

II-049 – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DO LODO DE ETE SUJEITO À SECAGEM NATURAL APÓS CENTRIFUGAÇÃO

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.

Rogerio Francisco Küster Puppi

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Geotecnica 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.

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 analisar o comportamento da densidade de lodos de ETEs provenientes de tratamento biológico, por reatores UASB e sujeitos ao desaguamento mecânico através de centrífuga. Como consequência, foram obtidas curvas da densidade do lodo úmido e da densidade aparente, em função do teor de sólidos totais do lodo, cujas medidas foram tomadas durante o descarte, durante a centrifugação e durante a secagem de pequenas amostras que passaram pelo processo de centrifugação. Foram também realizadas medidas da densidade de partículas, a fim de se poder determinar o limite de contração para estes lodos. Algumas metodologias experimentais foram aprimoradas, com o intuito de serem reproduzidas com maior facilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de uma ETE, densidade 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_u 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 (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).

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

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).

$$Vazão lodo (m³/dia) = \frac{carga de sólidos (kgSS/dia)}{\rho_u \times \frac{TS}{100}} = \frac{carga de sólidos (kgSS/dia)}{\rho_{ap}} \quad (4)$$

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_{aq} , 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_{aq} , e um volume de gases V_{ar} , de forma que:

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

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

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

Alguns autores (LAL; SHUKLA, 2004) definem a densidade aparente seca e a densidade aparente úmida. No presente trabalho, o primeiro termo corresponde ao chamado por densidade aparente e o segundo por densidade da amostra úmida. Por questão de simplicidade, o termo densidade poderá ser utilizado com o mesmo sentido de densidade úmida.

A densidade da amostra, quando a mesma se encontra saturada, ρ_{sat} , é determinada pela equação (8), só que $V_t = V_s + V_{aq}$, 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,

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

$$\rho_{sat} = \frac{M_t}{V_s + V_{ag}} = \frac{M_t}{\frac{M_s}{\rho_s} + \frac{M_{ag}}{\rho_{ag}}} = \frac{1}{\frac{TS/100}{\rho_p} + \frac{(100 - TS)/100}{\rho_{ag}}} \quad (8)$$

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):

$$U_{LC} = \rho_{ag} \times \left(\frac{V}{M_s} - \frac{1}{\rho_p} \right) \times 100 (\%) \quad (9)$$

Onde V 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:

$$TS = \frac{1}{U_{LC} + 100} (\%) \quad (10)$$

O objetivo geral do presente trabalho é analisar o comportamento da densidade de lodos de ETEs provenientes de tratamento biológico, por reatores UASB e sujeitos ao desaguamento mecânico através de centrífuga. Como consequência, buscou-se 1) estabelecer metodologias que favoreçam melhores condições para a determinação da densidade destes lodos, 2) determinar as curvas da densidade do lodo úmido e da densidade aparente, em função do teor de sólidos totais do lodo, com medidas tomadas durante o descarte, durante a centrifugação e durante a secagem de pequenas amostras que passaram pelo processo de centrifugação e 3) medir a densidade de partículas, a fim de se poder determinar o 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 baia de estocagem temporária. Mensalmente, quando a baia 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, ou outras medidas descritas abaixo, optou-se por não adicionar cal à massa de lodo após a centrifugação.

Para a obtenção de curvas de densidades de lodos, abrangendo os mais diversos graus de umidade que os mesmos podem possuir numa ETE, medidas de densidade podem ser realizadas em amostras extraídas inicialmente no adensador, posteriormente na baia (após a centrifugação) e, finalmente, no pátio de cura e secagem, de preferência durante todo o tempo que o lodo fica aí disposto. MORETTO et al., 2011 relatam algumas dificuldades em amostrar o lodo no pátio de cura e secagem, pois a necessidade de quantidades razoáveis de lodo, devido ao longo tempo de amostragem, pode dificultar a secagem desta massa, principalmente se as condições climáticas forem adversas (frio e umidade), o que poderia levar a medidas de densidades restritas apenas aos teores de sólidos mais baixos, além dos transtornos em se deixar inoperante a área do pátio onde o lodo em estudo se encontra. Desta forma, na metodologia aqui proposta, serão extraídas amostras do adensador e pequenas amostras (aproximadamente 32,00 cm³) coletadas após a centrifugação, na saída da centrífuga, que serão encaminhadas para um recinto coberto, mas arejado, onde um número fixo de amostras (4), escolhido aleatoriamente do conjunto, será analisado diariamente, de forma que num período bem menor (10 dias), as amostras restantes estarão praticamente secas. Por uma questão de praticidade, os lodos (amostras) provindos do adensador serão denominados por lodos líquidos e os do ambiente coberto e arejado, por lodos sólidos.

Medidas da Densidade (lodo úmido)

Lodo Líquido

Retirou-se uma quantidade suficiente de lodo do adensador, com um recipiente adequado, de forma a preencher duas provetas, com volumes de 250 ml e massas aferidas. As massas das provetas preenchidas com lodo foram medidas em balança digital (resolução 0,01g) e a densidade do lodo determinada. Após a medição da densidade para cada uma das amostras, estas foram dispostas em um recipiente, onde a massa resultante foi homogeneizada e uma pequena amostra foi retirada para a determinação do teor de sólidos totais. Este procedimento foi repetido mais duas vezes, de forma a obter-se um total de 6 amostras de lodo provindo do adensador.

Lodo Após Centrifugação

Com uma bandeja (50cm x 35cm x 10cm) bem próxima à saída da centrífuga, deixou-se o lodo cair sobre ela, até que grande parte da bandeja fosse preenchida. Cerca de 10 anéis de alumínio, com uma das extremidades cortantes e volumes em torno de 32,00 cm³, eram introduzidos manualmente na massa de lodo pelo lado cortante, até que o lodo extravasasse pela extremidade superior. A massa ao redor dos anéis era retirada com uma espátula, e esta mesma espátula era introduzida por baixo dos anéis, a fim de retirá-los da bandeja. Com uma espátula cortante, a massa de lodo que extravasou a extremidade superior de cada um dos anéis era retirada e uma lâmina de vidro (9cm x 9cm) era colocada nesta extremidade a fim de vedá-la. Os anéis eram virados e limpos e suas massas medidas em balança digital (resolução 0,01g). Com o volume e a massa dos anéis e lâminas de vidro conhecidos, a densidade do lodo era determinada. A metodologia para a determinação da densidade do lodo após centrifugação está baseada na metodologia para solos, Densidade Aparente - Método do Anel Volumétrico (EMBRAPA, 1997), com algumas adaptações, uma vez que se medi a densidade do lodo úmido.

O teor de sólidos totais, para o conjunto de amostras retiradas de uma bandeja, foi determinado através da média realizada sobre os teores de sólidos de quatro pequenas amostras extraídas aleatoriamente da bandeja. Conhecendo-se a massa de cada uma das amostras, extraídas para as medidas de densidade, e o teor de sólidos totais atribuído ao conjunto, no momento da amostragem, pôde-se calcular a massa de sólidos contida em cada uma destas amostras. O procedimento descrito acima foi repetido mais três vezes de forma a se obter um total de 40 amostras de lodo na saída da centrífuga.

Lodo Sólido

Os procedimentos realizados com o lodo líquido e o lodo após centrifugação ocorreram em 29/01/12. Neste mesmo dia, as 40 amostras de lodo coletadas após centrifugação foram transportadas para um pequeno local

coberto (2m x 2m x 2m), com uma das paredes abertas, onde as amostras ficaram dispostas sobre uma prateleira. No primeiro dia após a coleta, os anéis de todas as amostras foram cuidadosamente retirados, ficando as mesmas apenas sobre suas lâminas de vidro. Estudos preliminares mostraram que a extração dos anéis, logo nos primeiros dias de secagem, permite uma perda de umidade mais rápida e uniforme. Do conjunto de amostras, 4 foram escolhidas aleatoriamente para a determinação da densidade. A medida da massa foi realizada em balança digital (resolução 0,01g) e o volume foi medido através de um paquímetro digital (8 medidas de diâmetro e 8 medidas de altura por amostra). Igual procedimento foi adotado no segundo dia, e a partir do terceiro dia, além da medida do volume através do paquímetro digital, mediu-se também o volume das amostras, envolvendo-as com parafina fundida e pendurando-as, depois de secas, num suporte, utilizando um fio bem fino, e imergindo-as em um recipiente com álcool etílico (92,8°), disposto sobre uma balança digital. A medida obtida pela balança (resolução 0,01g) corresponde ao valor do empuxo sofrido pelo corpo, dividido pela aceleração da gravidade, que é igual ao produto entre a densidade do fluido e o volume do fluido deslocado ou volume da amostra. A densidade do álcool etílico foi determinada através de um picnômetro de 100 ml. Esta metodologia resultou da adaptação da metodologia para solos, Densidade Aparente - Método do Torrão (EMBRAPA, 1997).

As medidas de volume utilizando a parafina passaram a ser realizadas a partir do terceiro dia, pois somente a partir daí, as amostras apresentaram consistência adequada para o tipo de manipulação descrito. Após as medidas de volume, as amostras eram descartadas, uma vez que a impermeabilização com a parafina não permitiria a continuidade da secagem da amostra.

Num período de 10 dias, todas as amostras foram analisadas, uma vez que se mediu a densidade de quatro amostras por dia. Já se sabia previamente que este número de dias, na época do ano que os experimentos foram realizados, era suficiente para secar as pequenas amostras quase que completamente.

A medida do teor de sólidos de cada amostra analisada foi determinada através do conhecimento prévio da massa seca contida nesta amostra (procedimento descrito anteriormente) e da massa úmida da mesma no momento das medidas de densidade. Adotou-se este critério devido à inviabilidade de secar amostras envolvidas com parafina.

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 Densidade de Partículas

A medida da densidade de partículas (equação (7)), necessária para a obtenção do limite de contração, foi determinada para 6 amostras de lodo provindo da centrifugação. A massa deste lodo foi seca em estufa (a 105 °C) até atingir massa constante e, após ter sido degranulada e passada em peneiras de 2 mm, quantidades de aproximadamente 5 g, medidas em balança digital (resolução 0,01g), eram introduzidas em balões volumétricos de 50 ml. O volume da massa sólida introduzida em cada um dos balões foi obtido através da medida do volume de álcool etílico (92,8°), necessário para completar o volume aferido (50 ml) do balão volumétrico. Durante a introdução de álcool, disposto em uma bureta de 50 ml, os balões eram agitados 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 com 6 amostras de lodo, extraídas diretamente da massa de lodo recém-centrifugada. Estas amostras, já saturadas naturalmente, foram inseridas aos poucos em cápsulas metálicas (aproximadamente 24,00 cm³), 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 totalmente preenchidas com lodo foram levadas à estufa a 105 °C, até atingirem massa constante. As massas destas amostras secas foram medidas em balança digital (resolução 0,01g) 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, necessária para os cálculos de volume da capsulas e das amostras secas, e da densidade da água, esta última utilizada diretamente na equação (9).

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

A Figura 1 mostra as variações na altura (h), diâmetro (d) e volume (V) das amostras, durante a secagem, com relação aos respectivos valores encontrados no dia da coleta (h_0 , d_0 e V_0), que correspondem às dimensões dos anéis utilizados na obtenção das amostras. Os valores de d, h e V foram obtidos através do paquímetro digital. Pode-se notar, através desta figura, que as variações na altura e no diâmetro estão muito próximas, indicando que as amostras contraíram de forma parecida nas três dimensões. Quando se divide a variação relativa dos volumes ($V-V_0$)/ V_0 , pelas variações relativas da altura ($h-h_0$)/ h_0 ou diâmetro ($d-d_0$)/ d_0 , sofridos pelas amostras, o valor médio encontrado é aproximadamente 2,5 nos dois casos.

Medidas do limite de contração resultaram em um valor de $71,0 \pm 0,2\%$, que corresponde a um teor de sólidos totais de $58,5 \pm 0,4\%$. Pela Figura 1 é possível verificar que todas as curvas tendem a assumir valores constantes, a partir de teores de sólidos próximos a 60%. Medidas de limite de contração, realizadas com lodos desta mesma estação, revelam valores bastante próximos aos encontrados, como $66,0 \pm 2,2\%$, para o limite de contração e $60,3 \pm 1,0\%$, para o teor de sólidos total correspondente (MORETTO et al., 2011).

Para a medida de limite de contração adotada, utilizou-se a densidade de partículas encontrada experimentalmente, que foi $1,65 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Este valor também está próximo de valores encontrados para lodos desta estação, como $1,74 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ (MORETTO et al., 2011).

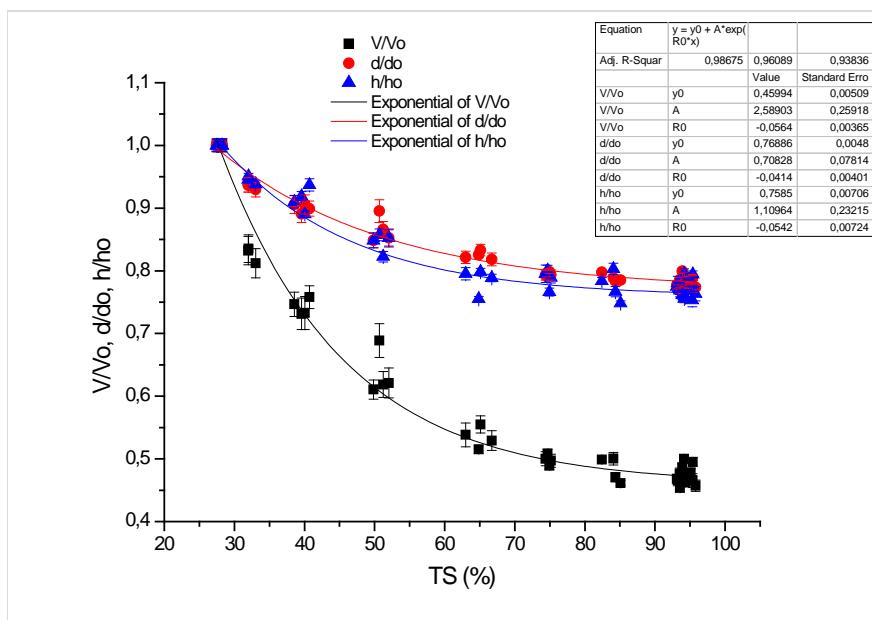


Figura 1: Gráfico das variações da altura, diâmetro e volume das amostras durante a secagem.

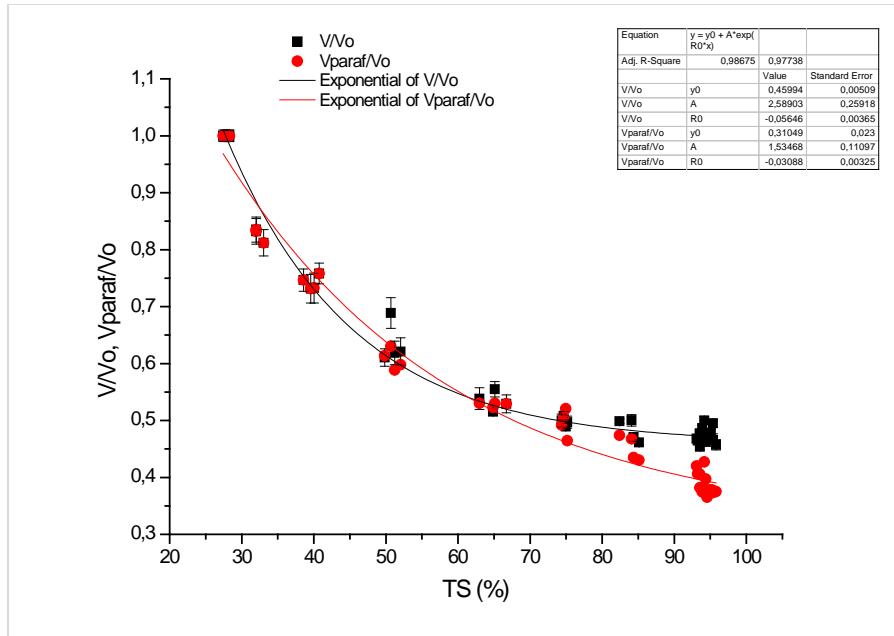


Figura 2: Gráfico das variações do volume das amostras durante a secagem quando os mesmos são medidos pelo paquímetro e pela parafina.

A Figura 2 mostra as variações de volume sofridas pelas amostras durante a secagem, quando estes volumes são medidos através do paquímetro e pela parafina. Até teores de sólidos em torno de 65% as duas curvas apresentam valores bem semelhantes, mas a partir deste valor, o volume medido pela parafina continua decrescendo, alcançando valores até 16% menores, que volume medido pelo paquímetro, para teores de sólidos em torno de 95%. Conforme as amostras vão secando, a porosidade do lodo vai aumentando, assim como o poder de penetração da parafina. Desta forma, as medidas de volume com a parafina vão tendendo à medida do volume da massa sólida e não mais à do volume aparente (volume do entorno da amostra), necessário para a

determinação da densidade do lodo úmido e densidade aparente. Se por um lado as medidas de volume com a parafina são uma boa alternativa para amostras que apresentam rachaduras, para amostras muito secas a medida do volume aparente pode ficar duvidosa. Uma vez que os limites para a medida do volume aparente através da parafina, para teores de sólidos mais altos, não estão bem claros, consideramos apenas as medidas do volume medido através do paquímetro em todos os cálculos, para todos os teores de sólidos, embora diversas amostras tivessem apresentado algum tipo de trinca ou pequena rachadura, cujo volume não foi descontado do volume total medido pelo paquímetro.

A Figura 3 mostra a curva da densidade do lodo úmido em função do teor de sólidos totais, levando-se em conta a densidade das amostras coletadas no adensador (três primeiros pontos), a densidade do lodo após centrifugação (4 pontos seguintes) e as demais densidades obtidas para as 40 amostras, durante a secagem das mesmas. Para a medida da densidade do lodo após centrifugação, realizou-se, para cada uma das bandejas, a média sobre os valores de densidade das 10 amostras coletadas nesta bandeja.

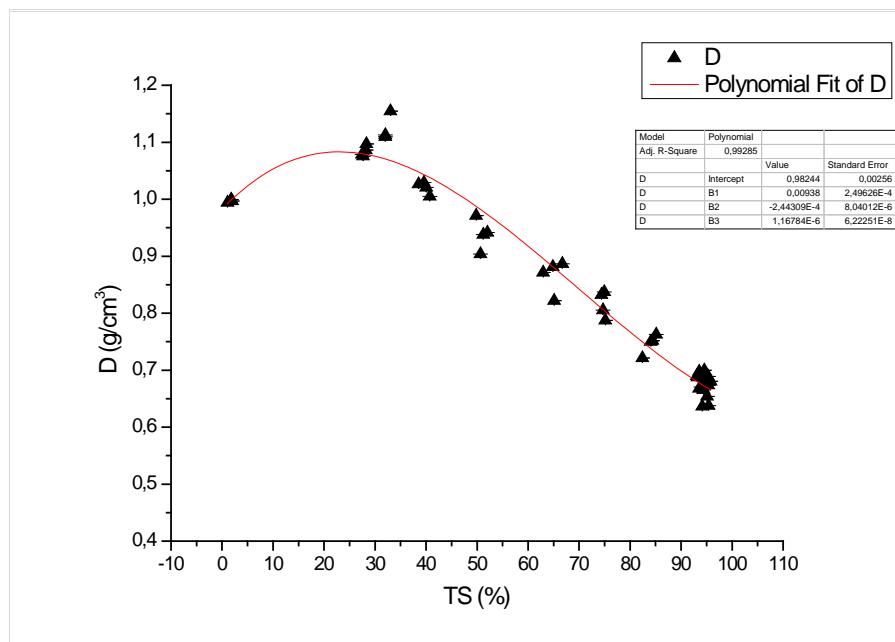


Figura 3: Gráfico da Densidade do Lodo Úmido versus teor de sólidos totais.

A partir dos valores de descarte, a densidade, que estava em torno de $1,00 \text{ g/cm}^3$, para teor de sólidos próximo a 1,6%, começa crescer, atingindo o valor máximo de aproximadamente $1,08 \text{ g/cm}^3$, para teor de sólidos próximo a 30%; a partir daí a densidade decai até o valor de $0,68 \text{ g/cm}^3$, para teor de sólidos próximo a 95%.

A Figura 4 representa a curva da densidade aparente em função do teor de sólidos totais, calculada para todos os pontos onde se mediu a densidade do lodo úmido. Para os teores de sólidos mais baixos, a densidade aparente é praticamente zero ($0,015 \text{ g/cm}^3$). Conforme o teor de sólidos aumenta, a densidade aparente aumenta, estabilizando em um valor em torno de $0,65 \text{ g/cm}^3$. Como era de se esperar, os menores valores atingidos pela densidade do lodo úmido (teores de sólidos mais altos), estão bem próximos deste valor.

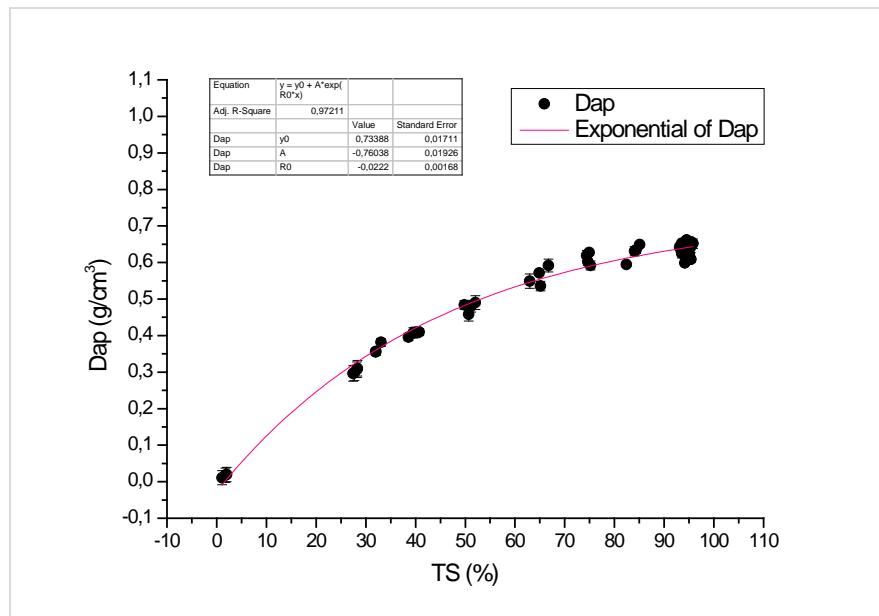


Figura 4: Medida da Densidade Aparente *versus* teor de sólidos totais.

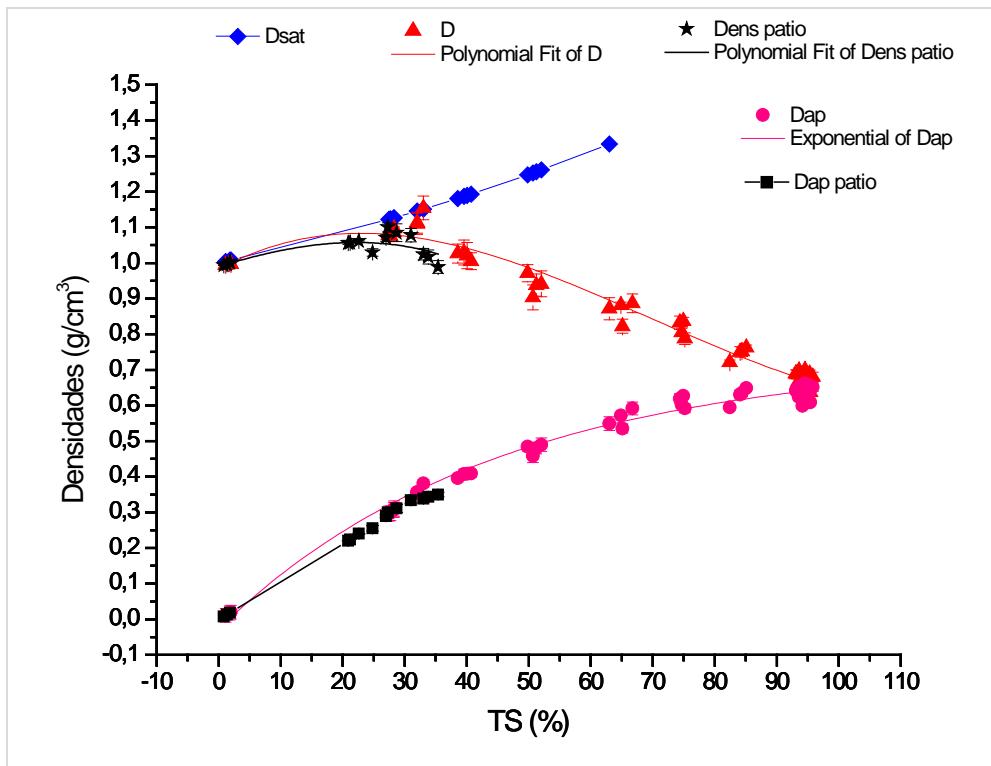


Figura 5: Curva Teórica da Densidade do Lodo Saturado, Densidade do Lodo Úmido e Densidade Aparente *versus* teor de sólidos totais.

A Figura 5 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 totais. A densidade do lodo saturado foi representada até o teor de sólidos 60%, pois, teoricamente, a partir do limite de contração o lodo deixa de ser saturado. Esta figura também traz a curva representada por **Dens_{patio}** que corresponde às medidas da densidade do lodo úmido, através de amostragens com o lodo no adensador, na saída da centrífuga (após centrifugação) e no pátio de cura e secagem, e também a curva representada por **Dap_{patio}**, que corresponde à densidade aparente

para as amostras extraídas para a determinação da densidade do lodo úmido. Estas medidas (MORETTO et al., 2011) também foram realizadas na ETE CIC Xisto, mas as amostragens do lodo sólido foram realizadas em uma grande massa de lodo, que depois de centrifugada (aproximadamente 85 m³) foi disposta no pátio de cura e secagem (aproximadamente 118 m²) durante seis meses. A inserção das referidas curvas na Figura 5 mostra que houve semelhança entre os resultados obtidos, até onde foi possível medir as densidades do lodo disposto no pátio de cura e secagem, embora as metodologias para obtenção das densidades do lodo sólido sejam diferentes nos dois casos estudados. O valor máximo da densidade do lodo úmido foi de 1,076 g/cm³ e ocorreu próximo ao teor de sólidos totais 27%. Além destas semelhanças, houve também concordância nas medidas de densidade de partículas e limite de contração, como citado anteriormente.

Como é de se esperar, curvas de densidade do lodo úmido devem estar bastante próximas da curva teórica da densidade do lodo saturado, até o quando o ar começa penetrar no lodo e o mesmo deixa de estar saturado. A densidade do lodo saturado neste momento seria 1,30 g/cm³ (equação (8)). Teoricamente, neste momento, o lodo deveria parar de contrair, atingindo um volume constante até a secagem total. Como decorrência, a densidade do lodo úmido começaria a diminuir, uma vez que a massa de água evaporada seria substituída por ar. Como consequência, a partir deste momento, a densidade aparente deveria ter seus valores estabilizados. Aparentemente, o valor máximo das curvas de densidade do lodo úmido deveria ocorrer no limite de contração.

Para os casos estudados, o limite de contração ocorreu para teores de sólidos totais próximos a 60% e os valores máximos encontrados nestas curvas ocorreram para teores de sólidos próximos a 30%. Supôs-se, no caso do lodo sólido disposto no pátio de cura e secagem (MORETTO et al., 2011), que a redução da densidade do lodo úmido para teores de sólidos bem menores (30%) para esta grande massa, seria consequência da secagem não uniforme das camadas de lodo. 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 contraíndo, pequenas trincas vão aparecendo e evoluindo, com o passar do tempo, em rachaduras, expondo as camadas inferiores do lodo e aumentando a superfície exposta ao ar.

Observou-se, entretanto, mesmo com amostras bem menores, um comportamento muito parecido com o obtido em **Dens_{pátio}**. Mesmo sem a presença dos anéis, as amostras não tiveram secagem totalmente homogênea, pois várias apresentaram algum tipo de trinca ou pequenas de rachaduras. Certamente as camadas externas estavam sujeitas a temperaturas maiores que as internas, provocando secagem irregular. Mesmo quando se faz a determinação da densidade com as medidas de volume obtidas com a parafina, a densidade atinge o valor máximo próximo ao teor de sólidos 30%, o que demonstra a entrada de ar pelas superfícies expostas das amostras. Este fato pode ser observado na Figura 6, assim como o aumento na densidade a partir de teores de sólidos de 65%, quando comparamos os valores da densidade cujo volume foi determinado pela parafina com a densidade, cujo volume foi determinado pelo paquímetro.

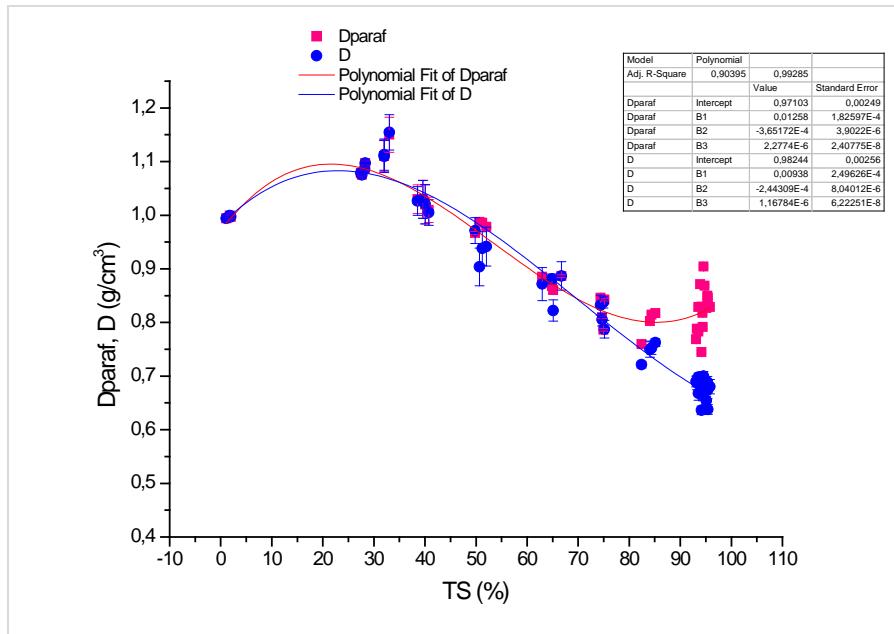


Figura 6: Densidade do lodo úmido, cujas medidas de volume foram obtidas com a parafina e com o paquímetro.

CONCLUSÃO

Através deste trabalho, puderam-se estabelecer metodologias bastante favoráveis para a medida da densidade do lodo que sofre processo de secagem natural em pátios de cura e secagem, após ter passado por centrifugação, de forma a facilitar a construção de curvas da densidade do lodo úmido e da densidade aparente, incluindo valores de teores de sólidos bem mais altos que os encontrados por outras metodologias mais trabalhosas e demoradas. As curvas obtidas através das amostras selecionadas parecem ter comportamento semelhante às obtidas em loco, dentro do intervalo de teor de sólidos que estas curvas foram obtidas. Medidas de densidade de partículas e limite de contração realizadas neste experimento, também concordaram bem com valores determinados para lodos desta mesma ETE.

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. Variações na densidade do lodo proveniente de digestão anaeróbia devido a perdas de umidade. In: Anais do 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre. 2011.
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.