

ANÁLISE DO APROVEITAMENTO DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM PAVIMENTOS¹

Jéssica Miléo Lourenço Gil – jessicalgil@hotmail.com

Lucas Corrêa – luc_correa23@hotmail.com

Marcio Yokomizo – marcioykm@gmail.com

Natalia Parra Antonelli – nataliantonelli95@gmail.com

Patricia Candioto Migliari de Oliveira (Orientadora) – patriciamigliari@gmail.com

RESUMO

No processo de tratamento da água para que a mesma se torne potável, ela passa por processos que geram resíduos conhecido como lodo. Devido à demanda crescente por água potável, a geração destes resíduos vem causando um impacto financeiro progressivo para as companhias de saneamento pela necessidade de descarte deste material em bota-foras devidamente licenciados. O aumento da produção de lodo, as leis ambientais gradativamente mais exigentes combinado com a localização dos bota-foras cada vez mais distantes dos centros urbanos tornarão cada vez mais onerosas o descarte deste material. Assim, faz-se necessário o estudo de alternativas para disposição final deste resíduo que atenda as leis pertinentes e que minimizem os custos desta operação. O presente estudo teve como objetivo analisar uma disposição final ambientalmente adequada, economicamente viável e tecnicamente praticável dos lodos de estação de tratamento de água como sub-camadas dos pavimentos, analisando o comportamento mecânico do lodo da ETA Mambu-Branco pelo ensaio Índice de Suporte Califórnia e análises de características físico químicas do material. A caracterização química para a verificação da viabilidade ambientalmente correta foi realizada por meio dos ensaios de Fluorescência de Raios-X e análise do lixiviado pelo Espectrofotômetro de Absorção Atômica. Os resultados das análises químicas apresentaram uma composição diversificada do lodo, sendo que os parâmetros inorgânicos verificados estão dentro do limite máximo permitido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). Os ensaios mecânicos apresentaram resultados que atendem as normas, de forma que torna possível sua utilização na camada reforço do subleito da pavimentação.

Palavras chave: Lodo de ETA. Índice de Suporte Califórnia. Pavimentação.

¹ Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, EE, UPM, São Paulo, 2019.

ANALYSES OF SLUDGE REUSE FROM WATER TREATMENT PLANTS IN PAVEMENTS

ABSTRACT

In order to make it potable, the water goes through a treatment process that produces a residue called sludge. Because of the growing demand for potable water, the production of this residue is causing a progressive financial impact to the sanitation companies due to the need to dispose the material in proper licensed places. The rise of sludge production, environmental laws gradually getting stronger plus the distance between the urban areas and land disposal area getting longer will make even more expensive to dispose this material. Therefore, it is necessary to study alternative disposal solutions to this sewage that respects the laws and decrease the cost of the operation. This paper research to analyze and present a technically and economically viable destiny for the sludge from water treatment, an environmental friendly final disposal as subbase course, studying the mechanical behavior of the material from Mambu-Branco Water Treatment Plant through the California Bearing Ratio and analyzing the physicochemical properties of the material. The chemical characterization was made through X-Ray Fluorescence test and the leaching analyses made by Atomic Absorption Spectroscopy in order to verify the environmental viability. The chemical results presented a diversified sludge compose, and the inorganic standards are within the maximum range allowed by the NBR 10.004 (ABNT, 2004). The mechanical tests showed results that satisfy the Brazilian standards, enabling the usage of the material as are in reinforcement for the subgrade in the pavement. Keywords: Sludge from Water Treatment Plant. California Bearing Ratio. Pavement.

1 INTRODUÇÃO

A água é uma substância essencial para todos os seres vivos do planeta. Cerca de 75% da superfície da Terra é coberta por água, porém apenas 3% desse montante são potáveis, ou seja, própria para o consumo humano. As fontes de água potáveis mais comuns são nascentes de rios, lagos, represas, sistemas de cisternas e poços ou ainda a extração de água subterrânea de aquíferos. Com o crescimento populacional e conseqüentemente aumento da poluição, a existência dessas fontes naturais de água potável tem se tornado cada vez mais escassa, tornando necessária a intervenção do homem na busca por água potável.

Surgem então as Estações de Tratamento de Água (ETAs), que tem como principal função eliminar as impurezas presentes na água bruta, deixando-a adequada para consumo, à chamada água potável. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) é pioneira na manutenção e fiscalização de água potável no Brasil. Ela utiliza os índices de qualidade estabelecidos pela *National Sanitation Foundation* (NSF), um órgão dos Estados Unidos internacionalmente reconhecido pelo

estabelecimento de parâmetros e critérios sanitários. O índice utilizado no estado de São Paulo e em outros estados brasileiros é composto por nove critérios: oxigênio dissolvido na água, coliformes termotolerantes, pH, demanda bioquímica de oxigênio, temperatura, nitrogênio total, fósforo total, turbidez e resíduos totais.

Para atingir tais exigências de potabilidade da água, o processo de tratamento mais utilizado nas ETAs do Brasil é o convencional, composto pelas seguintes etapas: gradeamento, desarenação, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Como consequências desse processo ficam retidos resíduos, principalmente nos decantadores e filtros. Esses resíduos são denominados lodo, o qual possui morfologia irregular, muitas vezes com características reológicas de um fluido não newtoniano e ampla distribuição de tamanho de partículas (SLATTER, 1997, DENTEL, 1997), sendo de difícil disposição.

Apesar do grande teor de umidade, os lodos são considerados resíduos sólidos, ou seja, não podem ser lançados em corpos hídricos ou *in natura* a céu aberto sem um tratamento prévio. Entretanto, verifica-se que ainda existem ETAs que descartam seus resíduos em cursos d'água, contrariando a legislação e principalmente provocando impactos ambientais tais como, assoreamento, redução da concentração de oxigênio e pH da água, aumento da concentração de alumínio e liberação de odores. Enquanto outras fazem o processo de desidratação do lodo e enviam-no para bota-foras credenciados, o que eleva consideravelmente o custo de operação das ETAs, já que é grande o volume de resíduo a ser transportado.

Os impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado do lodo, dentre os quais estão a contaminação do solo e dos corpos d'água, podem prejudicar a vida dos seres humanos, além de trazer graves consequências à fauna e a flora de toda a região. Isso mostra que a busca por soluções ambientalmente vantajosas e economicamente viáveis para o seu tratamento e aproveitamento tem se tornado cada vez mais urgente em vários países, principalmente no Brasil, onde o assunto é mais recente. Com isso, existem estudos isolados acerca do aproveitamento do lodo, entre os quais podemos destacar: siderurgia, fabricação de concreto (HOPPEN, *et al.*, 2006; HOPPEN *et al.*; 2005; (BUSELATTO *et al.*, 2019), fabricação de cerâmica vermelha e tijolos (ARAUJO, 2008; RODRIGUES; HOLANDA, 2013), reaterro de valas (FORTES, 2008) e na pavimentação (DELGADO, 2016; LUCENA, 2012; MARTINEZ, 2019).

Neste sentido, este trabalho tem o intuito de estudar a viabilidade do aproveitamento do lodo da ETA Mambu-Branco na construção das camadas de pavimentos, levando em consideração, a sua caracterização mecânica, assim como a sua caracterização química, no sentido de viabilidade ambiental.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

É notória a maior demanda por água potável, visto que a população continua crescendo, contudo, a qualidade físico química dos mananciais está cada vez mais deteriorada. A quantidade de lodo gerada é diretamente proporcional a quantia de químicos necessários no processo de purificação da água (HOPPEN *et al.*, 2006).

O tratamento de água é considerado necessidade básica para a sociedade moderna. Porém, o resíduo gerado pelas estações responsáveis por esses tratamentos, o chamado lodo, tem sido disposto em cursos d'água de forma inadequada ou destinado a aterros sanitários, causando prejuízos à saúde pública e à vida aquática. Diante desse fato, é necessário analisar novas formas de destino ao lodo de ETA, visando seu aproveitamento e minimizando ou até eliminando seu descarte.

Os processos de tratamento para tornar a água adequada ao consumo humano são compostos por uma série de operações unitárias em conjunto com a adição de produtos químicos que proporcionam uma qualidade de água conforme requisitos de legislação, e ainda minimizam o tempo operacional. Estes processos acabam gerando o resíduo conhecido como lodo. A maioria das ETAs do Brasil são convencionais, ou seja, apresentam operações de mistura rápida, coagulação/floculação, decantação e filtração (Figura 1).

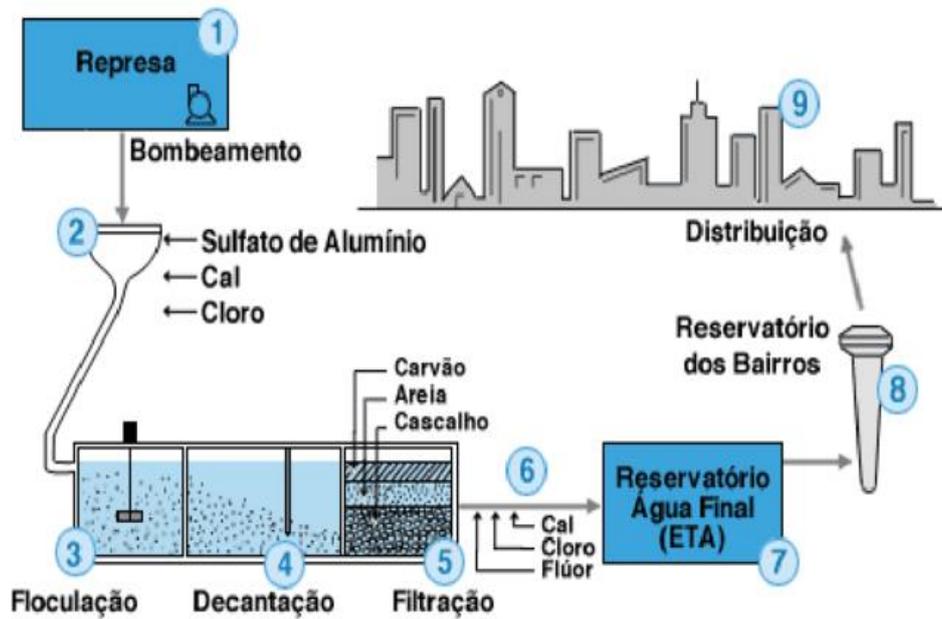
A coagulação/floculação remove as partículas que possuem diâmetro médio entre 1nm e 1000nm que por serem pequenas, não afundam, ou seja, não são removidas no processo de decantação. Desta forma, são adicionadas substâncias químicas na água, os chamados coagulantes.

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) é o coagulante mais utilizado no processo e quando adicionado, junto com o óxido de cálcio (CaO), ocorre uma reação química, formando uma substância gelatinosa denominado hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$). As partículas em suspensão grudam no hidróxido de alumínio formado os flóculos.

No processo de decantação, os sólidos sedimentam no fundo do decantador e a água é levada através de vertedores para a fase seguinte. O material depositado no fundo do tanque é chamado de lodo o qual são conduzidos aos leitos de secagem ou equipamentos denominados prensa ou centrífugas.

Após a decantação, a água é filtrada através da passagem por meios porosos como cascalho, areia e carvão antracito, onde ficam retidos as partículas que passaram pelos processos anteriores.

Figura 1 - Ciclo de Estação de Tratamento de Água.



Fonte: Sabesp.

A qualidade da água bruta influencia rigorosamente a proporção de hidróxidos metálicos e polímeros usados durante o tratamento de água, além da quantidade de resíduos sólidos inorgânicos e orgânicos que variam conforme o clima. De acordo com Andreoli (2006, *apud* DELGADO, 2016, p.16).

A influência das impurezas da água e dos produtos é muito variável na formação do lodo, por conseguinte a produção real dificilmente pode ser prevista e varia constantemente entre as próprias ETAs. A quantidade de lodo originária dos decantadores representa cerca de 60 a 95% da quantidade total, sendo o restante oriundo do processo de lavagem de filtros.

Em uma estação de tratamento de água convencional, o lodo é gerado durante o processo de floculação, decantação e lavagem dos filtros. No processo de floculação, os flóculos sobem e se acumulam na superfície da água, formando uma camada de lodo que é removida periodicamente através de raspadores superficiais.

No processo de decantação é gerado o maior volume de lodo onde as partículas decantam para o fundo do tanque que pode ser removida de forma manual ou mecanizada. Além destes, quando é feito a lavagem dos filtros, o material retirado também é tratado como lodo.

A Figura 2 a seguir apresenta o processo de desidratação do lodo da ETA Mambu-Branco.

Figura 2 - Fluxograma do Processo de Desidratação do Lodo na ETA Mambu-Branco.



Fonte: Acervo próprio.

Segundo Saron Leite (2001, *apud* PORTELLA; ANDREOLI; HOPPEN; SALES; BARON, 2003, p. 2), as características do lodo podem variar em função do processo de estação de tratamento de água, para isso deve-se levar em conta além dos componentes tradicionais sua concentração, o tipo e o tamanho das partículas.

Segundo Richter (2001), conforme citado por Paiva, Moreira e Soares (2016, p. 3), os lodos são predominantemente inorgânicos e que sua concentração de sólidos totais se situa entre 1.000 e 40.000 mg/L, quando o material for proveniente de tanques de decantação, enquanto para os materiais provenientes da lavagem de filtros ter cerca de 40 a 1.000 mg/L de sólidos, ou seja um teor menor.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), o lodo de ETA é um material definido como um resíduo sólido não inerte e não perigoso, Classe II –A. Para a solução correta de descarte deste material é necessário um estudo prévio, onde diversos conhecimentos são aplicados, uma vez que cada ETA tem um lodo com características e propriedades físico-químicas diferentes.

Além do quesito ambiental, é de extrema importância o custo do descarte desse material para as companhias de saneamento, uma vez que os bota-foras estão cada vez mais distantes das grandes metrópoles, representando até 60% do custo operacional da estação de tratamento. (VON SPERLING, 2001). Custo esse que podemos chamar de desperdício, afinal o tratamento é feito e logo após o lodo é descartado. A Tabela 1 abaixo apresenta o destino ao lodo por região.

Tabela 1 - Municípios, total e por existência de geração de lodo no processo de tratamento da água, por destino do lodo gerado.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Municípios									Não há geração de lodo
	Total	Com geração de lodo no processo de tratamento da água								
		Total	Destino do lodo gerado							
			Rio	Mar	Terreno	Aterro sanitário	Incineração	Reaprovei- tamento	Outro	
Brasil	5 564	2 098	1 415	7	463	83	1	50	247	1 264
Norte	449	84	46	-	14	2	-	3	23	123
Rondônia	52	28	25	-	1	-	-	-	2	13
Acre	22	8	3	-	4	-	-	-	1	10
Amazonas	62	10	7	-	2	-	-	-	2	9
Roraima	15	1	1	-	-	-	-	-	-	8
Pará	143	14	4	-	3	1	-	2	5	21
Amapá	16	2	1	-	-	-	-	-	1	12
Tocantins	139	21	5	-	4	1	-	1	12	50
Nordeste	1 793	537	231	5	261	14	1	24	61	462
Maranhão	217	27	13	-	12	-	-	-	2	35
Piauí	223	11	4	-	7	-	-	-	1	26
Ceará	184	62	17	-	38	2	1	2	12	95
Rio Grande do Norte	167	19	6	-	10	-	-	1	2	50
Paraíba	223	96	35	-	57	1	-	1	10	22
Pernambuco	185	59	30	-	18	1	-	3	13	90
Alagoas	102	14	6	-	4	-	-	-	4	38
Sergipe	75	22	15	-	9	-	-	-	1	18
Bahia	417	227	105	5	106	10	-	17	16	88
Sudeste	1 668	896	703	-	105	53	-	10	94	297
Minas Gerais	853	514	428	-	75	8	-	2	26	206
Espírito Santo	78	73	70	-	10	3	-	-	5	3
Rio de Janeiro	92	60	52	-	7	-	-	-	9	11
São Paulo	645	249	153	-	13	42	-	8	54	77
Sul	1 188	442	330	2	59	11	-	11	54	220
Paraná	399	138	122	-	-	5	-	5	11	93
Santa Catarina	293	153	108	-	29	4	-	1	16	86
Rio Grande do Sul	496	151	100	2	30	2	-	5	27	41
Centro-Oeste	466	139	105	-	24	3	-	2	15	162
Mato Grosso do Sul	78	13	10	-	1	-	-	-	3	7
Mato Grosso	141	42	26	-	8	3	-	1	6	44
Goiás	246	83	68	-	14	-	-	1	6	111
Distrito Federal	1	1	1	-	1	-	-	-	-	-

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.

¹Nota: O município pode dar mais de um destino ao lodo gerado no processo de tratamento da água.

Antes de abordar o aproveitamento do lodo na pavimentação, é importante falar um pouco sobre pavimento. Segundo Bernucci, da Motta, Ceratti e Soares (2010, p. 9), pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem destinada, técnica e economicamente, a resistir aos

esforços oriundos do tráfego e melhorar as condições de rolamento. De acordo com a IPR 719 (DNIT, 2006), os pavimentos podem ser classificados em três tipos em função da rigidez das suas camadas, são eles: flexíveis (Figura 3), rígidos e semirrígidos.

O pavimento é constituído por múltiplas camadas, sendo uma de rolamento composta por material nobre e outras subjacentes que utilizam em sua composição materiais, em geral, granulares. A Tabela 2 indica quais características que cada camada deve ter. Caso o material seja empregado na base deve atender também o limite de liquidez superior a 25% e índice de plasticidade superior a 6%.

O glossário de termos técnicos rodoviários (DNER, 2017) as define como:

Subleito: maciço de terra que serve de fundação para o pavimento ou revestimento;

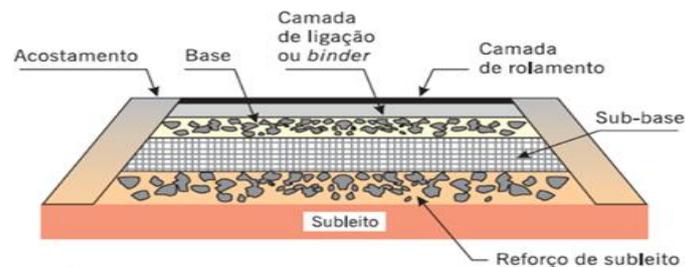
Reforço de subleito: camada granular do pavimento executada com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito e de reduzir espessura da sub-base;

Sub-base: camada corretiva do subleito e complementar à base, com as mesmas funções desta, e executada quando, por razões de ordem econômica, for conveniente reduzir a espessura de base;

Base: camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os ao subleito, e sobre a qual se constrói o revestimento;

Revestimento: camada mais acima do pavimento, que recebe diretamente as ações verticais e horizontais dos veículos, e destinada a melhorar as condições do rolamento quanto ao conforto e segurança.

Figura 3 - Estrutura de pavimento Flexível.



Fonte: Bernucci (2010).

Tabela 2 - Requisitos para camadas de pavimentação.

Requisito DNIT para camadas de reforço do subleito, sub-base e base na pavimentação				
Requisito DNIT	Índice Suporte California Mínimo (%)	Expansão Máxima (%)	Resistência a Compressão Simples Mínima (Mpa)	
Base	80,00	0,5	2,1	
Sub-Base	20,00	1	--	
Reforço do Subleito	Maior que o valor do Subleito utilizado	1	--	
Subleito	2,00	2	--	

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

O lodo como material em potencial será de grande valia caso atenda a todos os requisitos exigidos para materiais constituintes do pavimento. Conforme Araújo & Barroso (2007).

Os materiais utilizados em pavimentação estão cada vez mais escassos e de difícil acesso no meio ambiente, assim a exploração desses materiais pode gerar custos extras às obras de infraestrutura e degradar a região explorada. (apud PASSOS, 2018, p. 2).

Alguns autores já estudaram o lodo na pavimentação como Delgado (2016), que testou as misturas, solo arenoso, solo argiloso e pó de pedra com lodo *in natura*. Obteve resultados satisfatórios com o pó de pedra misturado com 5% de lodo. Concluindo que o seu comportamento resiliente melhorou 8% para tensões de confinamento mais altas devido a pequena quantidade de finos presente no pó de pedra. Lucena (2012), testou lodo de ETA e ETE nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% com solo (areia siltosa) e estabilizante 1% e concluiu um possível emprego em base e sub-base de pavimento rodoviário.

Defendido por Fortes (2008), em seu estudo para lodo em reaterro de valas, as amostras de lodo da ETA de Taiapuêba, ao serem tratadas com materiais alcalinizantes como cimento e cal, têm a capacidade de fazer os metais Ferro e Manganês encontrados no lodo passarem da forma solúvel em água para forma insolúvel em água. Este material apresentou desempenho satisfatório com adição de 3% e 5% de cal ou cimento, encapsulando os metais estudados.

Segundo Hoppen *et al.* (2005), a mistura de lodo de ETA, areia, cimento, brita 1 e água apresenta bom desempenho para pavimentos de concreto de cimento Portland com até 5% de lodo. Acima de 5% de lodo os resultados satisfatórios são para contra pisos, calçadas e pavimentos residenciais. Segundo Martinez (2014), o lodo empregado como concreto betuminoso usinado a

quente (CBUQ), na qual o lodo de ETA calcinado a 500 °C misturado com ligante asfáltico, cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70, agregado miúdo e graúdo apresenta-se viável.

3 METODOLOGIA

A ETA Mambu-Branco é parte integrante do Sistema Produtor Rio Branco, projetado para reforçar os sistemas de distribuição de água existentes em Peruíbe, Itanhaém, Mongaguá, Praia Grande e São Vicente, responsável pela potabilização da água bruta oriunda dos dois mananciais do sistema, os rios Mambu e Branco.

Localizada no município de Itanhaém, na estrada do Aguapeú, a aproximadamente 11 km da saída na Rodovia Padre Manoel da Nóbrega, tem capacidade nominal de 1,6 m³/s e recebe cerca de 400 L/s de água bruta oriunda da captação do Rio Mambu e 1200 L/s de água bruta oriunda da captação do Rio Branco.

A produção média de lodo, com concentração de sólidos de 3% e densidade de 1,02 ton/m³ é de 188,16 m³/dia, podendo ocorrer picos de até 668,16 m³/dia. O lodo é encaminhado para as centrífugas que após desidratação, o lodo passa a ter uma concentração de sólidos de 20%. Desta forma, a produção de lodo desidratado média é de 24 m³/dia, podendo chegar até 44 m³/dia.

O lodo cai diretamente em caçambas estacionárias com capacidade de 30 m³ e são encaminhadas para o bota fora Sítio das Neves, localizado no município de Guarujá.

O lodo utilizado para o desenvolvimento deste trabalho foi coletado na ETA Mambu-Branco. Após a passagem pela centrífuga, onde foi retirada parte da umidade a amostra de lodo foi retirada a partir de uma abertura no duto (Figura 4). Este duto liga a saída da centrífuga até a rosca transportadora que encaminha o lodo desidratado para as caçambas localizadas no pavimento inferior.

Após a coleta (Figura 5), o lodo foi espalhado em uma lona e exposto ao sol (Figura 6), com o objetivo de retirar a água livre por evaporação e não permitir a perda de partículas sólidas. O material foi misturado manualmente para homogeneizar umidade. Deste modo, o lodo foi preparado para que os ensaios de laboratório pudessem ser realizados.

Figura 4 - Detalhe da abertura do duto de onde foi retirado o lodo.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 5 - Lodo coletado e acomodado em baldes para transporte.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 6 - Lodo espalhado em lona e exposto ao sol para secagem.



Fonte: Acervo próprio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios de caracterização básica de solo foram realizados na amostra de lodo da ETA Mambu-Branco, com a finalidade de descobrir o diâmetro, propriedades físico químicas dos grãos e teor de água, parâmetros importantes no desempenho do material na pavimentação.

Para a determinação do limite de consistência do solo foi realizado o ensaio limite de liquidez (LL) e o ensaio limite de plasticidade (LP), visando caracterizar a interação do material com a água. Conforme a norma NBR 6459 (ABNT, 2016), o limite de liquidez apresentou os seguintes dados descritos na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 - Valores dos dados do Experimento Limite de Liquidez.

Amostra com secagem prévia ao ar	1 ^a Amostra	2 ^a Amostra	3 ^a Amostra	4 ^a Amostra	5 ^a Amostra
Teor de umidade (%)	54,63	56,17	57,02	58,80	60,78
Número de batidas	39	29	24	20	15

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Ao realizar o ensaio do Limite de Plasticidade segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016), não foi possível moldar o cilindro. Ao rolar sobre a placa de vidro, e perder umidade, o mesmo se tornou quebradiço antes de atingir o tamanho do gabarito de 10 mm de comprimento por 3 mm de largura. Portanto, admite-se que o lodo é um material não plástico.

A análise granulométrica do lodo foi realizada segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018). Como não foi retido material na peneira de 2 mm, realizou-se o ensaio por sedimentação, a qual apresentou

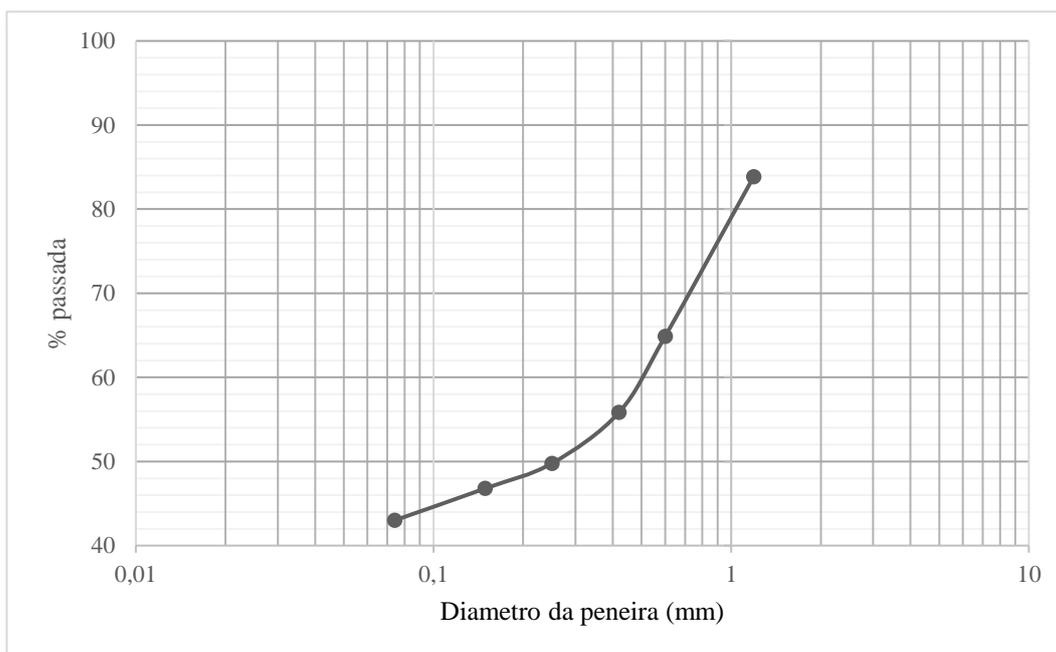
as porcentagens apresentadas na Tabela 4. Com as porcentagens obtidas foi possível traçar a curva granulométrica (Gráfico 1). Por meio da Tabela 5 é possível ver de forma resumida a granulometria do material.

Tabela 4 - Granulometria do lodo.

Diâmetro da peneira (mm)	% Passada
1,19	83,85
0,6	64,88
0,42	55,84
0,25	49,78
0,149	46,79
0,074	43,00

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Gráfico 1 – Curva Granulométrica.



Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Tabela 5 - Composição granulométrica do lodo.

Composição Granulométrica (%) - Escala ABNT						
Material	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
Lodo ETA Mambu-Branco	0	25,78	24,00	15,10	35,12	0

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

O ensaio de compactação é realizado com o objetivo de determinar a umidade ótima do material. O ensaio é regido pela NBR 7182 (ABNT, 2016). A amostra foi preparada com secagem prévia até a umidade higroscópica de 10,02% e o ensaio realizado com reuso do material. Foram moldados cinco corpos de prova do cilindro pequeno (Proctor) compactados segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016). O adensamento foi realizado pela compactação de energia normal que, consiste na utilização do soquete pequeno, para 3 camadas de material onde foram aplicados 26 golpes. Cada camada foi dividida proporcionalmente.

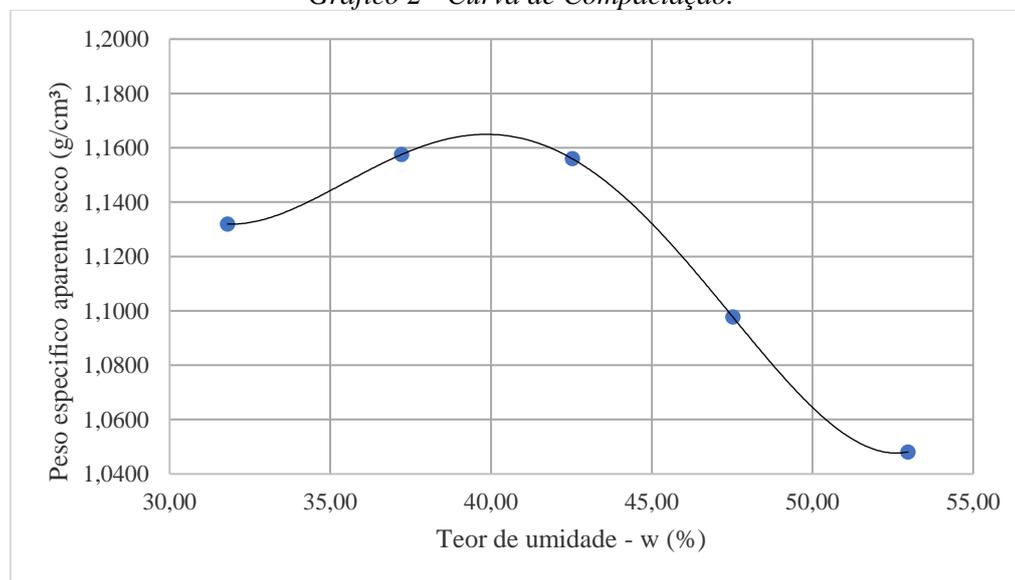
Os teores de umidade das 5 amostras variam de 31% a 53% e o peso específico aparente seco da amostra varia de 1,05 a 1,13, conforme Tabela 6. Segundo a curva de compactação (Gráfico 2), o ponto ótimo do ensaio ocorre na umidade ótima $W_{ótimo} = 40$ (%) com o peso específico seco aparente máximo = 1,165 (g/cm^3).

Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de compactação.

Teor de Umidade (%)	31,80	37,21	42,53	47,52	52,97
Peso Específico Aparente Seco (g/cm^3)	1,1320	1,1575	1,1560	1,0977	1,0481

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Gráfico 2 - Curva de Compactação.



Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Para determinar a capacidade de suporte do pavimento avaliando seu comportamento mecânico foi realizado o ensaio Índice de Suporte Califórnia (ISC), ou no inglês, *California Bearing Ratio* (CBR). A realização do ensaio segue três etapas principais: a compactação do corpo de prova,

imersão e ensaio no penetômetro. Com este ensaio é possível calcular a expansão do material e o valor do ISC.

Para realização deste ensaio a amostra foi previamente preparada na umidade ótima. Após a compactação dos corpos de prova dentro do molde cilíndrico os mesmos foram imersos em água por cinco dias a fim de estudar a expansão do material, segundo a NBR 9895 (ABNT, 2017). Durante esse período, os corpos ficam sob efeito de uma sobrecarga de 4540g em discos anelares que simulam o confinamento e o peso sobre o pavimento. As leituras no relógio comparador fixado na ponta extensômetro são realizadas a cada 24 horas. A expansão expressa em porcentagem é definida como a relação do aumento do corpo de prova com sua altura inicial.

Os valores de expansão obtidos para os dois corpos de prova são inferiores a 0,61%, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado do ensaio de expansão dos cilindros A e B.

Data	Tempo decorrido (h)	Expansão (%)	
		Cilindro A	Cilindro B
07/10/2019	0	0,000	0,000
08/10/2019	24	0,560	0,595
09/10/2019	48	0,070	0,079
10/10/2019	72	0,035	0,052
11/10/2019	96	0,035	0,026

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Decorridos os 5 dias de leitura, os cilindros foram retirados da submersão e permaneceram escoando por 10 minutos, antes de serem levados para a prensa do CBR. Após o escoamento, o material foi colocado na prensa, onde o pistão penetra no corpo de prova. Deste modo foram realizadas as leituras de pressão conforme os valores de penetração da norma, apresentados na Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de ISC do cilindro A.

Tempo (min)	mm	Polegadas	Pressão padrão (MPa)	Carga (N)	Pressão Calculada (MPa)	ISC A (%)
0,5	0,63	0,025		700	0,311	
1,0	1,27	0,050		990	0,414	
1,5	1,90	0,075		1220	0,518	
2,0	2,54	0,100	6,9	1440	0,611	8,851
2,5	3,17	0,125		1640	0,694	
3,0	3,81	0,150		1830	0,766	
3,5	4,44	0,175		1980	0,833	
4,0	5,08	0,200	10,35	2110	0,901	8,071
5,0	6,35	0,250		2380	1,035	
5,5	8,89	0,300		2640	1,149	
6,0	7,62	0,400		2870	1,263	
8,0	10,16	0,450		3070	1,371	
9,0	11,43	0,500		3300	1,470	
10,0	12,70	0,600		3490	1,573	

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de ISC do cilindro B.

Tempo (min)	mm	Polegadas	Pressão padrão (MPa)	Carga (N)	Pressão Calculada (MPa)	ISC B (%)
0,5	0,63	0,025		600	0,362	
1,0	1,27	0,050		800	0,512	
1,5	1,90	0,075		1000	0,631	
2,0	2,54	0,100	6,9	1180	0,745	10,801
2,5	3,17	0,125		1340	0,849	
3,0	3,81	0,150		1480	0,947	
3,5	4,44	0,175		1610	1,025	
4,0	5,08	0,200	10,35	1740	1,092	10,551
5,0	6,35	0,250		2000	1,232	
6,0	7,62	0,300		2220	1,366	
5,5	8,89	0,400		2440	1,485	
8,0	10,16	0,450		2650	1,589	
9,0	11,43	0,500		2840	1,708	
10,0	12,70	0,600		3040	1,806	

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

A avaliação do ISC que mede a resistência de cisalhamento do solo é extremamente importante para determinar a capacidade de resistência do material. De acordo com o Manual de

Pavimentação (DNIT, 2006), os valores mínimos de ISC variam de 2% a 80% dependendo da camada onde se deseja aplicar o material.

Os valores de pressão obtidos para os dois corpos de prova, usados para o cálculo do Índice de Suporte Califórnia são superiores a 8%. Adota-se o maior dos valores obtidos para as pressões lidas de 2,54 mm e 5,08mm. O valor de ISC é a média dos maiores valores de cada corpo de prova. Este valor é superior a 9%, conforme Tabela 10. Com os valores alcançados é possível traçar as curvas de cada corpo de prova, onde é possível verificar o valor de pressão alcançado a cada penetração.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de ISC.

Corpo de prova	A	B	Média dos ISC
ISC (%)	8,85	10,80	9,80%

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Além dos ensaios de caracterização física do material, também foram realizadas as análises de Fluorescência de Raios-X e de Lixiviação por Espectrofotômetro de Absorção Atômica.

Para realização do ensaio de Fluorescência de Raios-X a amostra é transformada previamente, com o auxílio de um equipamento na forma de uma pastilha. Esta pastilha é então levada ao aparelho de Fluorescência de raios-X. Os resultados obtidos para a composição química da amostra bem como suas proporções estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Elementos químicos e Concentrações.

Elemento	Concentração (% em peso)
SiO ₂	40,008%
Fe ₂ O ₃	26,735%
Al ₂ O ₃	25,334%
MgO	3,044%
K ₂ O	1,422%
TiO ₂	1,114%
P ₂ O ₅	0,672%
Mn ₂ O ₃	0,539%
CaO	0,359%
Cl	0,321%
SO ₃	0,313%
Na ₂ O	0,084%
Cr ₂ O ₃	210 mg/kg
SrO	172 mg/kg
ZnO	164 mg/kg

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

Já a análise de lixiviação do material foi realizada com o objetivo de verificar a existência de metais pesados assim como suas proporções que pelo processo de lixiviação podem ou não causar danos ao lençol freático.

Para a realização do ensaio, o material foi colocado em um recipiente com água e agitado durante 24 horas. Após a agitação o mesmo foi colocado em repouso e retirado partículas sobrenadantes, juntamente da água as partículas foram colocadas em um béquer e levada para a máquina na qual se pode obter a proporção de cada componente químico desejado.

Na realização da análise foram colocadas lâmpadas, que possuem a capacidade de absorção de cada componente por meio de ondas de calor, resultando na quantidade de cada material determinado na Tabela 12.

Tabela 12 - Componentes Químicos de lixiviação.

Componente Químico	Quantidade do Material (mg/L)	Limite máximo no lixiviado mg/L (NBR 10004 - Anexo F)
Arsênio	Abaixo do Limite de Detecção	1
Bário	Abaixo do Limite de Detecção	70
Cádmio	Abaixo do Limite de Detecção	0,5
Chumbo	Abaixo do Limite de Detecção	1
Crômio	0,065	5
Fluoreto	Abaixo do Limite de Detecção	150
Mercúrio	Abaixo do Limite de Detecção	0,1
Prata	Abaixo do Limite de Detecção	5
Selênio	Abaixo do Limite de Detecção	1

Fonte: Ensaio realizado pelos autores.

5 DISCUSSÃO

Ao realizar a análise granulométrica por sedimentação, verificou-se que o lodo da ETA sedimentou rapidamente indicando de acordo com este ensaio ser um material com um diâmetro de partículas maior que 0,002 mm o que não aparenta ser a realidade. Este ensaio é utilizado para solos naturais e o lodo não se enquadra nesta categoria.

Como o lodo possui produtos químicos adicionados, supõe-se que este problema de sedimentação seja resultado de uma reação química das partículas do lodo com o defloculante. Seria necessário outro ensaio como uma adaptação da norma, fazendo uso de hexametáfosfato de sódio em outra quantia ou outro tipo de defloculante.

Para o ensaio de expansão foi realizado a análise segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), o valor de expansão máxima depende da camada estrutural que solo exerce no pavimento, variando de 0,5% a 2% dependendo da camada, ou seja, os resultados se encaixam na faixa proposta.

Além disso, analisando os dados da Tabela 11, verifica-se que aproximadamente 92% da amostra é composta por SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 . Os elementos químicos apresentados no laudo mostram alguns que se encontram normalmente em solos, como o Silício, Magnésio e Potássio. Já o Ferro e Alumínio são encontrados normalmente em solos lateríticos em regiões tropicais e subtropicais. Apesar deste material não ser um solo laterítico, este tipo de solo possui alta concentração de óxido e hidróxido de Ferro e Alumínio. Na natureza o solo laterítico é encontrado com grandes índices de vazios, não conferindo à mesmo grande capacidade de suporte, porém é muito utilizado na pavimentação, pois após reestruturado e compactado se tornam altamente estáveis e muito pouco expansíveis caso expostos a água novamente.

Porém, a quantidade de Ferro e Alumínio encontrada no lodo, assim como esperado, é maior, devido à adição de produtos químicos necessários no tratamento de água como, por exemplo, o Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico. Essa análise não detectou metais pesados perigosos como Mercúrio, Chumbo, Cádmio e Arsênio.

Para o resultado do ensaio de Lixiviação por Espectrofotômetro de Absorção Atômica, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), o crômio possui impacto ambiental, quando possuir valor superior a 5mg/L, sendo assim a quantidade obtida na amostra é um valor permitido.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Procurava-se encontrar uma alternativa de disposição adequada para o lodo de ETA que fosse possível aplicar na pavimentação. Foi testada a utilização desse rejeito para verificar sua capacidade de suporte em campo. Por meio dos resultados obtidos nos ensaios do Índice de Suporte Califórnia é possível concluir segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), que o material seco *in natura* pode ser usado apenas como reforço do subleito, pois o ISC apresentou valores acima dos exigidos para esta camada. O material não pode ser utilizado na camada de base uma vez que, além de não atender o ISC, não atende ao requisito imposto de ser plástico. Apesar de estar dentro dos padrões do subleito, esta é desconsiderada, uma vez que é o terreno de fundação já encontrado no local.

O valor de ISC do lodo da ETA Mambu-Branco é de 9,8%. Para o lodo ser utilizado como reforço do subleito de acordo com o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), o subleito onde o reforço for aplicado deve ter um valor de ISC inferior a 9%.

Os resultados de expansão do Lodo da ETA Mambu-Branco são favoráveis, uma vez que a expansão obtida no ensaio foi de 0,56%, valor inferior a 1% que é a expansão máxima exigida para reforço do subleito. Assim, no quesito expansão o lodo pode ser aplicado na pavimentação.

As análises químicas indicam que o lodo possui uma composição diversificada. Foram analisados os parâmetros inorgânicos que constam no Anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004), que verifica a concentração no extrato lixiviado. Os parâmetros inorgânicos estão dentro do limite

máximo permitido. Desta forma, considerando que os parâmetros de pesticidas e orgânicos encontram-se abaixo do permitido, não oferecem risco ao meio ambiente, permitindo que o lodo da ETA Mambu-Branco possa ser aplicado como reforço de subleito em ruas residências, que possuam baixo fluxo de carros quando comparado às rodovias, como também sua utilização em calçadas e ciclovias.

Dessa forma o uso do lodo na pavimentação minimiza o impacto ambiental, contribuindo com a diminuição do uso de matérias primas naturais usadas na pavimentação, reduzem os custos das companhias de saneamento com bota fora licenciado e minimizam a possibilidade de descarte em cursos d'água.

Como Sugestão para futuros trabalhos pode-se avaliar: o comportamento mecânico da mistura de lodo de ETA que possui uma granulometria fina, com um solo de granulometria maior, melhorado com a adição de cimento e análise dos valores de resistência através do ensaio de compressão simples. Realização de análises químicas do lodo de ETA, utilizando o cimento como agente estabilizador, construção de modelos reais, com sub-base de pó de pedra, lodo de ETA e cimento, onde será possível o monitoramento do comportamento mecânico e interações ambientais no decorrer do tempo, além da análise econômica dos custos envolvidos na execução das alternativas viáveis face ao custo de disposição nos aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, Franciulli da Silva Dantas de. **Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Disponível em: <file:///C:/Users/GIL/Downloads/FranciulliSDA.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

_____. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.

_____. NBR 9895: Solo – Índice Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 13 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Anita Slade, 2010. 40 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa **Nacional de Saneamento Básico – 2008**. Agosto 2010. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em 02 jun. 2019.

BUSELATTO, Denis Meira *et al.* Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.1-21, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0645>.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. [Sem título]. s/d. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=47>>. Acesso em: 05 de set. 2019.

DELGADO, Jessica Vannesa Colmenares. **Avaliação da Aplicação do Lodo da ETA Guandu na Pavimentação como Disposição Final Ambientalmente Adequada**. 2016. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DENTEL, S. K. (1997) Evaluation and role rheological in sludge management. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 11, p. 1-8.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Glossário de Termos Técnicos Rodoviários**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. IPR 719: **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro: Dnit, 2006. 274 p.

FORTES, Rita Moura. **Estudo da estabilização do lodo oriundo da ETA de Taiapuê para utilização em reaterro de valas**. São Paulo: Mackenzie, 2008. 29 slides, color.

HOPPEN, C. *et al.* **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental**. 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132005000200003>. Acesso em: 02 jun. 2019.

HOPPEN, Cinthya *et al.* **Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental**. Química Nova, [s.l.], v. 29, n. 1, p. 79-84, fev. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422006000100016>.

LUCENA, L. C., **Estudo de Aplicação de Misturas Solo Lodo em Base e Sub-base de Pavimentos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2012.

MARTINEZ, Juan Gabriel Bastidas. **Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas com Adição de Lodos de ETA e de ETE**. 2014. Disponível em. Acesso em: 02 jun. 2019.

PAIVA, Gabriela Santos de; MOREIRA, Viviane Teles Goulart; SOARES, Alexandra Fátima Saraiva. Lodo de estação de tratamento de água (leta): resíduo ou insumo? In: **Congresso Brasileiro**

de Gestão Ambiental, 7., 2016, Campina Grande. **Artigo**. Campina Grande: Ibeas, 2016. p. 1 - 11. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/IX-032.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2019.

PASSOS, Bruno Conde; MARQUES, Juliane Andréia Figueiredo; ANDRADE, Carlla Rafaella Barros de. Análise do CBR de Sub-base Argilosa Estabilizada Granulometricamente com Material Granular e Resíduos de Pavimentos. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, 75., 2018, Maceió. Anais. Maceió: SOEA, 2018. p. 1 – 5

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>.

SLATTER, P. T. (1997) The Rheological Characterization of Sludges. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 11, p. 9-18.

VON SPERLING, M. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484 p.