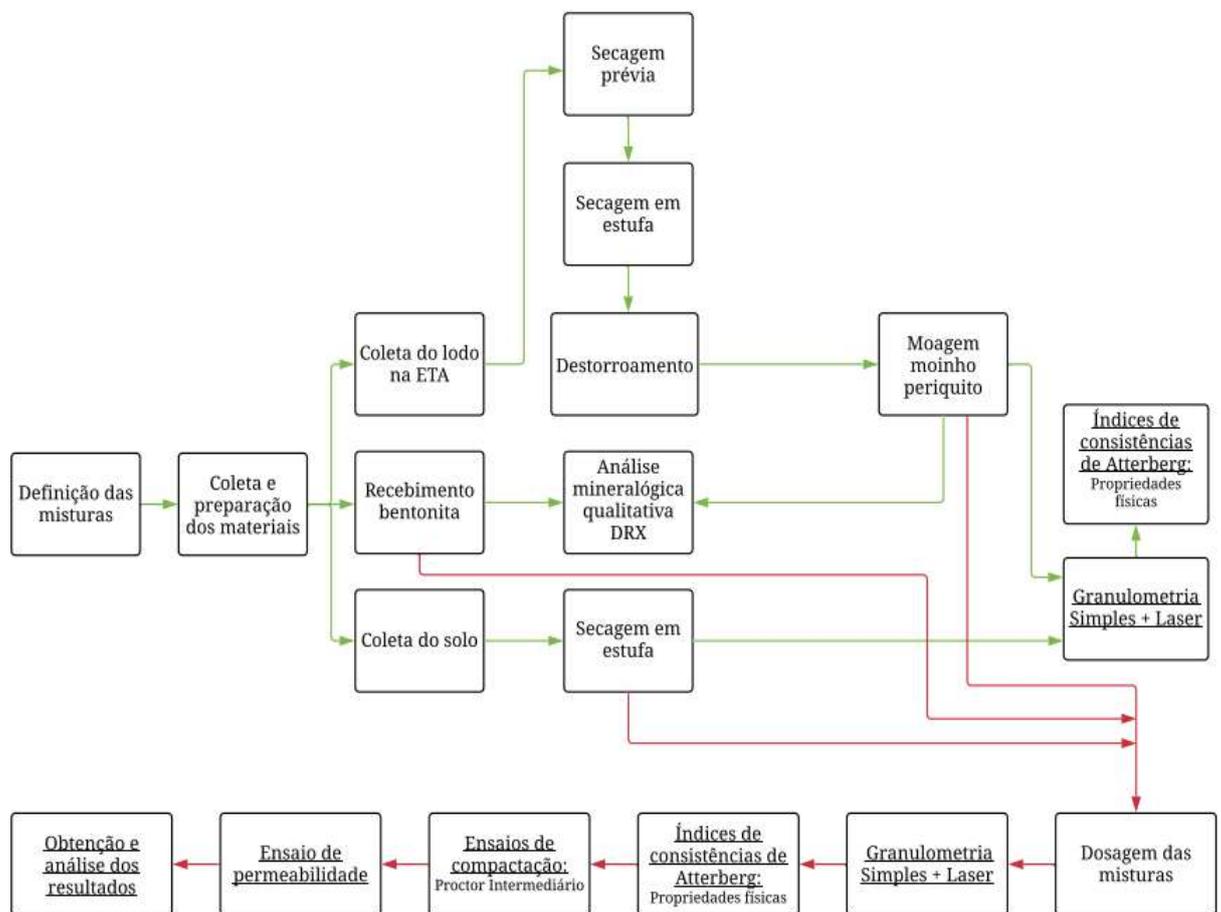


Figura 2 Fluxograma metodológico

O lodo foi obtido de uma Estação de Tratamento de Água localizada em um município de Santa Catarina. O produto utilizado na coagulação é o sulfato de alumínio e o lodo é descartado sem tratamento num sistema de tubulações onde desemboca em um curso de água próximo.

A bentonita analisada foi a sódica, doada pela empresa UM – Urussanga Minérios, localizada no município de Criciúma, Santa Catarina. O solo foi retirado de uma jazida

localizada no município de Torres, Rio Grande do Sul, cujas coordenadas são 619197.01 m E e 6755709.01 m S, Datum SIRGAS2000. A Figura 3 apresenta o local de extração do solo.



Figura 3. Local de extração do solo utilizado (Fonte: *Google Earth Pro*, 2019)

As porcentagens de materiais foram feitas com base em pesquisas já realizadas com os materiais separadamente. Conforme Hoepen (2004), misturas de 4 e 8% de lodo na substituição ao peso do agregado miúdo do concreto eram os melhores teores para atingir uma boa resistência. Já Oliveira (2004) recomendou teores de até 15% de lodo em relação a massa argilosa para ter comportamento adequado no uso em cerâmica vermelha.

Deste modo, foram definidas duas misturas com 5% e 20% de lodo em relação ao peso de solo. Para equiparar o lodo e bentonita, os valores de porcentagem de bentonita em relação ao solo foi a mesma do lodo. As Tabelas 1 e 2 apresentam as porcentagens de misturas de lodo e solo e bentonita e solo, respectivamente.

Tabela 1. Porcentagens de materiais das misturas de lodo e solo

Mistura	L5	L20
% Lodo	5	20
% Solo	95	80

Tabela 2. Porcentagens de materiais das misturas de bentonita e solo

Mistura	B5	B20
% Bentonita	5	20
% Solo	95	80



Os ensaios de permeabilidade para as misturas L5, L20 e B20 foram realizados no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) do município de Criciúma, Santa Catarina. Os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do Parque Científico e Tecnológico (Iparque) da Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc). Os experimentos seguiram as instruções das normas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Normas Técnicas Brasileiras para ensaios de laboratório

Ensaio	Normas técnicas
Preparação de amostras de solo	NBR 6457:2016
Análise granulométrica de solos	NBR 7181:2016
Determinação do Limite de liquidez	NBR 6459:2016
Determinação do Limite de plasticidade	NBR 7180:2016
Compactação de solos	NBR 7182:2016
Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável	NBR 14545:2000

Para a preparação das misturas ilustradas nas Tabelas 1, o lodo foi seco em estufa e destorroado, tendo que ser fragmentado no moinho periquito com porcelana vitrificada para ser reduzido para fração < 35 Mesh (425  $\mu\text{m}$ , 40 ASTM).

Com relação aos materiais, bentonita sódica e lodo, foi feita a análise mineralógica qualitativa por difração de raios X, com a finalidade equiparar suas fases cristalinas.

Com relação a determinação da composição granulométrica dos finos, esta foi realizada a partir da análise do passante na peneira nº 200. Já, para o estudo da granulometria por peneiramento simples, foram utilizadas peneiras de série normal com malhas de forma quadrada e de maneira sequencial.

Quanto aos índices de consistências, foram calculados o LL através do Aparelho de Casagrande e o LP através de um gabarito cilíndrico com utilização de um vidro esmirilhado. De posse dos resultados, foi determinado o índice de plasticidade das misturas. Nos ensaios de compactação foi adotada a energia intermediária com utilização do cilindro pequeno, compactando, deste modo, com 21 golpes cada uma das três camadas. Após encontrar a umidade ótima, a sequência operacional se direcionou para o ensaio de permeabilidade. Para

tal, foi moldado um corpo de prova cilíndrico na umidade ótima, sendo este vedado por uma camada de bentonita.

### Resultados e discussões

Os resultados obtidos da análise mineralógica qualitativa por difração de raios X, tanto do lodo puro quanto da bentonita sódica apresentam quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) em sua composição. No caso da amostra de lodo, esta foi composta de picos de quartzo apenas, confirmando sua estrutura cristalina para essa fase mineral. Quanto à bentonita, esta apresentou picos de quartzo e montmorilonita, confirmando, também, sua estrutura mineral conforme descrito anteriormente.

Os resultados dos ensaios de granulometria podem ser observados na Tabela 4 e as curvas de distribuição granulométricas das misturas na Figura 4. Para melhor análise dos finos, foram feitas granulometrias à laser do passante na peneira de número 200 das misturas e encontrado o diâmetro médio das partículas.

Tabela 4. Resultados obtidos nos ensaios granulométricos

Misturas	Solo <i>in natura</i>	Lodo <i>in natura</i>	L5	B5	L20	B20
% Pedregulho	0	0	0	0	0	0
% Areia	75,27	61,33	75,90	72,43	75,44	59,18
Passante nº 200 (%)	24,72	38,67	24,10	33,15	24,56	40,81
Classificação HRB	A-2-4	A-4	A-2-4	A-2-7	A-2-4	A-7-6
Classificação SUCS	SC	SM	SM	SC	SC	SC
Diâmetro médio das partículas granulometria à laser (mm)	0,00528	0,0255	0,01906	0,00716	0,02595	0,00757
Classificação NBR 7181:2016 granulometria à laser	Silte	Silte	Silte	Silte	Silte	Silte

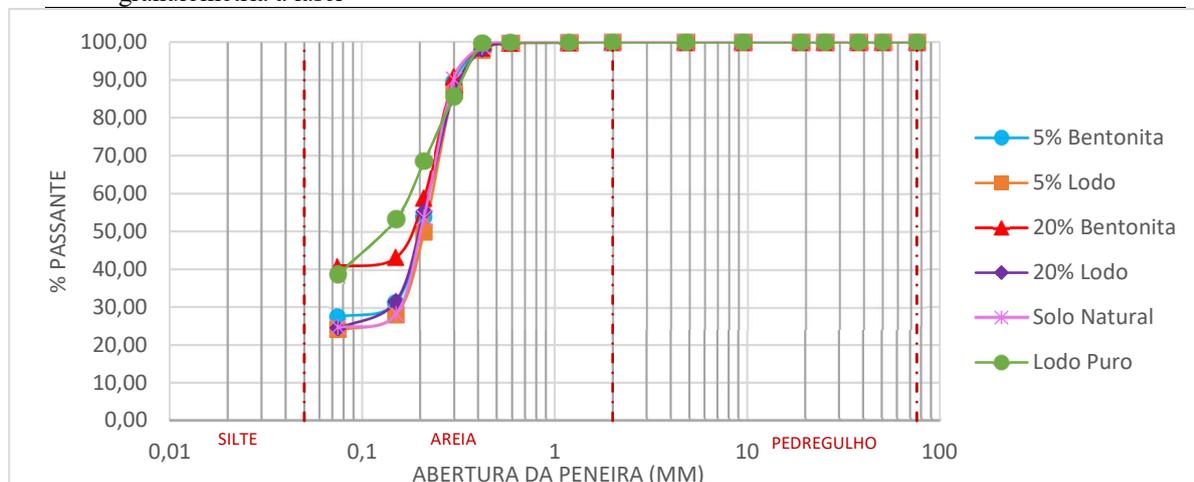


Figura 4. Curvas de distribuição granulométrica das misturas propostas

O solo natural utilizado para as misturas foi classificado segundo o sistema HRB como A-2-4, areias cujos finos constituem a característica secundária classificadas em função de seus índices de consistência, tendo 24,72% de passante na peneira de nº 200. Já pelo sistema SUCS, foi classificado como SC, areia argilosa. Foi obtido um limite de liquidez de 27%, limite de plasticidade de 19% e assim, índice de plasticidade de 8%.

O lodo *in natura* moído foi classificado pelo sistema HRB como A-4, solo siltoso, tendo 38,37% passante na peneira de nº 200. Já pelo sistema SUCS, foi classificado como SM, areia siltosa. Ele não apresentou plasticidade ao fazer os ensaios dos limites de Atterberg.

Pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) as misturas L5, B5, L20 e B20 foram classificadas como solos grossos, onde mais de 50% do material ficou retido na peneira de nº 200. A mistura B5, L20 e B20 foram classificadas como SC, areia argilosa. A mistura L5 foi classificada como SM, areia siltosa.

Já pelo sistema *Highway Research Bord* (HRB) a mistura B20 foi classificada como A-7-6, solos argilosos, um solo fino por apresentar uma porcentagem passante na peneira nº 200 maior que 35%. As demais misturas foram classificadas como materiais granulares, sendo L5 e L20 como A-2-4, areia e areia siltosa ou argilosa, a mistura B5 como A-2-7, areia e areia siltosa ou argilosa.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios dos índices de consistência das misturas. Foi observado que com o aumento do teor de bentonita e lodo houve um acréscimo nos limites de liquidez e plasticidade. Porém na mistura com o lodo, segundo critérios estabelecidos por Burnister em 1949, o índice de plasticidade obteve uma redução, passando de plasticidade média, na mistura contendo 5% de lodo, à plasticidade baixa, na mistura contendo 20% lodo. As misturas contendo bentonita possuem plasticidade muito alta.

Tabela 5. Resultados obtidos nos ensaios dos limites de consistências de Atterberg

Misturas	Solo <i>in natura</i>	Lodo <i>in natura</i>	L5	B5	L20	B20
Limite de Liquidez (%)	27	NL	23	57	29	101
Limite de Plasticidade (%)	19	NP	13	15	21	26
Índice de Plasticidade (%)	8	-	10	42	8	75

Os resultados do ensaio de compactação estão apresentados na Tabela 6. Foi analisado que o acréscimo de bentonita e lodo ocasionou o aumento no teor de umidade ótima e



diminuição da densidade seca máxima. Deste modo, como esperado, as maiores umidades ótimas ocorreram nas misturas com bentonita quando comparadas com lodo, sendo a maior umidade ótima na mistura B20, devido às características da bentonita relacionadas à plasticidade.

Tabela 6. Resultados obtidos nos ensaios de compactação Proctor Intermediário

Misturas	L5	B5	L20	B20
Densidade seca máxima (g.cm <sup>3</sup> )	1,821	1,718	1,682	1,61
Umidade ótima (%)	15,5	16,8	20,2	20,7

Os resultados dos ensaios de permeabilidade feitos para cada amostra podem ser visualizados na Tabela 7. A Figura 5 apresenta os intervalos de variação de coeficientes de permeabilidade segundo Cavalcante e Casagrande (2006). Para a mistura contendo 5% lodo o coeficiente de permeabilidade (k) obtido foi  $7,78 \times 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$ . Já a mistura contendo 5% de bentonita apresentou  $1,17 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ . A mistura de 20% de lodo apresentou  $5,75 \times 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$ , enquanto que a mistura de bentonita apresentou  $1,32 \times 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$ . Em comparação as misturas de lodo e bentonita nas mesmas porcentagens, foi percebido uma diferença de  $6,46 \times 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$  para a porcentagem de 5% e  $4,43 \times 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$  em 20%.

No entanto, a redução na ordem de grandeza da permeabilidade das composições com o aumento do teor de lodo por si só, demonstra a capacidade positiva do uso do resíduo. Apesar da redução na ordem de grandeza da permeabilidade das composições, as misturas apresentaram valores de coeficientes na ordem entre  $10^{-5}$  e  $10^{-7}$ , ou seja, são considerados materiais com permeabilidade baixa a muito baixa e com potencial aplicação em camadas de proteção mecânica.

Tabela 7. Resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade

Misturas	L5	B5	L20	B20
Coeficiente K de permeabilidade (cm.s <sup>-1</sup> )	$7,78 \times 10^{-7}$	$1,17 \times 10^{-5}$	$5,75 \times 10^{-7}$	$1,32 \times 10^{-7}$



Figura 5. Intervalos de variação de coeficiente de permeabilidade (Fonte: Cavalcante e Casagrande, 2006)

## Conclusões

A permeabilidade é uma propriedade muito importante em aterros sanitários. É necessário controlar a percolação através de camadas impermeáveis. Essas camadas podem ser executadas com solos compactados que obtenham coeficientes de permeabilidade satisfatórios para essa finalidade (BOSCOV, 2008).

Segundo a Tabela 8, para Rocca *et al.* (1993), Daniel (1993) e Qasin e Chiang (1994), autores citados por Prim (2011), os solos que apresentam coeficiente  $k \leq 10^{-7}$  são indicados para uso em coberturas de aterros com finalidade de impermeabilização. Foi verificado que as misturas apresentaram coeficientes na ordem  $10^{-5}$  e  $10^{-7}$ , valores não suficientes para serem considerados impermeabilizantes. No entanto, apesar da redução na ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade das misturas com o aumento do teor de lodo, houve comprovação de uma tendência positiva ao uso do resíduo.

Segundo Dias (2014), os materiais que possuírem um coeficiente de permeabilidade menor que  $10^{-5}$  são apropriados ao uso exclusivo em camadas protetoras das barreiras hidráulicas ou como camadas de proteção mecânica. A NBR 13896 de 1997 relata que o aterro deve ser executado em áreas onde o subsolo tenha predominância de material com coeficiente de permeabilidade inferior a  $5 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ . Relata, também, a existência no local de um depósito natural de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-6} \text{ cm.s}^{-1}$ . Logo, todas as misturas apresentaram resultados adequados para servirem como camadas protetoras das barreiras hidráulicas.

Tabela 8. Características de solos adequados a impermeabilização de aterros sanitários (Fonte: PRIM, 2011)

Referências	Rocca et al. (1993)	Daniel (1993)	Qasin e Chiang (1994)	NBR 13896 (ABNT, 1997)
Coeficiente de permeabilidade (k)	$\leq 10^{-7} \text{ cm/s}$	$< 10^{-7} \text{ cm/s}$	$\leq 10^{-7} \text{ cm/s}$	$< 5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

Com relação à granulometria, o acréscimo de bentonita na composição demonstrou um aumento de finos, porém, em relação às misturas com lodo, não houve um acréscimo significativo nessa proporção. Em termos de plasticidade as misturas com bentonita se mostram muito mais plásticas que as com o lodo. Solos que possuem maiores porcentagens de finos

plásticos na sua composição granulométrica possuem menores valores de condutividade hidráulica quando comparados aos solos com menos finos e não plásticos.

Os resultados apresentados para a mistura L5, umidade ótima de 15,5% e índice de plasticidade de 10%, e para a mistura L20, umidade ótima de 20,2% e índice de plasticidade de 8%, mostraram um decréscimo na plasticidade e um aumento na umidade ótima no ensaio de compactação, fato este relacionado pela sua composição predominantemente arenosa. Quanto à adição de bentonita, a mistura B5 apresentou umidade ótima de 16,8% e índice de plasticidade de 42% e a B20 umidade ótima de 20,7% e índice de plasticidade de 75%. Tal situação demonstrou um aumento tanto na umidade ótima quanto nos índices de plasticidade, conferindo às misturas um comportamento mais plástico, justificado pelas características tixotrópicas da própria bentonita.

Para trabalhos futuros, é sugerido aumentar o percentual de bentonita e lodo das misturas, como 30%, buscando avaliar se, com porcentagens maiores de lodo ou bentonita, seria possível de alcançar o coeficiente adequado para impermeabilização. Também fica como sugestão a realização de análises química e ambiental do resíduo estudado para que não haja contribuição em possíveis contaminações com o seu uso já que barreiras hidráulicas exigem baixa condutividade hidráulica por longos períodos de tempo, justificando a importância das análises de lixiviação e de dissolução para classificar o resíduo como inerte ou não inerte. Quanto às camadas de proteção mecânica, é indicado estudar a trabalhabilidade do resíduo, pois tendo baixa plasticidade, a sua capacidade de ser moldado e modelado pode estar comprometida.

Em relação ao meio ambiente, a substituição da bentonita pelo lodo, em algumas atividades, pode ser vista como um benefício, devido à redução de extração mineral e impactos da produção, como também uma menor contaminação com seu descarte inadequado. Em vista do lodo, sua finalidade não seria mais o descarte indevido em cursos de água próximos, mas sim, o seu reaproveitamento como alternativa sustentável e econômica.

## Referências bibliográficas

ABOY, Nuria. **Secagem natural e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. 01/01/1999 133 f. Mestrado em Recursos Hídricos E Saneamento Ambiental Instituição de Ensino: Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre. Biblioteca Depositária: Setorial do IPH.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.

BATISTA, Priscila. **Avaliação geotécnica de misturas de um solo laterítico com cimento e bentonita para uso em cortinas verticais**. 2006. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

BERNHARDT, Eduarda Peterle. **Estudo de caracterização de misturas de cinza volante de carvão, argila bentonítica e resíduos de construção civil para aplicação em aterros sanitários**. 2018. 15 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

BERTOLINO, Luiz Carlos et al. Caracterização mineralógica e estudos de beneficiamento da bentonita de Pedra Lavrada - PB. In: Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste, 2., 2010, Campina Grande. **Anais**. Campina Grande: CETEM, 2010. p. 23 - 30.

BITENCOURT, Bárbara Maria Oliveira. **Influência do teor de bentonita nas propriedades hidromecânicas de um solo compactado**. 2016. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Ed. Oficina de Letras. 2008. 248 p.
- BRASÍLIA. Thiago Henrique Cardoso da Silva. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Bentonita**. 2013. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/sumarios/bentonita-sumario-mineral-2014/view>>. Acesso em: 20 mar. 2019.
- CAVALCANTE, Erinaldo Hilário; CASAGRANDE, Michéle dal Toé. **Mecânica dos Solos II: Notas de Aula**. Aracaju: Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, 2006. 79 p. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe.
- DANIEL, D.E.; KOERNER, R.M. **Technical Guidance Document: Quality Assurance and Quality Control for Waste Containment Facilities**. Ohio, 1993. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30002ZO7.PDF?Dockey=30002ZO7.PDF>>. Acesso em: 30 mar. 2019.
- DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 612 p. Tradução de: Noveritis do Brasil ; Revisão Técnica: Roberta Boszczowski.
- DI BERNADO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L.. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Paulo: Ed. Rima, 2002. 237 p.
- DIAS, Mônica. **Viabilidade de uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistema de cobertura de aterro sanitário**. Goiânia – GO: UFG, 2014, p.100.
- FARNEZI, M. K. **Alternativa de melhoramento técnico de solos tropicais para uso em sistemas basais de selagem, através da aplicação de bentonita**. 2006. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- HEINECK, Karla Salvagni. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreias horizontais impermeáveis**. 2002. 275 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- HOPPEN, C. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo para preservação ambiental**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- MORANDINI, T. L. C. **Solos tropicais e bentonita: análise geotécnica de misturas com ênfase na abordagem coloidal**. 2014. 267f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotecnia) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- MOTA, Carla Bonezi Nunes da. **Estudo comparativo do impacto ambiental produzido pelo uso de lama bentonítica e de polímero em obras de fundações na construção civil**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2010.
- OLIVEIRA, Elza Maria Senra de. **Estudo da valorização e reciclagem de resíduo proveniente de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha**. 2004. 112 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2004.

PAGANI, Bianca Reis. **Estudo de misturas solo-cimento-bentonita-fibra para uso em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PINHEIRO, Bruno Carlos Alves; ESTEVÃO, Gustavo Matias; SOUZA, Débora Pinto. Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha Parte I: caracterização do lodo. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 19, n. 3, p.204-211, set. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-70762014000300003>.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PRIM, Elivete Carmen Clemente. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. 2011. 279 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Doutorado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Cap. 8.

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F.. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Cerâmica**, [s.l.], v. 59, n. 352, p.551-556, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132013000400010>.

SANTOS, Eduarda Fração; SCAPIN, Juliana; PINHEIRO, Rinaldo José Barbosa. **Estudo de misturas de solo com adição de lodo de estação de tratamento de água para uso em aterro sanitário**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO, 19º COBRAMSEG, 2018, Salvador.. ABMS, 2018. Disponível em: <[https://www.dropbox.com/sh/qqw8mytwyi1l2yk/AAAvqqjUwz1lE3mS8rba6ZOia/Geotecnia%20Ambiental?dl=0&preview=36160.pdf&subfolder\\_nav\\_tracking=1](https://www.dropbox.com/sh/qqw8mytwyi1l2yk/AAAvqqjUwz1lE3mS8rba6ZOia/Geotecnia%20Ambiental?dl=0&preview=36160.pdf&subfolder_nav_tracking=1)>. Acesso em: 13 abr. 2019.

SCARABELOT, Camila Dal Pont. **Estudo do comportamento geotécnico da predominância do resíduo da construção civil em solo argiloso para aplicação em obras de recuperação ambiental**. 2018. 15f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

SILVA, Mauro Valério da. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, Tiago Luiz Costa da. **Estudo do comportamento geotécnico de misturas de solo argiloso e resíduos da construção civil para aplicação como barreira hidráulica em áreas**



UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL



Artigo submetido como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil

---

**degradadas.** 2018. 17f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.