



**Encontro Técnico
AESABESP**
30º Congresso Nacional
de Saneamento e
Meio Ambiente



FENASAN
30ª Feira Nacional
de Saneamento e
Meio Ambiente



CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA VISANDO SEU REUSO EM OBRAS DE ENGENHARIA: ABORDAGENS GEOTÉCNICA E REOLÓGICA INTEGRADAS

Juliana Keiko Tsugawa⁽¹⁾

Geóloga pelo Instituto de Geociências, Mestre em Engenharia Civil especializada em Geotecnia Ambiental e Doutoranda pela Escola Politécnica da USP. Desde 1998 atua na área ambiental nas principais empresas do segmento na área de reutilização, reciclagem, tratamento e disposição de resíduos sólidos e industriais, gestão e projetos para investigação e remediação de áreas contaminadas, análise de risco a saúde humana, transporte de poluentes em solo e água subterrânea e ensaios geotécnicos e ambientais.

Roberto Cesar de Oliveira Romano⁽²⁾

Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da USP, Pesquisador do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP.

Rafael Giuliano Pileggi⁽³⁾

Professor Associado da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP.

Maria Eugenia Gimenez Boscov⁽⁴⁾

Professora Titular da Escola Politécnica da USP, Departamento de Estruturas e Engenharia Geotécnica da Escola Politécnica da USP.

Endereço⁽¹⁾: Rua Manuel Gonçalves Mão Cheia, 419 – Instituto de Previdência – São Paulo – SP – CEP: 05531-030 - Brasil - Tel: +55 (11) 3733-4932 – Cel.: +55 (11) 94151-9894 - e-mail: jukeiko@usp.br ou jkeiko.tsugawa@gmail.com.

RESUMO

O reuso do lodo de estação de tratamento de água (ETA) em geotecnia é uma importante estratégia para reduzir os impactos ambientais decorrentes da sua disposição inadequada. Porém, a consistência do lodo de ETA, mesmo após desaguentamento, limita a completa caracterização do lodo por métodos geotécnicos tradicionais. Visando o reuso de lodo de ETA em larga escala, a estabilização por meio de aditivos poderá ser uma estratégia interessante, tornando essencial o conhecimento das características mecânicas do lodo. A caracterização reológica do lodo é uma ferramenta promissora para viabilizar sua reutilização, uma vez que é adaptada a pastas e fluidos. Este artigo apresenta uma breve revisão sobre conceitos reológicos, os resultados preliminares para a caracterização do comportamento mecânico do lodo a partir de duas metodologias diferentes (mini Vane e reometria rotacional), e uma breve comparação entre os métodos. Os resultados do ensaio mini Vane e de reometria indicaram comportamento tixotrópico do lodo da ETA Cubatão para baixas taxas de cisalhamento. Adicionalmente, os ensaios de reometria indicaram comportamento pseudoplástico do lodo para baixas taxas e dilatante para altas taxas de cisalhamento. Ambos os ensaios apresentam vantagens e desvantagens, sendo a escolha da melhor abordagem dependente dos objetivos da pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: lodo de ETA, geotecnia, reologia, reuso de resíduos.

INTRODUÇÃO

A geração de lodo de ETA tende a crescer com o aumento da população e da demanda por água potável. Em 2017, as Nações Unidas estimaram que a população cresceria dos atuais 7,6 bilhões de indivíduos para 8,6 bilhões em 2030 e 11,2 bilhões em 2100 (UNITED UNION, 2017). No Brasil, o lodo de ETA é principalmente descartado nos rios (IBGE, 2010). No Estado de São Paulo, o lodo é enviado para as estações de tratamento de esgoto (ETE) ou disposto em aterros sanitários. O descarte de lodo de ETA nos rios causa sérios impactos ambientais (assoreamento e degradação da qualidade da água e meio aquático). O lodo disposto em aterros sanitários causa instabilidade na massa de resíduos, além de aumentar a demanda por espaço para expansão do aterro. O envio do lodo de ETA para ser tratado na ETE pode causar o entupimento

das tubulações e sobrecarregar o sistema de tratamento de esgoto, que é insuficiente no Brasil e em muitos outros países, já que 80% da água residual produzida globalmente é lançada sem nenhum tratamento prévio (UN-Water, 2015; WWAP, 2012). Assim, a busca por alternativas de reuso do lodo de ETA é uma preocupação importante para a sustentabilidade ambiental.

O lodo gerado a partir da lavagem de decantadores e filtros da ETA é composto por mais de 97% de água, produtos químicos inseridos durante o processo de tratamento (cal, coagulantes de ferro, alumínio e/ou polímeros), sólidos suspensos orgânicos e inorgânicos, como areia, silte e argilas, além de algas, bactérias, vírus e matéria orgânica. Geralmente, o teor de sólidos varia entre 0,1 a 3,5% (AWWA, 1978), mas pode atingir 15-20% quando submetido a processo de desaguamento, como centrifugação, drenagem em leitos de secagem ou passagem por filtro prensa (ALBRECHT, 1972).

Mesmo após passar por processo de desaguamento na ETA (centrifugação ou leitos de secagem), o lodo ainda não é adequado para aplicações geotécnicas, apresentando propriedades mais similares a fluidos e pastas do que a solos. O lodo de ETA seco ao ar ou em estufa pode se tornar um material granular (XIA, 1994; HSIEH; RAGHU, 1997; BASIM, 1999; RODRIGUEZ et al., 2011) com boas características geotécnicas, podendo ser usado inclusive como agregado para a construção civil (HOPPEN et al., 2005a; HOPPEN et al., 2005b), porém esse processo demanda elevada energia e grandes áreas de operação. O reuso do lodo de ETA como material substituto em cerâmica (MORITA et al., 2002; OLIVEIRA; MACHADO; HOLANDA, 2004; TEIXEIRA et al., 2011), cimento (CHEN; MA; DAI, 2010), asfalto (SILVA, 2008) e solo (RAGHU et al., 1987; WANG et al., 1992; ROQUE; CARVALHO, 2006; RODRIGUEZ et al., 2011; CASTILHOS JUNIOR; PRIM; PIMENTEL, 2012; MONTALVAN; BOSCOV, 2016) tem sido investigado, mas apenas baixas quantidades de lodo podem ser incorporadas para que não ocorra queda da qualidade do produto final. Apesar de as pesquisas relacionadas a aplicação do lodo de ETA como material geotécnico serem reduzidas, e a maior parte restrita a caracterizações geotécnicas e geo-ambientais (XIA, 1994; HSIEH; RAGHU, 1997; VANDERMEYDEN; CORNWELL, 1998; AYDILEK; EDIL; FOX, 1999; BASIM, 1999; O'KELLY, 2008; O'KELLY; QUILLE, 2009, 2010), os resultados obtidos por alguns autores (RAGHU et al., 1987; WANG et al., 1992; ROQUE; CARVALHO, 2006; RODRIGUEZ et al., 2011; CASTILHOS JUNIOR; PRIM; PIMENTEL, 2012; MONTALVAN; BOSCOV, 2016) apontam o lodo como um potencial material geotécnico.

Visando o reuso do lodo de ETA em grandes quantidades, a incorporação de aditivos (como cal ou *fillers*) para estabilizar o lodo pode ser uma alternativa interessante, já que tem o potencial de melhorar a trabalhabilidade do lodo e possibilitar sua utilização em aplicações geotécnicas, como aterros, preenchimento de valas, muros de solo reforçado e cobertura de aterros sanitários. O conhecimento das características mecânicas do lodo de ETA em seu estado fresco (*in natura*, após desaguamento) é essencial para formular um material geotécnico adequado a partir da estabilização com aditivos. Porém, a maioria dos ensaios geotécnicos foi criada para solos e não para lodos, que apresentam elevado teor de umidade. A obtenção de parâmetros de resistência é muitas vezes impraticável com os equipamentos e procedimentos geotécnicos tradicionais. Essas dificuldades mostram a importância de resgatar a abordagem de Terzaghi, que utilizou os conhecimentos obtidos a partir do estudo de materiais, como metais, madeiras e, especialmente, concreto, para entender o comportamento do solo (TERZAGHI; PECK, 1948). Seguir o desenvolvimento de outras áreas científicas e diferentes materiais parece ser uma estratégia promissora para entender o comportamento mecânico do lodo de ETA. Acredita-se que a caracterização geotécnica tradicional pode ser reforçada com métodos e equipamentos vindos da tecnologia do concreto. Portanto, a avaliação do comportamento reológico do lodo no estado fresco através da reometria rotacional pode ser uma poderosa alternativa.

As etapas para a estabilização e reuso do lodo em aplicações geotécnicas, envolvendo bombeamento, escavação, armazenamento, transporte, mistura, espalhamento, compactação etc., dependem fortemente da resistência ao cisalhamento e da viscosidade do material. O lodo de ETA ganha resistência ao longo do tempo devido a perda de água por exposição ao ar, mas provavelmente também devido ao efeito tixotrópico, que pode induzir a erros na avaliação da resistência ao cisalhamento do lodo.

Em geotecnia, a resistência ao cisalhamento de materiais com elevada umidade e granulometria fina pode ser obtida utilizando-se o mini Vane de laboratório, porém, nunca é mencionada a viscosidade do material. Em

reologia, tanto a resistência ao cisalhamento quanto a viscosidade podem ser obtidas através da utilização de um reômetro rotacional. Com ambas as metodologias é possível avaliar o efeito tixotrópico de um material.

Este artigo apresenta um sumário sobre conceitos reológicos e viscoelasticidade, os resultados dos ensaios realizados com o mini Vane de laboratório para se analisar o efeito tixotrópico do lodo da ETA Cubatão, e os resultados preliminares dos ensaios de reometria rotacional para a caracterização do comportamento reológico do lodo. Ambas as metodologias foram brevemente comparadas quanto à caracterização da tixotropia e algumas diferenças, vantagens e desvantagens foram comentadas. Ressalta-se que os dados apresentados neste artigo são conteúdo de dois artigos publicados anteriormente pelos autores (TSUGAWA; PEREIRA; BOSCOV, 2017; TSUGAWA, J.K.; ROMANO, R.C. DE O.; PILEGGI, R.G; BOSCOV, M.E, 2019).

CONCEITOS REOLÓGICOS E VISCOELASTICIDADE

Reologia vem do grego “Rheos”, que significa fluir, e “logos”, que significa estudo. É a ciência que estuda a deformação e fluxo da matéria, conforme definição de Bingham (BARNES; HUTTON; WALTERS, 1993).

Todo material real apresenta comportamento intermediário entre o sólido ideal proposto por Hooke e o líquido ideal proposto por Newton (MALKIN, 1994). Os conceitos de “líquido” (viscoso) e “sólido” (elástico) são modelos que descrevem as propriedades de muitos materiais reais (água, metais, rochas etc.). No entanto, esses modelos não são precisos em descrever o comportamento de materiais viscoelásticos, que apresentam propriedades entre os sólidos ideais e os líquidos ideais, por exemplo, tintas, polímeros, concreto, argamassa, pastas, silicone, seda, solos argilosos e o lodo de ETA. A resposta viscoelástica depende das características inerentes do material e das condições de temperatura, pressão, umidade, magnitude da tensão, velocidade de aplicação da carga (taxa de cisalhamento) e escala de tempo de observação (MALKIN, 1994). A viscoelasticidade é manifestada através de mudanças das propriedades como, por exemplo, a viscosidade. Em sistemas Newtonianos, a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento. Em sistemas viscoelásticos, a viscosidade muda com a tensão e com a taxa de cisalhamento, portanto, não é uma propriedade intrínseca do fluido, sendo chamada de “viscosidade aparente, η_{ap} ”.

O tempo é uma das mais importantes variáveis na viscoelasticidade, portanto, o comportamento de materiais viscoelásticos pode ser classificado em independente do tempo (Bingham-plástico, pseudo-plástico, dilatante) e dependente do tempo (tixotrópico e reopéxico). Comportamentos independentes do tempo dependem somente da taxa de cisalhamento, isto é, em sistemas não reativos a viscosidade é a mesma ao longo do tempo para taxa de cisalhamento constante, mas muda se a taxa mudar. No comportamento pseudoplástico a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. No comportamento dilatante, a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento. Comportamentos dependentes do tempo ocorrem devido a mudanças reversíveis da microestrutura do material, assim, a viscosidade muda com o tempo para taxa de cisalhamento constante, além de mudar com a taxa de cisalhamento. Tixotropia é “um fenômeno reversível de diminuição da viscosidade dependente do tempo; quando o sistema é cisalhado por certo tempo, a viscosidade diminui; porém, quando o sistema é mantido em repouso a viscosidade do sistema é restaurada” (TADROS, 2010). Para Burgers e Scott-Blair (1948) o termo tixotropia é definido como um “processo de amolecimento causado pela remoldagem, seguido por um retorno ao estado endurecido original dependente do tempo”. Na engenharia geotécnica, tixotropia é o aumento da resistência ao longo do tempo (quando o sistema é deixado em repouso), sob índice de vazios e umidade constantes, seguido pelo decréscimo da resistência após remoldagem (isto é, quando o sistema é cisalhado). Para Mitchell (1960), tixotropia “refere-se a diferentes coisas para diferentes pesquisadores” e “considerando que tixotropia é definido como um processo isotérmico, reversível e dependente do tempo ocorrendo sob condições de composição e volume constantes, através do qual um material endurece quando em repouso e amolece ou liquefaz quando remoldado, as diferenças entre tixotropia em solos granulares finos com umidade menor que o limite de liquidez e suspensões diluídas podem ser consideradas uma gradação ao invés de um comportamento fundamental”. Reopexia é oposto a tixotropia, a viscosidade aumenta quando o sistema é cisalhado e diminui quando a tensão é removida. Em geotecnia, um solo tixotrópico amolece após remoldagem e endurece quando em repouso (MITCHELL, 1960).

Tixotropia é um fenômeno largamente estudado em diferentes áreas e para diferentes materiais, como solos argilosos (SKEMPTON; NORTHEY, 1952; SEED, H. H.; CHAN, 1957; BRAGA; PINTO; BOSCOV, 2006; JEONG et al., 2015), lodo de esgoto e lodo de águas residuais (SEYSSIECQ; FERRASSE; ROCHE, 2003;

BAUDEZ, 2008; ESHTIAGHI et al., 2013; RATKOVICH et al., 2013). Na prática, a tixotropia do lodo de ETA (WANG et al., 1992; TSUGAWA; PEREIRA; BOSCOV, 2017) deve ser considerada durante a estocagem, escavação, espalhamento e disposição ou reuso, uma vez que, este fenômeno pode induzir a erros de interpretação da resistência do material em campo devido ao fenômeno reversível de reconstrução da estrutura do lodo. Em geotecnia, a tixotropia pode ser medida através de ensaios mini Vane de laboratório (SKEMPTON; NORTHEY, 1952; NGUYEN; BOGER, 1983; BRAGA; PINTO; BOSCOV, 2006; TSUGAWA; PEREIRA; BOSCOV, 2017), ensaio de cone (WANG et al., 1992) e ensaios triaxiais (SEED, H. H.; CHAN, 1957), através da preparação de amostras e espera de tempos de cura variando entre horas a meses (repouso a umidade constante) antes da execução dos ensaios. Através da reometria rotacional é possível medir a tixotropia para tempos precoces (segundos ou minutos), usando diferentes métodos: “*hysteresis loop*”, “*step change*”, “*start-up*”, “*creep*” e “*dynamic moduli*” (MEWIS, 1979). A tixotropia para tempos muito precoces (“*very early ages*”) ocorre geralmente em sistemas altamente aglomerantes, como é o caso do lodo de ETA.

MATERIAIS

O lodo estudado neste trabalho é gerado na ETA Cubatão, que captura água bruta do Rio Cubatão e produz 4,5 m³/s de água potável. No processo convencional de tratamento de água são utilizados produtos químicos, como cloreto férrico (coagulante), cloro (desinfecção), ácido fluorsilícico (proteção dental) e cal (correção do pH). Atualmente, a ETA Cubatão gera 60-70 t/dia (peso úmido) de lodo desaguado por centrifugação, as quais são dispostas em um aterro industrial. Para a pesquisa, o lodo foi coletado diretamente das centrífugas (teor de sólidos de 20-30%) utilizando-se sacos plásticos e armazenados em câmara úmida no laboratório. O lodo foi caracterizado geotecnicamente (limites de Atterberg e granulometria), quimicamente (CTC-troca catiônica e FRX-fluorescência de raios-X) e mineralogicamente (DRX-difração de raios-X e MEV-microscopia eletrônica de varredura). A Tabela 1 apresenta as principais características do lodo da ETA Cubatão.

Tabela 1. Caracterização do lodo da ETA Cubatão.

Tipo	Propriedade	Lote 1 ^(a) (04/2015)	Lote 2 ^(b) (02/2016)
Química / Físico- química	Composição		
	<i>Fe₂O₃</i>	46,0%	47,5%
	<i>SiO₂</i>	18,3%	18,6%
	<i>Al₂O₃</i>	8,9%	10,1%
	Perda ao fogo (%)	22	19
	Matéria Orgânica (g/kg)	26	-
	CTC (mmolc/kg)	252,2	-
	pH (em H ₂ O)	7,2	-
Geotécnica	Granulometria		
	<i>Argila</i>	69,4%	68,0%
	<i>Silte</i>	25,7%	18,0%
	<i>Areia fina</i>	4,7%	14,0%
	<i>Areia média e grossa</i>	0,2%	0,0%
	USCS	MH	MH
	Densidade específica dos grãos (g/cm ³)	2,85 – 2,95	2,97-3,20
	Limite de liquidez (LL)	239%	170%
Limite de plasticidade (LP)	81%	71%	
Mineralógic a	Composição	Quartzo Goetita Muscovita Caulinita	Quartzo Goetita Muscovita

(a) Fonte: Montalvan e Boscov (2015) e Montalvan (2016) *apud* Tsugawa, Pereira e Boscov (2017). (b) Modificado de Pereira, Tsugawa e Boscov (2018).

O lodo da ETA Cubatão é similar aos solos argilosos, exceto devido a elevada concentração de produtos químicos presentes no fluido intersticial, os quais possuem um importante papel no comportamento do lodo em

termos de dispersão-aglomeração de partículas e retenção-perda de água. A água intersticial do lodo da ETA Cubatão apresenta pH 7 e contém grande quantidade de cloreto férrico inserido durante o processo de tratamento (concentração de ferro de 47,5% determinada pela FRX). O lodo da ETA Cubatão é composto predominantemente por quartzo, goetita, muscovita e caulinita, podendo apresentar também amorfos. A curva granulométrica indicou que quase de 70%, em peso, das partículas sólidas têm diâmetro menor que 0,005 mm. A densidade específica dos grãos variou entre 2,85 e 3,20 g/cm³, o limite de liquidez é alto (170-240%), e a superfície específica é 52 m²/g.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Abordagem Geotécnica: ensaios mini Vane laboratorial

O objetivo deste trabalho foi investigar o efeito tixotrópico do lodo da ETA Cubatão pela determinação da resistência não drenada (S_u) através do equipamento mini Vane de laboratório. Primeiro, o lodo foi remoldado (cisalhado a mão utilizando-se uma espátula por alguns minutos) na umidade próxima ao seu limite de liquidez e inserido em um anel de PVC, com 75 mm de diâmetro e 40 mm de altura, colado a uma base plana e retangular de PVC de 140 x 100 mm. Depois, essas amostras foram armazenadas (o sistema foi deixado em repouso) por diferentes tempos (0, 1, 3, 7, 14, 28, 84 e 168 dias), mantendo-se a umidade constante. Somente após se atingir o tempo de armazenamento definido, as amostras foram ensaiadas utilizando-se o Vane miniatura e a resistência não drenada foi medida. As amostras “0-dias” foram ensaiadas 30 minutos após a preparação. Foram ensaiadas triplicatas para cada tempo de armazenamento. Os resultados são curvas de resistência não drenada em função da deformação e do tempo de armazenamento. O equipamento mini Vane de laboratório, fabricado pela Wykeham Farrance Engineering Ltd., é motorizado e rotaciona uma mola de torque a uma taxa constante de 50°/min, ao qual uma palheta Vane de 12,7 mm de diâmetro e 12,7 mm de altura é conectada. A mola de torque utilizada mede S_u de até 30 kPa. Os ensaios foram executados até o ângulo de rotação de 90° e a S_u de pico foi medida. Em seguida, a palheta Vane foi manualmente e rapidamente rotacionada cinco vezes e repetiu-se o ensaio repetido para se determinar a resistência residual do lodo.

Abordagem Reológica: ensaios de reometria rotacional de fluxo

O objetivo deste trabalho foi fazer uma primeira varredura relacionado ao comportamento reológico do lodo da ETA Cubatão. Amostras do lodo da ETA Cubatão com umidade (w) de 240% foram misturadas por 1 minuto a 10.000 rpm em um equipamento mecânico (Figura 1a) antes dos ensaios. Ensaios de fluxo do tipo “step change” com variação da taxa de cisalhamento foram executados utilizando-se o Reômetro Haake Mars 60 (Figura 1b), geometria de placas paralelas de aço de diâmetro de 35 mm, gap de 1,0 mm (altura do corpo de prova) e temperatura constante de 23°C (Figura 1c).

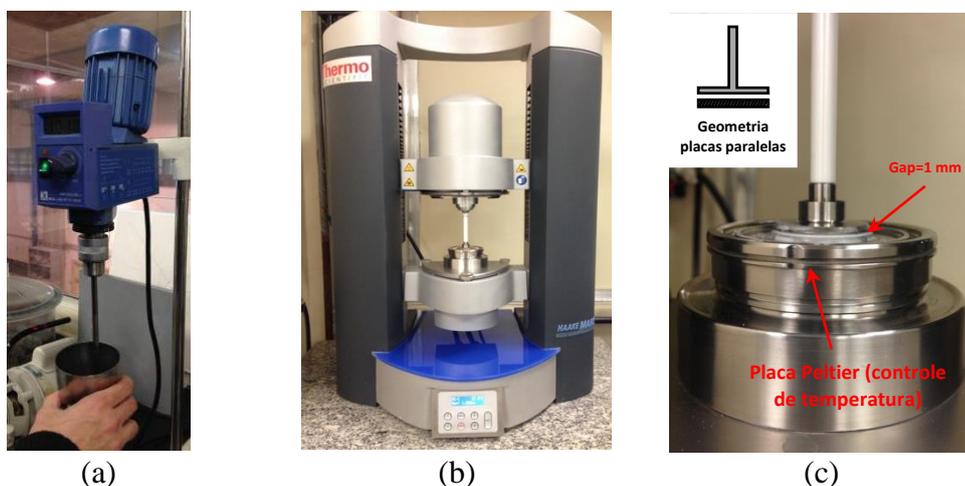


Figura 1: Ensaio de reometria rotacional: (a) Misturador mecânico de alta rotação; (b) Reômetro Haake Mars 60; (c) Detalhe da geometria de placas paralelas, gap e controlador de temperatura.



Durante o ensaio, a taxa de cisalhamento aumenta (aceleração) de 0 a 50 s⁻¹ e, posteriormente, diminui (desaceleração) de 50 a 0 s⁻¹, através de 10 passos de aceleração e 10 passos de desaceleração da taxa de cisalhamento, completando um ciclo de ensaio. Esse procedimento foi realizado duas vezes, ou seja, realizaram-se dois ciclos de aceleração-desaceleração, cada ciclo composto por 20 passos (10 de aceleração e 10 de desaceleração) de variação da taxa de cisalhamento, totalizando 40 passos. Cada passo foi composto por 10 medidas da tensão a cada 1 segundo (s), totalizando 400 medidas de tensão e 400 s de ensaio (Figura 2).

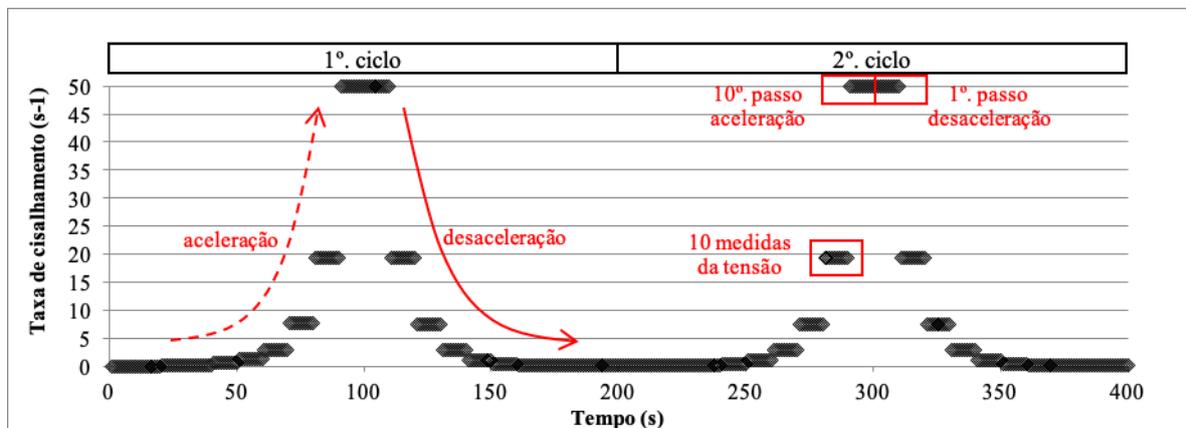


Figura 2: Histórico da taxa de cisalhamento aplicada no ensaio de fluxo “step change”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abordagem Geotécnica: ensaios mini Vane laboratorial

Os resultados da resistência não drenada de pico e residual em função do tempo de armazenamento para o lodo da ETA Cubatão estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resistência não drenada de pico e residual em função do tempo de armazenamento.

Tempo de armazenamento (dias)	S _u (kN/m ²)	S _{u residual} (kN/m ²)	Tempo de armazenamento (dias)	S _u (kN/m ²)	S _{u residual} (kN/m ²)
0	1,35	1,04	14	2,38	0,83
	1,24	0,93		2,49	0,93
	1,24	1,04		2,28	1,04
1	1,66	1,04	28	2,69	1,14
	1,66	1,04		2,80	1,24
	1,66	1,04		2,69	0,83
3 (1ª.serie)	0,52	0,00	84	2,90	0,83
	0,41	0,00		2,07	0,31
	1,24	0,52		2,07	0,31
3 (2ª. serie)	0,82	0,62	84	3,21	1,04
	0,82	0,41		2,38	0,73
	0,93	0,41		2,18	0,41
7	2,38	1,04	168	3,94	1,04
	2,49	1,04		4,66	1,45
	2,59	1,35		3,32	0,83

Fonte: modificado de Tsugawa, Pereira e Boscov (2017). S_u – resistência não drenada de pico; S_{u residual} – resistência não drenada residual.



As amostras foram preparadas com umidade média de 229%, valor próximo ao limite de liquidez do lodo da ETA Cubatão do Lote 1 (lote utilizado nos ensaios mini Vane), e índice de liquidez (IL) médio de 0,94. Observaram-se as maiores dispersões nos valores de 3 e 84 dias de armazenamento (Tabela 2). Assim, realizou-se uma segunda série de ensaios para os tempos de armazenamento de 3 e 84 dias. De forma geral, os valores de S_u residual apresentam maior dispersão do que os valores de S_u de pico (Tabela 2). A Figura 3 apresenta as médias das triplicatas da resistência não drenada de pico e residual em função do tempo de armazenamento.

A Figura 3 mostra que, de forma geral, a resistência não drenada do lodo da ETA Cubatão aumenta com o aumento do tempo de armazenamento (repouso), caracterizando seu comportamento tixotrópico. O aumento da resistência é mais acentuado nos 7 primeiros dias de repouso e parece tender para uma assíntota. Porém, os valores de S_u de pico e S_u residual das amostras armazenadas por 3 dias apresentam valores abaixo dos obtidos para as amostras ensaiadas imediatamente após a remoldagem (0-dias).

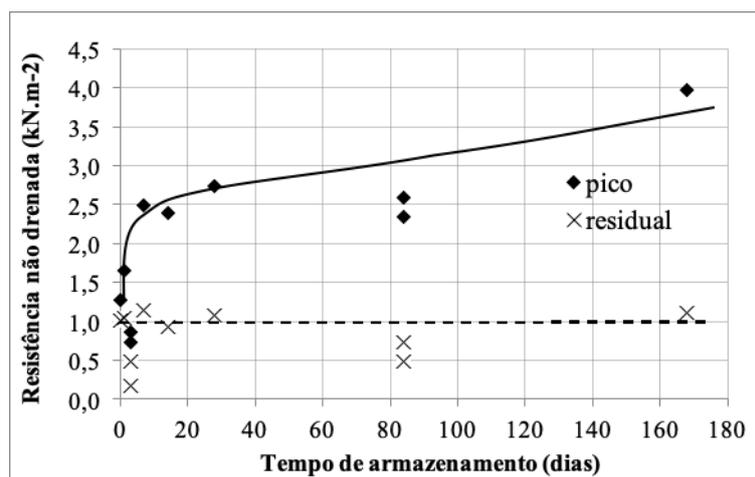


Figura 3: Resistência não drenada de pico e residual em função do tempo de armazenamento (tempo de repouso) – média entre as triplicatas ensaiadas.

Tsugawa, Pereira e Boscov (2017) compararam os resultados de resistência não drenada obtidos para o lodo da ETA Cubatão com os obtidos por Braga, Pinto e Boscov (2006) e Wang, Hull e Jao (1992) para uma argila orgânica de Belém e para um lodo de ETA de Pittsburgh, respectivamente. As amostras da argila de Belém foram remoldadas em diferentes umidades (77%, 83% e 92%) acima do limite de liquidez (70%), mas abaixo de sua umidade natural (84%) e, posteriormente, submetidas a ensaios mini Vane de laboratório. As amostras do lodo de Pittsburgh foram remoldadas em quatro diferentes teores de sólidos (41,2%, 36,8%, 35,4% e 33,5%) e a S_u foi obtida através do ensaio do cone de penetração. Os resultados para a argila de Belém e para o lodo de Pittsburgh mostraram a tendência similar à observada para o lodo da ETA Cubatão: a resistência não drenada aumentou mais acentuadamente nos 7 primeiros dias de armazenamento (repouso) e tendeu a um valor constante para tempos de armazenamento mais longos. Podemos dizer que os três materiais apresentaram comportamento tixotrópico, mesmo que com diferentes taxas de ganho de resistência. Uma observação mais detalhada dos resultados apresentados por Braga, Pinto e Boscov (2006) e Wang, Hull e Jao (1992) indica que, da mesma forma que ocorreu para o lodo da ETA Cubatão, aparentemente a resistência inicialmente aumenta rapidamente, depois diminui para um dado tempo de armazenamento e, depois, volta a aumentar. Porém, investigações adicionais são necessárias para comprovar as tendências observadas, considerando que ocorreu alta dispersão dos dados devido à baixa precisão dos métodos utilizados (mini Vane e cone).

Embora o comportamento tixotrópico seja usualmente analisado em termos de resistência não drenada em função do tempo de armazenamento, também pode ser expresso como “porcentagem de ganho tixotrópico” (“percentage thixotropic regain”) definido por Skempton e Northey (1952) através da equação (1).



$$\text{Porcentagem de ganho tixotrópico} = \frac{S_u(t) - S_u(0)}{S_u(0)} \quad \text{equação (1)}$$

Onde, $S_u(t)$ é a resistência não drenada obtida após um tempo de armazenamento (t) e $S_u(0)$ é a resistência não drenada obtida imediatamente após a remoldagem.

Tsugawa, Pereira e Boscov (2017) calcularam o percentual de ganho tixotrópico do lodo da ETA para todos os tempos de armazenamento ensaiados e compararam esses resultados com os obtidos por Skempton e Northey (1952) para diferentes argilas, conforme apresentado na Figura 4.

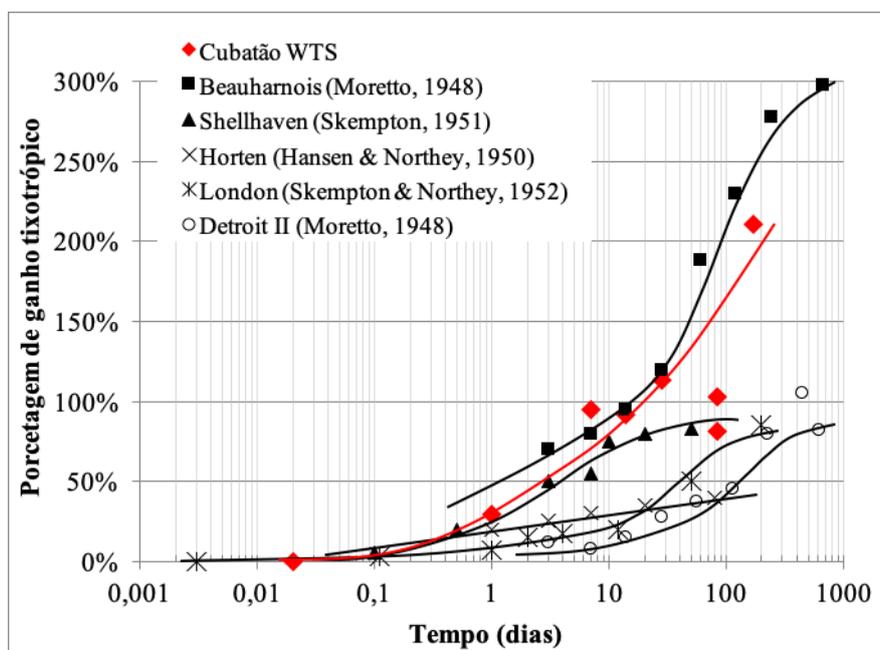


Figura 4: Ganho tixotrópico para diferentes argilas e para o lodo da ETA Cubatão. Fonte: Tsugawa, Pereira e Boscov (2017), modificado de Skempton e Northey (1952).

A Figura 4 mostra que os resultados obtidos para o lodo da ETA Cubatão encontram-se dentro da faixa de valores obtidos por Skempton e Northey (1952). A resistência não drenada do lodo da ETA Cubatão aumenta 20% após 1 dia de armazenamento (repouso) e após 168 dias o ganho tixotrópico é maior que 200%. Aparentemente, o máximo ganho tixotrópico não foi atingido após 168 dias de repouso.

O efeito tixotrópico do lodo da ETA Cubatão foi medido através do aumento da resistência com o aumento do tempo de armazenamento (repouso). Porém, é sabido que a perda da umidade das amostras ensaiadas também poderia causar o mesmo efeito de aumento da resistência não drenada do lodo. Dessa forma, foi realizado o controle da umidade das amostras preparadas do lodo da ETA Cubatão. Para esta análise, foram calculados os parâmetros de índice de liquidez (IL), conforme equação (2), e de “sensitividade adquirida” (“*acquired sensitivity*”) como proposto por Skempton e Northey (1952) através da equação (3).

$$IL = \frac{w - LP}{IP} \quad \text{equação (2)}$$

Onde, IL é o índice de liquidez, w é a umidade, LP é o limite de plasticidade e IP é o índice de plasticidade (LI-LP). Para $IL=1$, a umidade da amostra é igual ao seu limite de liquidez. Para $IL=0$, a umidade da amostra é igual ao seu limite de plasticidade.

$$\text{Sensitividade Adquirida} = \frac{S_u(t)}{S_u(0)} \quad \text{equação (3)}$$

Onde, $S_u(t)$ é a resistência não drenada obtida após um tempo de armazenamento (t) e $S_u(0)$ é a resistência não drenada obtida imediatamente após a remoldagem.

A Figura 5 apresenta a média das “sensitividades adquiridas” para as triplicatas preparadas para cada tempo de armazenamento em função do IL calculado com a umidade das amostras ao final do ensaio para obtenção da S_u .

A perda de água para as amostras de 168 dias foi a mais significativa, já que apresentou o IL que mais se distanciou do valor inicial médio de IL de 0,94, e que pode ser responsável pela elevada sensibilidade adquirida. Porém, comparando os resultados de 3, 84 e 168 dias que apresentaram o mesmo valor de IL de 0,85, observa-se que a sensibilidade adquirida para 168 dias é maior. Este fato indica que o ganho de resistência após 168 dias de repouso é, possivelmente, consequência tanto do efeito tixotrópico quanto da perda de água sofrida pela amostra. Já para as amostras ensaiadas imediatamente (0-dias), 7, 14 e 28 dias, observa-se que a sensibilidade adquirida aumenta com o tempo de armazenamento da amostra e que o IL permaneceu praticamente constante e igual ao valor inicial, sugerindo que o ganho de resistência foi devido exclusivamente ao efeito tixotrópico. Assim, fica evidente que a perda de água, apesar de expressiva para algumas amostras, não explica o ganho de resistência sofrido por elas, indicando o comportamento tixotrópico do lodo da ETA Cubatão. Esses resultados foram apresentados com maior detalhe em Tsugawa, Pereira e Boscov (2017).

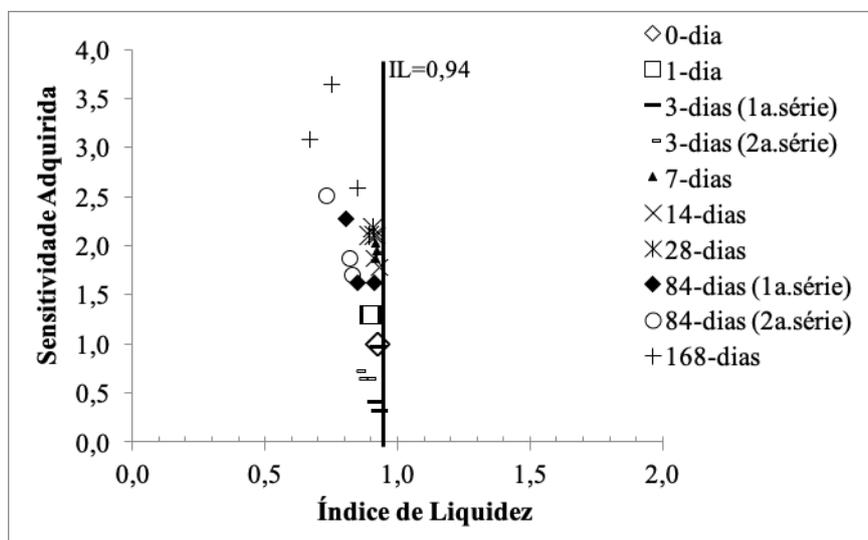


Figura 5: Sensibilidade adquirida média (entre as triplicatas ensaiadas) em função do índice de liquidez. Fonte: Tsugawa, Pereira e Boscov (2017), modificado de Skempton e Northey (1952).

Abordagem Reológica: ensaios de reometria rotacional de fluxo

A Figura 6a apresenta os resultados dos ensaios de fluxo do tipo “step change” para ambos os ciclos de aceleração-desaceleração. As Figuras 6b e 6c apresentam o primeiro e o segundo ciclos, respectivamente. O primeiro ciclo de aceleração-desaceleração está relacionado ao comportamento do lodo da ETA Cubatão para “very early ages”, enquanto o segundo ciclo é a condição onde o estado estável do material foi alcançado. Observa-se um atraso na resposta da tensão de cisalhamento entre as etapas de aceleração e desaceleração, descrevendo uma região entre as curvas denominada área de histerese (“hysteresis loop”). A Figura 6c mostra que a tensão de cisalhamento necessária para manter um certo valor de taxa de cisalhamento é maior na etapa de desaceleração que na de aceleração, descrevendo uma área de histerese negativa, a qual é associada com comportamento reopéxico. Porém, uma análise mais detalhada (Figura 6d) mostra que até a taxa de cisalhamento de 3 s^{-1} as curvas de aceleração e desaceleração descrevem uma área de histerese positiva, ou seja, comportamento reológico associado a pseudoplasticidade. A Figura 6b apresenta uma área de histerese positiva até 10 s^{-1} , mas esta tendência muda com a mudança da taxa de cisalhamento. Alguns autores (MEWIS, 1979; MALKIN, 1994; MEWIS; WAGNER, 2009; TADROS, 2010) têm associado área de histerese positiva



com comportamento tixotrópico. Mas o “*hysteresis loop method*” é limitado para se avaliar tixotropia, já que os efeitos da taxa de cisalhamento e do tempo sobre a viscosidade não podem ser separados (MEWIS, 1979).

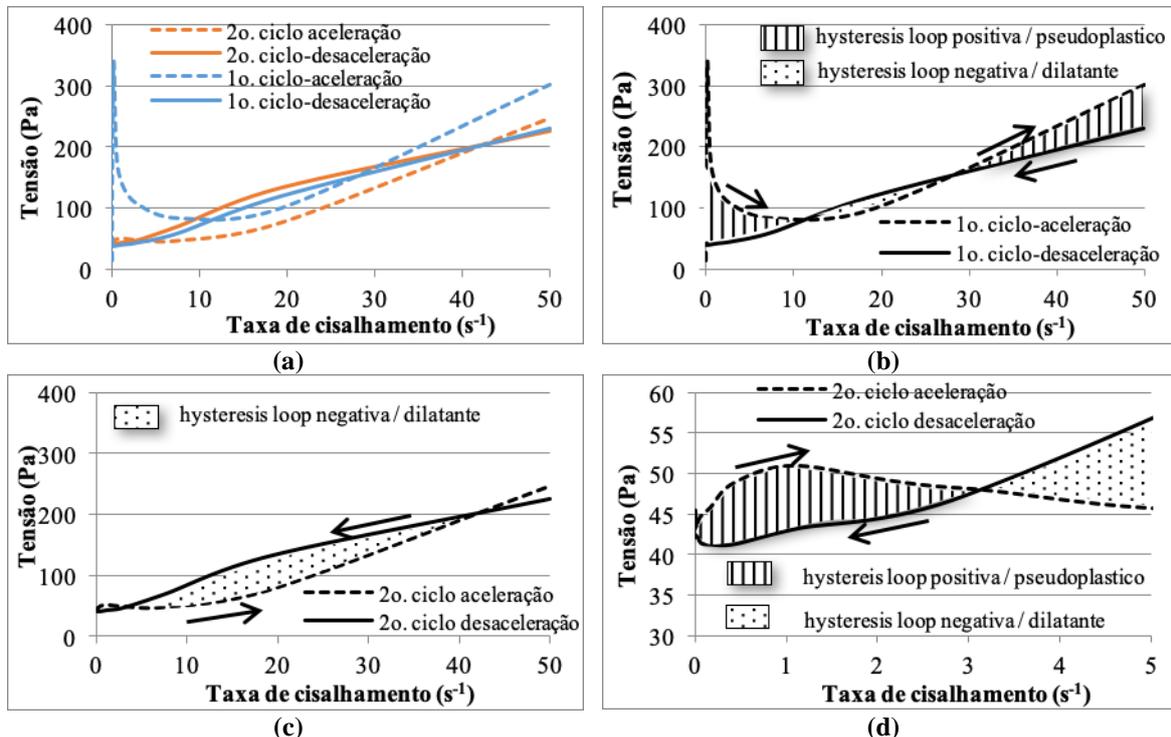


Figura 6: Curvas dos ensaios de reometria rotacional de fluxo do tipo “*step change*”: (a) para ambos os ciclos de aceleração-desaceleração; (b) para o primeiro ciclo; (c) para o segundo ciclo; (d) detalhe do segundo ciclo para baixos valores de taxa de cisalhamento. Fonte: modificado de Tsugawa et al. (2019).

Os resultados da primeira etapa de aceleração (Figura 6b) mostraram que, apesar do procedimento de mistura a altas rotações aplicado ao lodo da ETA Cubatão para preparação da amostra antes do ensaio reométrico, ocorre um rápido aumento da tensão (0 a 340 Pa) no início do ensaio, seguido por um abrupto decréscimo (340 a 84 Pa), na faixa de baixos valores da taxa de cisalhamento (0 a 7,5 s⁻¹). Esta tendência sugere que entre o processo de mistura e o ensaio, o lodo recuperou seu estado aglomerado e uma alta tensão foi necessária para manter a taxa de cisalhamento, tornando-se mais amolecido e fluido depois de cisalhado por um certo tempo. Provavelmente, esse amolecimento deveu-se ao aumento da taxa de cisalhamento, mas também aos rearranjos microestruturais ao longo do tempo, descrevendo um comportamento tixotrópico do lodo da ETA Cubatão.

A tensão de escoamento, definida como a tensão mínima necessária para que o material inicie o fluxo e deforme plasticamente, foi estabelecida como sendo a tensão correspondente ao menor valor da taxa de cisalhamento aplicada durante o ensaio. A viscosidade aparente foi calculada a partir da relação entre tensão e taxa de cisalhamento no máximo valor. A área de histerese foi calculada a partir da área entre as curvas de aceleração e desaceleração para o 1º. e 2º. ciclos (Tabela 3).



Tabela 3: Parâmetros reológicos do lodo da ETA Cubatão.

	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade e aparente (Pa.s)	Área de histerese (Pa/s)
1º. ciclo de aceleração-desaceleração	43,4	4,53	1337,8
2º. ciclo de aceleração-desaceleração	43,0	4,92	-1074,8

Fonte: modificado de Tsugawa et al. (2019).

Considerações sobre os ensaios Vane e os de reometria rotacional

Os dados experimentais obtidos pelos ensaios mini Vane (taxa de cisalhamento constante) e reometria rotacional de fluxo (tipo “*step chance*”, com variação controlada da taxa de cisalhamento) não podem ser diretamente comparados, já que se tratam de diferentes métodos. Os ensaios mini Vane mediram a tixotropia do lodo para tempos longos a partir do armazenamento das amostras por dias a meses. Já os ensaios rotacionais de fluxo realizados indicaram tixotropia para tempos bastante precoces (segundos a minutos). Ambos os ensaios estão relacionados a diferentes solicitações e respostas, porém, ambos podem ser utilizados para a caracterização da tixotropia. Tixotropia relacionada a tempos longos também pode ser medida através da reometria rotacional, mas outro procedimento experimental deve ser adotado. Além disso, cada método apresenta vantagens e desvantagens (Tabela 4).

Tabela 4: Comparação entre o ensaio mini Vane e a reometria rotacional de placas paralelas.

	Equipamento mini Vane de laboratório (com mola)	Reometria rotacional de placas paralelas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - mínima perturbação da amostra antes da medida, o que evita a quebra da estrutura da amostra. - amostras indeformadas podem ser ensaiadas. - possível a medição e quantificação do ganho tixotrópico. - equipamento de baixo custo. - procedimentos são normatizados. 	<ul style="list-style-type: none"> - o estudo da tixotropia pode ser bastante rápido, já que apenas uma amostra é necessária. - o controle da variação da taxa de cisalhamento pode ser facilmente realizado. - possível a realização de ensaios de tensão controlada ou deformação controlada. - uma quantidade mínima de amostra é usada. - a aquisição de dados é totalmente automática.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - o estudo da tixotropia consome bastante tempo, uma vez que várias amostras precisam ser ensaiadas. - variação da taxa de cisalhamento potencialmente descontrolada quando um dispositivo manual é usado. - usualmente, a taxa de cisalhamento em sistemas motorizados é constante, sem a possibilidade de alteração. - não é adequado para suspensões diluídas. - maior quantidade de amostra é necessária. - usualmente, a aquisição de dados é feita manualmente. 	<ul style="list-style-type: none"> - o ganho tixotrópico para tempos longos obtidos a partir do armazenamento das amostras pode ser obtido, porém, ocorre perturbação da amostra durante a colocação da amostra sobre a geometria placa-placa. - amostras indeformadas não podem ser ensaiadas. - a quebra da estrutura da amostra pode induzir a erros. - equipamento de elevado custo. - procedimentos experimentais não são normatizados.

Fonte: modificado de Tsugawa et al. (2019).

CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios mini Vane indicaram que o lodo da ETA Cubatão é tixotrópico. A resistência não drenada é bastante baixa e aumenta com o tempo de armazenamento (repouso). Após 5 meses (168 dias), a resistência não drenada é três vezes maior que aquela medida imediatamente após a remoldagem (umidade próxima ao limite de liquidez). O ganho tixotrópico do lodo da ETA Cubatão está dentro da faixa obtida para diferentes argilas da literatura. Apesar do ganho tixotrópico atingir 200%, o lodo da ETA Cubatão tem baixa resistência e o efeito tixotrópico ocorrido após 168 dias não é suficiente para aumentar significativamente a

resistência. Assim, tratamento adicional será necessário para tornar viável o reuso do lodo da ETA Cubatão em obras de terra.

A história da taxa de cisalhamento ao qual um material foi previamente submetido afeta seu comportamento mecânico. Os resultados dos ensaios reométricos utilizando a metodologia “*step change*” (sistemático aumento e diminuição da taxa de cisalhamento) indicaram que o lodo da ETA Cubatão apresenta comportamento pseudoplástico, tixotropia para taxas de cisalhamento baixas e reopexia para taxas de cisalhamento altas. Para baixas taxas de cisalhamento, tanto o ensaio mini Vane quanto o ensaio reométrico rotacional indicaram comportamento tixotrópico do lodo da ETA Cubatão. Assim, se altas taxas de cisalhamento fossem aplicadas durante os ensaios mini Vane, espera-se que o comportamento reopéxico seria também observado.

A reometria rotacional é uma poderosa ferramenta para a caracterização das características mecânicas do lodo de ETA, considerando que é um método prático, muito rápido, adaptado a pastas e fluidos e pode ser realizado sob diferentes condições de sollicitações ao longo do tempo. Esta flexibilidade torna possível o estudo de diversas condições de campo. O ensaio mini Vane é limitado para o estudo de materiais com elevada umidade, como o que ocorre com o lodo de ETA, por não conseguir medir resistências muito baixas, e grande quantidade de amostra é necessária, mas é um ensaio normatizado e ocorre uma mínima perturbação da amostra. Assim, a escolha do melhor método depende dos objetivos da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Projeto 2013/50448-8) e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP por patrocinarem este projeto de pesquisa, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de doutorado fornecida a autora e pelas bolsas de produtividade em pesquisa fornecidas a coautora e coautor, o Laboratório de Mecânica dos Solos Milton Vargas e o Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais pelo suporte na execução dos ensaios laboratoriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBRECHT, A. E. Disposal of alum sludge. AWWA-Journal of American Water Works Association, v. 64, n. 1, p. 46–52, January, 1972.
2. AWWA. Water treatment plant sludges: an update of the state of the art-Part 1. JAWWA-Journal of American Water Works Association, v. 70, n. 9, p. 498–503, September, 1978.
3. AYDILEK, A. H.; EDIL, T. B.; FOX, P. J. Consolidation characteristics of wastewater sludge. ASTM Special Technical Publication, v. 1374, p. 309–323, 1999.
4. BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. F. R. S. An introduction to rheology. 3rd. ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 1993. v. 1
5. BASIM, S. C. Physical and geotechnical characterization of water treatment plant residuals. 1999. New Jersey Institute of Technology, 1999.
6. BAUDEZ, J. C. Physical aging and thixotropy in sludge rheology. Applied Rheology, v. 18, n. 1, 2008.
7. BRAGA, R. M. Q. L.; PINTO, C. de S.; BOSCOV, M. E. G. Tixotropia em solos remoldados. Solos e Rochas, v.29, n. 2, p. 247–257, 2006.
8. BURGERS, J. M.; SCOTT-BLAIR, G. W. Report on the principles of rheological nomenclature. In: Proc., Int. Rheol. Cong., Amsterdam, Anais...1948.
9. CASTILHOS JUNIOR, A. de; PRIM, E.; PIMENTEL, F. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. Estudos Tecnológicos em Engenharia, v. 7, n. 2, p. 86–97, 2012. Disponível em: <http://revistas.unisinos.br/index.php/estudos_tecnologicos/article/view/4515>.
10. CHEN, H.; MA, X.; DAI, H. Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 6, p. 436–439, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.009>>.
11. ESHTIAGHI, N. et al. Rheological characterisation of municipal sludge: A review. Water Research, v. 47, n. 15, p. 5493–5510, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.001>>.
12. 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. Cerâmica, v. 51, p. 85–95, 2005a.

13. HOPPEN, C. et al. Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. In: 23o. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental., Anais...ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental., 2005b.
14. HSIEH, H. N.; RAGHU, D. Criteria development for water treatment plant residual monofill. [s.l.] AWWA -American Water Works Association, 1997.
15. IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro-RJ: IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística., 2010.
16. JEONG, S. W. et al. Thixotropic and anti-thixotropic behaviors of fine-grained soils in various flocculated systems. *Engineering Geology*, v. 196, p. 119–125, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795215300247>>.
17. MALKIN, A. Y. *Rheology Fundamentals*. [s.l.] ChemTec Publishing, 1994.
18. MEWIS, J. Thixotropy - a general review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 6, n. 1, p. 1–20, 1979.
19. MEWIS, J.; WAGNER, N. J. Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 147–148, n. C, p. 214–227, 2009.
20. MITCHELL, J. K. Fundamental aspects of thixotropy in soils. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.*, v. 86, n. SM3, p. 19–52, 1960.
21. MONTALVAN, E. L. T. *Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenosos com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP*. 2016. University of Sao Paulo, 2016.
22. MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Caracterização geotécnica de lodo de estação de tratamento de água (ETA) e de mistura solo-lodo. In: *Anais do IV Simpósio sobre Resíduos Sólidos _ SIRS, São Carlos-SP*. Anais... São Carlos-SP: 2015.
23. MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Geotechnical Characterization of a Soil-Water Treatment Sludge Mixture. In: *Geo-chicago, Chicago*. Anais... Chicago: ASCE, 2016.
24. MORITA, D. M. et al. Incorporação de lodos de estações de tratamento de água em blocos cerâmicos. *Revista Saneas*, v. 1, n. 14, 2002.
25. NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Yield stress measurement for concentrated suspensions. *Journal of Rheology*, v. 27, n. 321, p. 321–349, 1983.
26. O'KELLY, B. C. Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 45, p. 715–725, 2008.
27. O'KELLY, B. C.; QUILLE, M. E. Compressibility and consolidation of water treatment residues. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, v. 162, n. WR2, p. 85–97, 2009.
28. O'KELLY, B. C.; QUILLE, M. E. Shear strength properties of water treatment residues. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, v. 163, n. 1, p. 23–35, 2010. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geng.2010.163.1.23>>.
29. OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Ceramica*, v. 50, p. 324–330, 2004.
30. PEREIRA, K. F. S.; TSUGAWA, J. K.; BOSCOV, M. E. G. Caracterização geotécnica de misturas de lodo de estação de tratamento de água (ETA) com cal. In: *Cobramseg 2018, Anais...2018*.
31. RAGHU, D. et al. Water treatment plant sludge as landfill liner. In: *Geotechnical Practice for Waste Disposal'87*. *Proceedings of a Specialty conference, Anais...ASCE-American Society of Civil Engineers*, 1987.
32. RATKOVICH, N. et al. Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling. *Water Research*, v. 47, n. 2, p. 463–482, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.021>>.
33. RODRIGUEZ, T. T. et al. Estudo da compactação de lodo de ETA para uso em aterros sanitários. In: *Anais do VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos REGEO/Geossintéticos, Belo Horizonte-MG*. Anais... Belo Horizonte-MG: 2011.
34. ROQUE, A. J.; CARVALHO, M. Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material. (Thomas Telford, Ed.) In: *Proceedings of the 5th International Congress on Environmental Geotechnics, London*. Anais... London: ASCE-American Society of Civil Engineers, 2006.
35. SEED, H. H.; CHAN, C. K. Thixotropic characteristics of compacted clays. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.*, v. 83, n. SM4, p.

- 1427, 1957.
36. SEYSSIECQ, I.; FERRASSE, J.; ROCHE, N. State-of-the-art : rheological characterisation of wastewater treatment sludge. v. 16, p. 41–56, 2003.
 37. SILVA, J. F. A. da. Comportamento de concreto asfáltico tendo lodo da ETA da cidade de Manaus como filler. 2008. Faculdade de Tecnologia, Universidade do Amazonas., 2008.
 38. SKEMPTON, A. W.; NORTHEY, R. D. Sensitivity of clays. *Geotechnique*, v. 3, n. 1, p. 30–53, 1952.
 39. TADROS, T. F. *Rheology of Dispersions*. [s.l.] Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. v. 44
 40. TEIXEIRA, S. R. et al. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Applied Clay Science*, v. 53, n. 4, p. 561–565, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.004>>.
 41. TERZAGHI, K.; PECK, R. B. *Soil mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1948.
 42. TSUGAWA, J.K.T; ROMANO, R.C. DE O.; PILEGGI, R.G; BOSCOV, M. E. . *A Rheological Approach for the Evaluation of Geotechnical Use of Water Treatment Sludge*. [s.l.] Springer Singapore, 2019. v. 1
 43. TSUGAWA, J. K.; PEREIRA, K. F. S.; BOSCOV, M. E. B. Thixotropy of sludge from the Cubatão Water Treatment Plant , Brazil. (ASCE, Ed.) In: *Geotechnical Frontiers 2017*, Orlando, FL. Anais... Orlando, FL: ASCE-American Society of Civil Engineers, 2017.
 44. UN-WATER. *Wastewater Management: A UN-Water Analytical Brief*, 2015. . Disponível em: <<http://www.unwater.org/publications/wastewater-management-un-water-analytical-brief/>>.
 45. UNITED UNION. World population projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion in 2100. Disponível em: <<https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html>>.
 46. VANDERMEYDEN, C.; CORNWELL, D. A. *Nonmechanical dewatering of water plant residuals*. [s.l.] AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 1998.
 47. WANG, M. C. et al. Engineering behavior of water treatment sludge. *Journal of Environmental Engineering*. ASCE., v. v.118, n. n.6, p. 848- 864p., 1992.
 48. WANG, M. C.; HULL, J. Q.; JAO, M. Stabilization of water treatment plant sludge for possible use as embankment material.pdf. *Transportation Research Record*, n. 1345, p. 36–43, 1992.
 49. WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAME). *The United Nations World Water Development Report 4. Managing Water under Uncertainty and Risk*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr4-2012/>>.
 50. XIA, Z. *Geotechnical characterization of water treatment plant residuals*. 1994. New Jersey Institute of Technology, 1994.