

II-290 - VARIAÇÕES NA DENSIDADE DO LODO PROVENIENTE DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DEVIDO A PERDAS DE UMIDADE

Sara Rachel Orsi Moretto⁽¹⁾

Bacharel em Física pela PUC-SP. Mestre em Eletrônica e Telecomunicações/Materiais pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Professora Adjunta da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Rogério Francisco Küster Puppi

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Geotecnia pela PUC Rio. Doutor em Métodos Numéricos pela Universidade Federal do Paraná. Professor Adjunto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Eduardo Sabino Pegorini

Engenheiro agrônomo pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Ciência do Solo/Recursos Naturais. Coordenador Industrial da Unidade de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de Curitiba da Companhia de Saneamento do Paraná.

Carolina Olsen Noga

Graduanda em Licenciatura em Química pela Universidade Federal do Paraná. Agente Técnica de Produção da Companhia de Saneamento do Paraná.

Bruno Henrique Belém do Nascimento

Graduando em Tecnologia em Gestão Ambiental. Agente Técnico de Produção da Companhia de Saneamento do Paraná.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Av. Sete de Setembro 3165 – Centro - Curitiba – PR – CEP: 80230-901 – Brasil – Tel: 55(41)33104639. e-mail: rachel@utfpr.edu.br

RESUMO

O conhecimento do volume ou massa do lodo, para o dimensionamento das etapas de tratamento e disposição final do lodo e para a obtenção dos custos de manuseio e transporte do mesmo, é fundamental para a gestão de uma ETE. Entretanto, para que se relacione volume e massa de lodo, para um determinado teor de sólidos totais, é necessário conhecer a densidade do mesmo para este teor de sólidos. Neste sentido, o presente trabalho buscou implementar metodologias para medidas experimentais da densidade do lodo proveniente de tratamento biológico por reatores UASB e sujeito ao desaguamento mecânico através de centrifuga. Como consequência, foram obtidas curvas da densidade do lodo úmido, da densidade aparente e da porosidade total, todas em função do teor de sólidos totais do lodo, cujas medidas foram tomadas durante o descarte, durante a centrifugação e durante seis meses no pátio de cura e secagem. Foram também realizadas medidas da densidade de partículas, afim de que se pudesse determinar a porosidade total do lodo para os diversos teores de sólidos analisados, assim como medidas do limite de contração para estes lodos. Embora as medições tenham sido efetuadas com dois lotes de lodo ao invés de um e a secagem do lodo no pátio de cura e secagem tenha sido pouco eficiente, os resultados encontrados estão dentro do esperado. Todas as metodologias experimentais foram aplicadas satisfatoriamente, podendo ser reproduzidas em condições climáticas diferentes das estudadas, com o lodo caleado ou não, revolvido ou não.

PALAVRAS-CHAVE: gestão de uma ETE, densidade do lodo, porosidade do lodo, limite de contração do lodo.

INTRODUÇÃO

Pelo fato de representar uma porcentagem considerável do custo de operação de uma ETE (20-60%), as escolhas de alternativas para o processamento do lodo e para a disposição final do mesmo devem ser partes integrantes do projeto de uma ETE, considerando-se a qualidade do esgoto a ser tratado e o tipo de tratamento deste esgoto. A partir destas escolhas, a ETE deve apresentar estrutura física e gerencial compatível com as atividades a serem desenvolvidas (FERNANDES et al., 2001). Para a gestão técnica e econômica do processo é necessário que se faça o controle de qualidade e quantidade do lodo.

Para a quantificação de lodo numa ETE, parte-se do princípio que o volume V de uma determinada massa úmida de lodo M_t pode ser calculado se o valor da densidade ρ_u desta massa é conhecido. Alternativamente, é possível determinar a massa do lodo se o seu volume e densidade são conhecidos. Supondo que o lodo tenha um teor de sólidos total $TS(\text{medido em \%})$ conhecido, é possível também relacionar o volume do lodo com sua massa seca ou sólida M_s e com a densidade aparente ρ_{ap} do lodo, para este teor de sólidos, como mostra a equação (1).

$$V = \frac{M_t}{\rho_u} = \frac{M_s}{\rho_u \times \frac{TS}{100}} = \frac{M_s}{\rho_{ap}} \quad (1)$$

Onde,

$$M_t = \frac{M_s}{\frac{TS}{100}} \quad (2)$$

e

$$\rho_{ap} = \rho_u \times \frac{TS}{100} \quad (3)$$

A equação (1) é bastante útil para o dimensionamento das etapas de tratamento e disposição final do lodo, quando se tem por base a vazão do lodo em diversas etapas de processamento do lodo como, por exemplo, a vazão de descarte e a vazão de disposição final. Estas vazões são normalmente relacionadas com a carga de sólidos, conforme equação (4) (SPERLING; GONÇALVES, 2001).

$$\text{Vazão lodo (m}^3/\text{dia)} = \frac{\text{carga de sólidos (kgSS/dia)}}{\rho_u \times \frac{TS}{100}} = \frac{\text{carga de sólidos (kgSS/dia)}}{\rho_{ap}} \quad (4)$$

Sob o ponto de vista econômico, o lodo processado e disposto apresenta um custo por metro cúbico ou por tonelada disposta. Os custos de manuseio e transporte são normalmente calculados com base no volume do lodo úmido (R\$ por m³ de lodo), porém muitas vezes se faz o cálculo com base na massa seca do lodo (R\$ por kg ST), para efeito comparativo entre alternativas (FERNANDES et al., 2001). Este fato também evidencia a utilidade da equação (1).

Assim, é importante conhecer de maneira confiável o teor de sólidos totais do lodo e a densidade do lodo para este teor de sólidos, a fim de se relacionar a massa e volume de lodo para o teor de sólidos desejado. Em cálculos mais grosseiros, quando não se conhece a densidade do lodo, normalmente ela é considerada como 1000 kg/m³ (densidade da água pura a 4°C), por ser frequentemente próxima a este valor nas diversas etapas do processamento do lodo.

Consideremos uma quantidade de lodo de massa total M_t , composta por uma massa de sólidos M_s , uma massa de líquidos (água) M_{ag} , e por uma massa de gases (ar), normalmente desprezível na prática, M_{ar} . De maneira similar, supõe-se que o volume total V_t desta quantidade de lodo seja composto por um volume de sólidos V_s , um volume de líquidos V_{ag} , e um volume de gases V_{ar} , de forma que:

$$M_t = M_s + M_{ag} + M_{ar} \quad (5)$$

$$V_t = V_s + V_{ag} + V_{ar} \quad (6)$$

Define-se a densidade de partículas ρ_p , como a razão entre a massa total das partículas sólidas pelo volume destas partículas, excluindo-se os espaços porosos entre as mesmas, tal que:

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (7)$$

Quando o lodo estiver seco, apenas as fases sólida e gasosa estarão presentes. A densidade aparente ρ_{ap} é definida como a razão entre a massa do lodo seco e o volume da amostra quando retirada de campo, ou seja:

$$\rho_{ap} = \frac{M_s}{V_t} = \rho_p \frac{V_s}{V_t} = \rho_p f_{vs} \quad (8)$$

Onde f_{vs} é a fração volumétrica de sólidos.

$$f_{vs} = \frac{V_s}{V_t} = \frac{\rho_{ap}}{\rho_p} \quad (9)$$

Conforme a equação (3), a densidade aparente também pode ser determinada através da densidade da amostra úmida.

Para a determinação da densidade do lodo úmido ρ_u , deve-se levar em conta a massa de líquido da amostra, ou seja,

$$\rho_u = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_s + M_{ag}}{V_t} = \rho_p \frac{V_s}{V_t} + \rho_{ag} \frac{V_{ag}}{V_t} = \rho_p f_{vs} + \rho_{ag} \theta \quad (10)$$

Onde $\theta = V_{ag}/V_t$ corresponde à fração volumétrica da porção líquida do lodo, e ρ_{ag} corresponde à densidade desta porção líquida, normalmente tomada como água pura. A fração volumétrica da porção líquida está relacionada com a densidade do lodo úmido e densidade aparente, como mostra a equação (11).

$$\theta = \frac{\rho_u - \rho_{ap}}{\rho_{ag}} \quad (11)$$

Alguns autores (LAL; SHUKLA, 2004) definem a densidade aparente seca e a densidade aparente úmida. A primeira corresponde à densidade aparente definida pela equação (8) e a segunda à densidade da amostra úmida, conforme equação (9). Neste trabalho, por questão de simplicidade, o termo densidade poderá ser utilizado com o mesmo sentido de densidade úmida.

A porosidade total α , definida como a razão entre a soma dos volumes das porções líquida e gasosa pelo volume total da amostra, é mostrada abaixo.

$$\alpha = \frac{V_{ag} + V_{ar}}{V_t} = \theta + \alpha_{ar} \quad (12)$$

Onde $\alpha_{ar} = V_{ar}/V_t$ é a fração volumétrica da porção gasosa.

Sendo $f_{vs} + \alpha = 1$, e como $f_{vs} = \rho_{ap}/\rho_p$, tem-se que:

$$\alpha = 1 - f_{vs} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_p} \quad (13)$$

A saturação (ou grau de saturação) S , definida como a razão entre a fração volumétrica de água e a porosidade total, é uma grandeza que indica a proporção do volume de vazios que está preenchida com água.

$$S = \frac{\theta}{\alpha} = \frac{\alpha - \alpha_{ar}}{\alpha} = 1 - \frac{\alpha_{ar}}{\alpha} \quad (14)$$

A densidade da amostra, quando a mesma se encontra saturada, ρ_{sat} , é determinada pela equação (15), só que $V_t = V_s + V_{ag}$, e esta equação deixa de ser válida quando o ar começa penetrar na amostra. A expressão abaixo mostra a densidade da amostra saturada em função do teor de sólidos, lembrando que,

$$M_s = M_t TS \text{ e } M_{ag} = M_t(100 - TS)$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_t}{V_s + V_{ag}} = \frac{M_t}{\frac{M_s}{\rho_p} + \frac{M_{ag}}{\rho_{ag}}} = \frac{1}{\frac{TS/100}{\rho_p} + \frac{(100 - TS)/100}{\rho_{ag}}} \quad (15)$$

O limite de contração (U_{lc}) representa a umidade gravimétrica correspondente ao limite inferior do volume, abaixo da qual não há mais decréscimo do volume do lodo, conforme a água é evaporada, durante o processo de secagem. Corresponde à umidade gravimétrica na qual o lodo passa do estado semissólido para o estado sólido, e o volume do sólido permanece constante com a secagem progressiva (LAL; SHUKLA, 2004). Como a umidade gravimétrica é definida como a razão entre a massa de água e a massa de sólidos da amostra, o limite de contração é fornecido pela equação (EMBRAPA, 1997):

$$U_{lc} = \rho_{ag} \times \left(\frac{V_0}{M_s} - \frac{1}{\rho_p} \right) \times 100 \text{ (\%)} \quad (16)$$

Onde V_0 é o volume da amostra totalmente seca.

A relação entre o limite de contração e o teor de sólidos correspondente é obtida pela relação abaixo:

$$TS = \frac{1}{U_{lc} + 100} \text{ (\%)} \quad (17)$$

O objetivo do presente trabalho é implementar metodologias para medidas experimentais de densidade do lodo proveniente de tratamento biológico por reatores UASB e sujeito ao desaguamento mecânico através de centrifuga. Como consequência, foram obtidas curvas da densidade do lodo úmido, da densidade aparente e da porosidade total, todas em função do teor de sólidos totais do lodo, cujas medidas foram tomadas durante o descarte, durante a centrifugação e durante seis meses, tempo maior que o tempo normal que o lodo fica disposto no pátio de cura e secagem da ETE escolhida para este estudo. Foram também realizadas medidas da densidade de partículas, afim de que se pudesse determinar a porosidade total do lodo para os diversos teores de sólidos analisados, assim como medidas do limite de contração para estes lodos.

Devido à ausência de metodologias formais para a determinação da densidade do lodo em muitas ETEs, incluindo a ETE CIC Xisto, e devido ao fato da referida ETE estar entre as maiores geradoras de lodo da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), além de ser uma Unidade Gerenciadora de Lodo, que recebe anualmente cerca de 1000 m³ de lodo de outras estações da RMC, para serem caleados e posteriormente enviados à agricultura, juntamente com o lodo produzido nesta ETE, optamos pela escolha desta estação para a realização do trabalho. Outra característica importante desta ETE, é que lá o desaguamento do lodo é feito por centrífuga, que é o método mais utilizado no estado, depois de leitos de secagem.

MATERIAIS E MÉTODOS

A ETE CIC Xisto realiza tratamento biológico de esgoto através de sete reatores UASB, cuja vazão média para cada reator é de 70 L/s e pós-tratamento em lagoa de sedimentação, atendendo uma população total de 320 mil pessoas. Os efluentes dos reatores seguem para a lagoa de sedimentação, enquanto o lodo descartado segue para um adensador, cuja função atual tem sido apenas receber e homogeneizar, através de um mixer eletromecânico, o lodo descartado, que seguirá para o desaguamento mecânico, realizado por uma centrífuga (Pieralise, modelo FP 600 rs2). O lodo recebe a adição de polímero catiônico na proporção de 2 a 3 kg por tonelada de massa seca. Nos procedimentos normais da estação, após passar pela centrífuga, o lodo desaguado recebe aproximadamente 0,5 t de cal dolomítica, para cada tonelada de massa seca do lodo centrifugado e, posteriormente, é conduzido para uma baía de estocagem temporária. Mensalmente, quando a baía está totalmente preenchida, o lodo é disposto no pátio de cura e secagem através de retroescavadeiras, e cada lote disposto recebe uma adição superficial de cal, permanecendo no pátio por um período de aproximadamente quatro meses (um mês para caleação – quando a caleação não ocorre automaticamente, um mês para cura, um mês para a chegada das análises laboratoriais específicas para a utilização agrícola, e um mês para busca de locais apropriados para a disposição, carregamento e aplicação).

No caso específico deste experimento, com o intuito de diminuir variáveis que viessem interferir na densidade do lodo, optou-se por não adicionar cal à massa de lodo em nenhuma circunstância, ou seja, após a centrifugação e no pátio de cura e secagem. Optou-se também por não manusear a massa do lodo quando o mesmo estivesse disposto no pátio de cura e secagem, evitando que o lodo fosse sujeito a qualquer tipo de revolvimento. A idéia era também amostrar uma única massa de lodo, cuja umidade variasse no tempo e que estivesse inicialmente no adensador, posteriormente na baía (após a centrifugação) e, finalmente, no pátio de

cura e secagem. Por uma questão de praticidade, estes lodos foram denominados, respectivamente, de lodo líquido, lodo após centrifugação e lodo sólido. Amostrou-se uma massa de lodo, denominada lote 1, realizando medições da densidade do lodo líquido e do lodo após centrifugação, num período que foi de meados de agosto a início de setembro de 2009, que foi o tempo levado para centrifugar a massa de lodo desejada. Quando deveriam ser iniciadas as amostragens do lodo sólido, já disposto no pátio de cura e secagem, esta massa, de aproximadamente 100 m³, foi inundada devido às fortes chuvas ocorridas no final de setembro de 2009. Resolveu-se centrifugar outro lote de lodo proveniente de outros descartes, denominado lote 2, e amostrá-lo apenas quando disposto no pátio de cura e secagem (lodo sólido). Este lodo foi disposto no pátio em meados de fevereiro de 2010, e alguns dias depois iniciaram-se as amostragens, que se estenderam até início de setembro de 2010, ou seja, durante aproximadamente seis meses. O volume deste lodo, quando disposto inicialmente no pátio, era de aproximadamente 85 m³.

Medidas da Densidade (lodo úmido)

Lodo Líquido (Lote 1)

Foram extraídas 42 amostras de lodo homogeneizado no adensador, que recebeu seis descartes (dois do Ralf 03 e quatro do Ralf 07). Para cada quantidade de lodo retirado do adensador, com um recipiente adequado, a temperatura do lodo e a temperatura ambiente eram medidas por um termômetro digital, e duas provetas, com volumes de 500 ml e massas aferidas, eram preenchidas. As massas das provetas preenchidas com lodo eram medidas em balança digital e a densidade do lodo determinada. Seis provetas foram utilizadas e a coleta das 42 amostras ocorreu em quatro dias (8 no 1º dia, 18 no 2º, 8 no 3º e 8 no 4º), num período de quatro semanas (meados de agosto a início de setembro de 2009), que foi o período que o lodo descartado no adensador levou para ser centrifugado. Para cada dia de coleta, após a medição da densidade para cada uma das amostras, estas eram dispostas em um recipiente, onde no final de todas as medições, para aquele dia, a massa resultante era homogeneizada e três pequenas amostras eram retiradas para a determinação do teor de sólidos totais, para cada uma destas amostras, de forma que a média entre os três valores obtidos representasse o conjunto de amostras coletadas naquele determinado dia. Considerou-se o valor da densidade, para cada dia de coleta, como a média dos valores da densidade obtidos naquele dia.

Lodo Após Centrifugação (Lote 1)

Durante as mesmas quatro semanas de medições com o lodo líquido, foram extraídas, também em quatro dias, 34 amostras de lodo (8 no 1º dia, 8 no 2º, 6 no 3º e 12 no 4º) na saída da centrífuga. Com uma bandeja bem próxima à saída da centrífuga, deixava-se o lodo cair sobre ela, até que grande parte da bandeja fosse preenchida. A temperatura do lodo e a temperatura ambiente também eram medidas por um termômetro digital, e um cilindro vazado de aço inox, com uma das extremidades cortantes, era introduzido manualmente na massa de lodo pelo lado cortante, até que o lodo extravasasse pela extremidade superior. A massa ao redor do cilindro era retirada com uma espátula, e esta mesma espátula era introduzida por baixo do cilindro, a fim de retirá-lo da bandeja. Com uma espátula cortante, a massa de lodo que extravasou a extremidade superior era retirada e uma tampa de teflon era encaixada nesta extremidade. O cilindro era virado e limpo e sua massa medida em balança digital. Com o volume e a massa do cilindro aferidos, a densidade do lodo era determinada. Foram utilizados cinco cilindros de aço inox, com volumes variando de 398,58 cm³ a 439,56 cm³. A metodologia para a determinação da densidade do lodo após centrifugação está baseada na metodologia para medida de Densidade Aparente, Método do Anel Volumétrico (EMBRAPA, 1997), com algumas adaptações, uma vez que se mediu a densidade do lodo úmido, trabalhou-se com cilindros e não anéis, etc. O teor de sólidos totais, para um conjunto de amostras retiradas num determinado dia, foi obtido de forma semelhante ao obtido com o lodo líquido. Considerou-se o valor da densidade, para cada dia de coleta, como a média dos valores da densidade obtidos naquele dia.

Lodo Sólido (Lote 2)

Os 85 m³ iniciais de lodo sólido resultaram da centrifugação de lodos originários de cinco descartes (dois do Ralf 02 e três do Ralf 06). Esta massa foi distribuída numa área aproximadamente retangular, onde se fez uma passagem central, resultando numa disposição em forma de U (dois retângulos maiores de 22m x 2,5m e um retângulo menor de 3,5m x 2,2m). O lodo retirado para formar a passagem foi disposto sobre a massa restante, de forma que a altura inicial da massa do lodo sólido estava em torno de 0,70m. Durante um período de seis meses, foram extraídas 110 amostras, num total de oito dias de coleta (10 no 1º dia, 9 no 2º, 16 no 3º e 15 no

4º, 5º, 6º, 7º e 8º dias), correspondendo a uma média de 14 amostras por dia de coleta. A escolha dos pontos a serem amostrados era feita de forma aleatória sobre toda massa do lodo e, para cada ponto selecionado, retirava-se com uma pá aproximadamente 15 cm da massa superficial endurecida de lodo, num raio de aproximadamente 15 cm. A temperatura do lodo e a temperatura ambiente também eram medidas, e o procedimento para a extração da amostra ocorria a partir desta massa retirada e era idêntico ao realizado para o lodo após centrifugação, usando-se inclusive os mesmos cilindros de aço inox. A determinação do teor de sólidos totais, para cada conjunto de amostras, foi realizada de forma semelhante aos casos anteriores. Considerou-se o valor da densidade, para cada dia de coleta, como a média dos valores da densidade obtidos naquele dia.

Medidas da Densidade Aparente

A densidade aparente, para um determinado teor de sólidos, foi obtida utilizando-se a densidade do lodo úmido para este mesmo teor de sólidos, conforme equação (3).

Medidas da Porosidade Total

A porosidade total, para um determinado teor de sólidos, foi obtida utilizando-se a densidade aparente para este mesmo teor de sólidos e a densidade de partículas, considerada invariante neste experimento (equação (13)).

Medidas da Densidade de Partículas

A medida da densidade de partículas, necessária para a obtenção da porosidade total do lodo, foi determinada para cinco amostras de lodo, em que se fez uso normal de polímero para a centrifugação, e para outras cinco amostras, onde não se utilizou polímero para a centrifugação. As amostras eram secas em estufa (a 105 °C) até atingirem massa constante e, após terem sido degranuladas e passadas em peneiras de 2 mm, uma quantidade de aproximadamente 10 g era introduzida em um balão volumétrico de 50 ml. O volume desta massa sólida era obtido através da medida do volume de álcool etílico (99,8%), necessário para completar a capacidade do balão volumétrico. Durante a introdução de álcool, o balão era agitado cuidadosamente, para eliminar as bolhas de ar que se formavam. A metodologia utilizada para esta medida foi baseada na metodologia para solos, Densidade de Partículas - Método do Balão Volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Medidas do Limite de Contração

O ensaio foi realizado primeiramente com pequenas porções de lodo (13g – 28g), extraídas diretamente de uma massa recém-centrifugada, não caleada, que recebeu polímero na mesma dosagem que os lodos estudados, perfazendo um total de sete amostras. Estas massas, já saturadas naturalmente, foram inseridas aos poucos em cápsulas metálicas (12cm^3 – 25cm^3), lubrificadas com vaselina, batendo-as sobre uma taboa de madeira, de modo a espalhar uniformemente a massa na capsula e eliminar as bolhas de ar formadas. As capsulas preenchidas com lodo foram levadas à estufa a 105 °C, até atingirem massa constante. As massas destas amostras secas foram medidas em balança digital e os volumes das mesmas foram determinados pela medida da massa de mercúrio transbordada, quando estas amostras eram inseridas e empurradas para dentro de um recipiente totalmente preenchido com mercúrio. Isto era feito com a ajuda de uma placa plana acrílica com três pinos. Os volumes das cápsulas metálicas também foram determinados pela massa de mercúrio que preenchia completamente estes recipientes. Medidas da temperatura ambiente foram tomadas durante o ensaio para determinar a densidade do mercúrio e da água, esta última utilizada diretamente na equação (16).

Realizou-se posteriormente, outro ensaio com mais oito amostras provindas da mesma massa de lodo utilizada no ensaio anterior. Como esta massa já vinha secando naturalmente por duas semanas, foi necessário saturá-la com água antes de repetir o experimento.

Os ensaios de limite de contração foram baseados na metodologia para solos, Limite de Contração – Método do Mercúrio Metálico (EMBRAPA, 1997), com algumas adaptações, uma vez que esta metodologia recomenda que o solo, após secagem, seja passado em peneira de 0,42 mm, antes de ser saturado com água para formar as amostras. A tentativa de seguir esta recomendação resultou em insucesso, uma vez que as amostras após a secagem não apresentavam coesão, se desmanchando em pó com o manuseio. Desta forma, resolveu-se proceder conforme o descrito anteriormente.

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram determinados (MORETTO et al., 2010) os intervalos de confiança para as médias populacionais da densidade do lodo líquido, do lodo após centrifugação e do lodo sólido, sendo que para este último foram construídos intervalos de confiança para cada um dos dias de coleta. Embora tenham se coletado amostras, tanto para o lodo líquido como para o lodo após centrifugação, em quatro dias distintos, os valores das densidades e teores de sólidos estiveram bem próximos nestes dias e, desta forma, os intervalos de confiança foram construídos com a totalidade das amostras, para cada um destes lodos.

A Figura 1 mostra a curva da densidade do lodo úmido em função do teor de sólidos, ajustada para todos os pontos experimentais do lote 1 (lodo líquido e após centrifugação) e lote 2 (lodo sólido).

Durante as amostragens dos lodos líquido e após centrifugação (lote 1) e do lodo sólido (lote 2), algumas amostras de lodo foram tomadas, com o intuito de se medir o teor de sólidos fixos e voláteis com relação aos sólidos totais. Os resultados destas análises mostram que tanto para os sólidos fixos quanto para os sólidos voláteis, os valores estiveram bem próximos, para cada um destes lodos, resultando em valores em torno de 44% e 56%, respectivamente. As temperaturas tomadas para o lodo líquido, após centrifugação e sólido ficaram bastante próximas da temperatura ambiente.

Embora a massa de lodo contida no lote 2 não tenha provindo do lote 1, os lodos destes lotes são originários da mesma fonte de esgotos, receberam o mesmo tipo de tratamento, são uma mistura de descartes de lodos com idades próximas, e tem teor de sólidos fixos e voláteis muito próximos. Isto permite fazer um único gráfico com os pontos referentes aos lotes 1 e 2 e analisar o comportamento da densidade de uma forma indiferenciada.

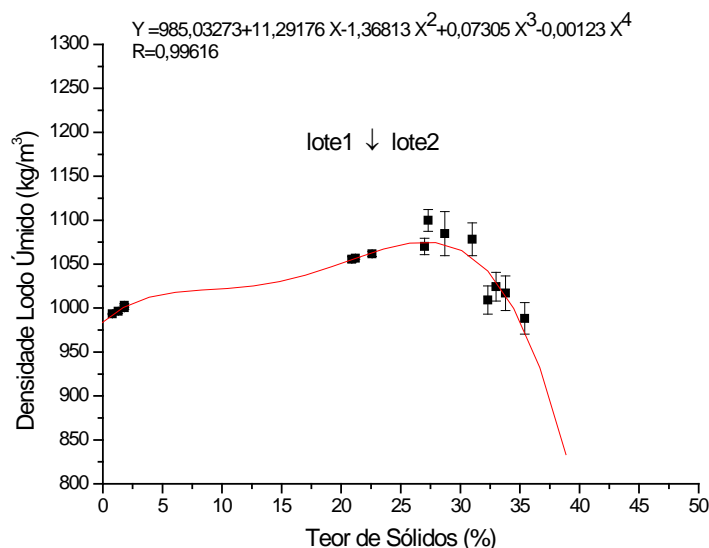


Figura 1: Gráfico da Densidade do Lodo Úmido versus teor de sólidos.

A curva da densidade do lodo úmido em função do teor de sólidos (Figura 1) mostra que o desaguamento mecânico foi decisivo na extração da umidade do lodo estudado, ou seja, a redução na umidade do lodo sólido (redução de 11%), nestes seis meses de disposição no pátio, foi a metade que o obtido pela centrifugação (redução de 22%). Isto se deve às circunstâncias de disposição do lodo no pátio (lodo que não foi caledo e revolvido) e também às condições climáticas (umidade e frio) neste período. A partir dos valores de descarte, a densidade, que estava em torno de 997 kg/m³, para um teor de sólidos próximo a 1,4%, começa crescer, atingindo o valor máximo de aproximadamente 1076 kg/m³, para o teor de sólidos de 27%; a partir daí a densidade decai rapidamente. O último valor experimental obtido, 988 kg/m³, ocorre quando o teor de sólidos está próximo de 35%.

As variações do teor de sólidos foram pequenas para o lodo sólido, a despeito do longo tempo que o mesmo ficou exposto no pátio. Para as quatro últimas análises, que tomaram um pouco mais da metade do tempo de

exposição no pátio, estas variações foram ainda menores, o que obrigou a encerrar as medições, devido à falta de disponibilidade de espaço na ETE. Como consequência, isto impediu de conhecer valores experimentais da densidade para teores de sólidos maiores que 35%. Observações semelhantes a estas podem ser estendidas às curvas da densidade aparente e porosidade total em função do teor de sólidos (Figuras 2(a) e 2(b)). Estas curvas possuem um comportamento muito próximo do linear e aparentam convergir para valores constantes, próximo ao ponto que a densidade começa decair e, portanto, próximo ao ponto de máximo (27%).

As curvas representadas nas Figuras 2(a) e 2(b) foram realizadas para todos os pontos experimentais do lote 1 (lodo líquido e após centrifugação) e lote 2 (lodo sólido).

Para a determinação da porosidade total do lodo após centrifugação e do lodo sólido, utilizou-se a densidade de partículas obtida para o lodo com polímero, que foi de $1740 \pm 37 \text{ kg/m}^3$ e para o lodo líquido, utilizou-se o valor obtido sem polímero $1578 \pm 15 \text{ kg/m}^3$, uma vez que este é o único lodo que não tem polímero.

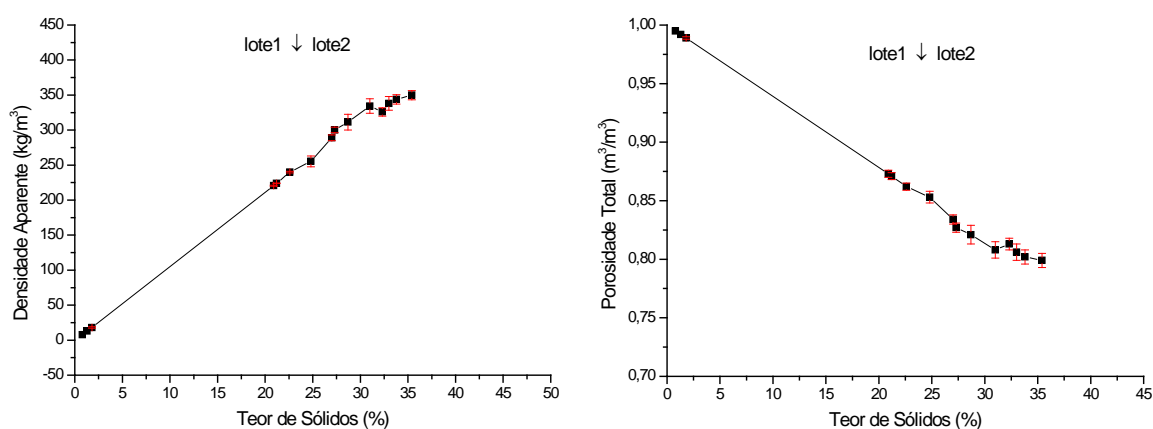


Figura 2: (a) Gráfico da Densidade Aparente *versus* teor de sólidos. (b) Gráfico da Porosidade Total *versus* teor de sólidos.

A Figura (3) mostra a curva de saturação do lodo, em função do teor de sólidos totais. Através destas curvas, pode-se observar que até ser atingido o valor máximo da densidade do lodo úmido (teor de sólidos próximo a 27%), o grau de saturação reduz lentamente e após ser atingido este valor máximo, o grau de saturação passa a diminuir de forma acelerada com o aumento do teor de sólidos.

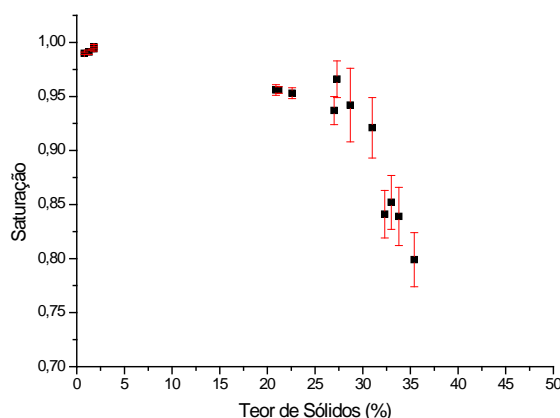


Figura 3: Curva de Saturação do Lodo *versus* teor de sólidos.

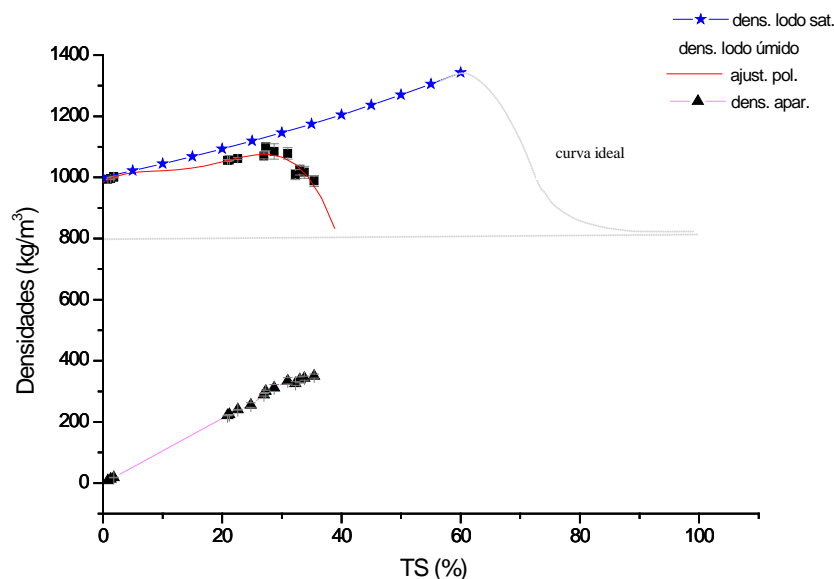


Figura 4: Curva Teórica da Densidade do Lodo Saturado, Densidade do Lodo Úmido e Densidade Aparente versus teor de sólidos.

A Figura 4 mostra a curva teórica da densidade do lodo saturado e as curvas experimentais da densidade do lodo úmido e da densidade aparente, em função do teor de sólidos. Como é de se esperar, a curva da densidade do lodo úmido deve estar bastante próxima da curva teórica da densidade do lodo saturado, até o momento que o ar começa penetrar no lodo e o mesmo deixa de estar saturado. Teoricamente, neste momento, o lodo deveria parar de contrair, atingindo um volume constante até a secagem total. Como decorrência, a densidade úmida começaria a diminuir, uma vez que a massa de água evaporada seria substituída por ar. Como consequência, a partir deste momento, a densidade aparente e a porosidade total deveriam ter seus valores estabilizados.

Com base nos resultados experimentais observados pelas curvas da densidade do lodo úmido, densidade aparente e porosidade total, chegou-se a aventar a possibilidade do teor de sólidos 27% corresponder ao teor de sólidos que a contração no lodo cessa, e que, como consequência, a partir deste valor de teor de sólidos, a densidade aparente estabilizaria próximo de 400 kg/m^3 , a densidade do lodo úmido também tenderia a este valor, para teores de sólidos mais altos, e a porosidade total tenderia a um valor próximo de 0,80 (MORETTO et al., 2010). Contudo, medidas do limite de contração, realizadas com amostras de lodo logo após a centrifugação (primeiro ensaio), apontam para um valor $66,0 \pm 2,2 \%$, cujo teor de sólidos correspondente é de $60,3 \pm 1,0 \%$. Medidas da densidade aparente, para as amostras completamente secas, resultaram num valor de $810 \pm 14 \text{ kg/m}^3$, e cálculos da porosidade total, para estas mesmas amostras, resultaram num valor de $0,53 \pm 0,01$. Cálculos da densidade (lodo úmido) no limite de contração, para estas amostras, levaram a um valor de $1343 \pm 6 \text{ kg/m}^3$. Medidas destas mesmas grandezas, realizadas com lodo centrifugado e seco naturalmente por duas semanas (segundo ensaio), chegaram a resultados bastante semelhantes. O teor de sólidos fixos e o teor de sólidos voláteis com relação aos sólidos totais, para o lodo analisado nos ensaios de limite de contração, têm valores bem próximos dos valores citados para os outros lodos estudados.

A aparente discordância entre os resultados expostos acima se deve ao fato de se supor que a densidade do lodo úmido começa a decair a partir do momento que o lodo atinge o limite de contração. Amostras pequenas, de pequenas espessuras, sujeitas a temperaturas uniformes como, por exemplo, as que utilizamos nos ensaios de limite de contração, podem apresentar comportamento próximo a isto. Para grandes quantidades de lodo, estocadas em escala operacional e sujeitas a grandes variações de temperatura, umidade do ar e ventilação, como os 85 m^3 iniciais, dispostos numa área de aproximadamente 118 m^2 e altura inicial de $0,70 \text{ m}$, observa-se que a secagem ocorre irregularmente em forma de camadas, iniciando pelas camadas superiores, que estão sujeitas a temperaturas maiores e estão em contato com o ar. Conforme estas camadas vão secando e consequentemente contraindo, pequenas trincas vão aparecendo e evoluindo, com o passar do tempo, em

rachaduras na massa do lodo, expondo as camadas inferiores e aumentando a superfície exposta. Esta forma de estruturação é observada para lodos provenientes de reatores UASB, submetidos à secagem natural (infiltração e evaporação) em leitos de secagem, onde na evolução da secagem, formam-se placas e torrões que vão subdividindo-se pela contração e ganhando tamanhos menores, diretamente relacionados à concentração de sólidos da massa. Desta forma, como a secagem é desuniforme, antes que camadas de lodo atinjam o limite de contração, possivelmente o ar penetra pelas pequenas trincas ou rachaduras, fazendo com que a densidade do lodo úmido nestas camadas decaia a partir de um valor máximo (1076 kg/m^3 no $\text{TS} = 27\%$), enquanto a curva teórica da densidade do lodo saturado continua crescer até atingir o limite de contração (1343 kg/m^3 no $\text{TS} = 60\%$). Além disso, temos que considerar que em situações reais, além da penetração do ar pelas fendas, sempre haverá penetração de ar para o interior das superfícies do lodo expostas ao ar. A densidade do lodo úmido deverá continuar caindo após o lodo ter atingido o limite de contração, e só estabilizará quando estiver ainda mais seca, tendendo ao valor da densidade aparente seca (valor experimentalmente desconhecido, para o lodo disposto no pátio).

A densidade aparente passa a ter um crescimento menos acentuado a partir do $\text{TS} = 27\%$, e pode continuar crescendo lentamente até o limite de contração, onde deverá se estabilizar em um valor menor que 810 kg/m^3 (valor da densidade aparente seca medida para as amostras do ensaio de limite de contração), em função da introdução de ar na massa de lodo, pelos motivos citados anteriormente.

Por outro lado, a porosidade total passa a decrescer mais lentamente a partir do $\text{TS} = 27\%$, e pode continuar decrescendo lentamente até o limite de contração, onde tenderá a uma estabilização em um valor maior que 0,53 (valor da porosidade total calculada para as amostras secas do ensaio de limite de contração), em função da introdução de ar na massa de lodo, pelos motivos citados anteriormente. Observações práticas sobre a evolução da secagem natural em leitos de secagem demonstram esta tendência. Outro fator que pode contribuir com estas observações durante a estocagem é a presença de fibras e pequenas partículas minerais no lodo de reatores UASB, que auxiliam na estruturação da massa e formação de poros.

A curva pontilhada (curva ideal), que dá continuidade à curva teórica da densidade do lodo saturado, é apenas uma suposição daquilo que poderia ocorrer, caso o lodo disposto no pátio secasse de uma forma homogênea, onde não houvesse trincas e rachaduras e o ar comesse a penetrar na massa de lodo só após o limite de contração.

O grau de contração, ou seja, a razão expressa em percentagem, da diferença entre os volumes inicial e final e o volume inicial dos corpos de prova, resultante do primeiro ensaio do limite de contração, resultou em torno de 70%, e para o segundo ensaio, próximo de 60%.

CONCLUSÃO

A curva da densidade em função do teor de sólidos (Figura 1) mostra que o desaguamento mecânico foi decisivo na extração da umidade do lodo estudado, ou seja, a redução na umidade do lodo sólido, nestes seis meses de disposição no pátio, foi a metade do obtido pela centrifugação. Isto se deve às circunstâncias de disposição do lodo no pátio (lodo que não foi caleado e revolvido) e também às condições climáticas (umidade e frio) neste período. Embora se tenha realizado um grande número de medidas de densidade, as variações de teor de sólidos foram pequenas para o lodo sólido, a despeito do longo tempo que o mesmo ficou exposto no pátio. Como consequência, isto nos impediu de conhecer valores experimentais da densidade para teores de sólidos maiores que 35%. Observações semelhantes a estas podem ser estendidas às curvas da densidade aparente e porosidade total em função do teor de sólidos (Figuras 2(a) e 2(b)).

Muito embora os lodos dos lotes 1 e 2 sejam provindos da mesma fonte de esgotos, tenham recebido o mesmo tipo de tratamento, sejam uma mistura de descartes de lodos com idades próximas, e tenham teor de sólidos fixos e voláteis muito próximos, o ideal seria ter realizado todas as medidas com o lodo provindo de um mesmo lote.

A despeito das limitações citadas anteriormente, todas as metodologias experimentais foram aplicadas satisfatoriamente, podendo ser reproduzidas em condições climáticas diferentes das estudadas, com o lodo caleado ou não, revolvido ou não.

As previsões da densidade aparente, assim como da porosidade total, para teores de sólidos correspondentes ao final da fase de secagem, realizado com as amostras utilizadas nos ensaios de limite de contração, parecem não corresponder às tendências do observado em amostras no pátio de secagem. As amostras pequenas utilizadas nos ensaios de laboratório apresentaram redução de volume praticamente sem o surgimento de trincas e aberturas. Nos casos em que estas ocorreram, as dimensões observadas foram pequenas, além de terem sido preenchidas em grande parte com o mercúrio utilizado para a medição dos volumes das amostras, causando, muito provavelmente, pouco erro no cálculo do volume. Nas amostras de campo, o volume deve incluir importante fração de volume correspondente a trincas e aberturas. Em consequência, a previsão de valores da densidade aparente de 810 kg/m^3 e porosidade 0,53, para o final de secagem, realizada com as amostras utilizadas nos ensaios de LC, não é confirmada pelas curvas levantadas com base nos resultados de medidas de campo, que indicam tendência de valores finais da ordem de 400 kg/m^3 e 0,80, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Rio de Janeiro. 1997.
2. FERNANDES F.; LOPES D. D.; ANDREOLI C.V.; SILVA S.M.C.P. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. DESA-UFMD-SANEPAR. Belo Horizonte, 2001. vol. 6.
3. LAL R.; SHUKLA M. K. Principles of soil physics. New York. Marcel Dekker, Inc. 2004.
4. MORETTO S. R. O.; PUPPI R. F. K.; PEGORINI E. S.; INOUE P. S.; OLIVEIRA G. G. Medidas da densidade do lodo proveniente de digestão anaeróbia. In: Anais do VII Simpósio Interamericano de Biossólidos. Campinas. 2010.
5. SPERLING M. V.; GONÇALVES R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. DESA-UFMD-SANEPAR. Belo Horizonte, 2001. vol. 6.